

Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik

Christian Landschützer

Christian Landschützer

**Methoden und Beispiele
für das Engineering
in der Technischen Logistik**

Logistik Werkstatt Graz

Schriftenreihe des Instituts für Technische Logistik

Herausgeber:

Assoc.Prof. DI Dr.techn. Christian Landschützer

Logistik Werkstatt Graz

Schriftenreihe des Instituts für Technische Logistik

Christian Landschützer

**Methoden und Beispiele
für das Engineering
in der Technischen Logistik**

Diese Schrift wurde unter dem Titel „*Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik*“ als Habilitationsschrift für das Fach „Fördertechnik“ an der Fakultät Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz im Jahr 2016 vorgelegt.

Editor:

Institut für Technische Logistik, Technische Universität Graz
Christian Landschützer

Layout:

Christine Fraueneder
Gerald Mahringer

Editorial Office:

Christian Landschützer

Print:

Prime Rate Kft.
www.primerate.hu

© 2018 Verlag der Technischen Universität Graz
www.ub.tugraz.at/Verlag

Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik
(Logistik Werkstatt Graz; ISSN: 2411-3735)

ISBN (print): 978-3-85125-575-1

ISBN (e-book): 978-3-85125-576-8

DOI: 10.3217/978-3-85125-575-1



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>

Cover Picture "Engineering": Katja Lindenthal

Sehr geehrte Damen und Herren

Die Schriftenreihe "Logistik Werkstatt Graz" mit ihrer eingetragenen ISSN-Nummer hatte seit Anbeginn, und den seither erfolgreich aufgelegten Konferenzbänden der Logistikwerkstatt Graz 2015 und der 4th International Physical Internet Conference gemeinsam mit Logistikwerkstatt Graz 2017, den Hintergrund, nicht nur die Konferenzen des Instituts für Technische Logistik der TU Graz widerzuspiegeln, sondern auch eine Plattform für wesentliche wissenschaftliche Arbeiten des Instituts zu sein.

Seit Gründung der Reihe sind nunmehr drei Jahre ins Land gezogen und ich darf als Herausgeber nun stolz die erste wissenschaftliche Monographie abseits unserer Konferenzreihe vorlegen, die gleichzeitig meiner eigenen Feder entstammt.

Die Schrift "Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik" entstand als Habilitationsschrift an der TU Graz im Zeitraum von 2011 bis 2016. Mit diesem Band liegt die Schrift unverändert, lediglich im Format angepasst, dem interessierten Leser vor. Während die Kapitel eins bis fünf wissenschaftlich neue Ansätze im Themenbereich entwickeln richtet sich Kapitel sechs vor allem an Studierende im Fachbereich Maschinenbau und fasst relevantes Produktentwicklungswissen zusammen. Entsprechend kann Kapitel sechs auch eigenständig verwendet werden, während vor allem Kapitel zwei in mit Asteriskus (*) gekennzeichneten Bereichen erweiternd immer wieder auf Kapitel sechs verweist. Weitere editorische Hinweise sowie eine inhaltliche Einführung sind dem folgenden Vorwort sowie Kapitel sieben zu entnehmen.

In der Schriftenreihe werden in den nächsten Jahren Dissertationen aus dem Fachbereich der Technischen Logistik ebenso wie weitere Tagungsbände der Fachkonferenz folgen.

Mit besten Grüßen aus Graz,

Christian Landschützer

Assoc.Prof. DI Dr.techn.

Herausgeber der Schriftenreihe "Logistik Werkstatt Graz"

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	10
1 EINLEITUNG	12
1.1 NETZWERKE DER LOGISTIK	12
1.2 HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE LOGISTIK	16
1.2.1 <i>Megatrends</i>	16
1.2.2 <i>Trends für die Logistik</i>	18
1.3 ZIELE DER ARBEIT	23
1.4 STRUKTUR DER ARBEIT	28
2 ENGINEERING: STAND DER TECHNIK UND ZIELENTWICKLUNG FÜR DIE TECHNISCHE LOGISTIK	29
2.1 DEFINITION UND EINGRENZUNG „ENGINEERING“ UND „ENGINEERING IN DER TECHNISCHEN LOGISTIK“	29
2.1.1 <i>Der Begriff „Engineering“ in der maschinenbaulichen Literatur</i>	29
2.1.2 <i>Der Engineering-Gestaltungsprozess in der Technischen Logistik</i>	35
2.1.2.1 <i>Tätigkeiten</i>	35
2.1.2.2 <i>Einordnung und Abgrenzung</i>	39
2.2 GRUNDLAGEN „ENGINEERING“	42
2.2.1 <i>(Technisches) System</i>	42
2.2.2 <i>Logistik</i>	45
2.2.3 <i>Technische Logistik</i>	47
2.2.3.1 <i>Materialflusssystem</i>	52
2.2.3.2 <i>Materialflusstechnik</i>	55
2.2.3.3 <i>Systematik materialflusstechnischer Gewerke</i>	56
2.2.3.4 <i>Einige Engineeringaufgaben in der Materialflusstechnik*</i>	61
2.2.3.5 <i>Von der Wissenschaftsdisziplin „Logistik“</i>	61
2.2.4 <i>Modell und Modellbildung*</i>	63
2.2.5 <i>Simulation und Simulationsmodell*</i>	63
2.2.6 <i>CAX*</i>	66
2.2.6.1 <i>CAD</i>	67
2.2.6.2 <i>CAE</i>	68
2.2.7 <i>Grundlagen zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit FEM*</i>	68
2.2.8 <i>Grundlagen, Wirkprinzipien und Submodelle zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit MKS (inkl. DEM)*</i> ...	68
2.2.9 <i>Aspekte der Arbeit mit FEM und MKS-Simulationsmodellen*</i> ...	70
2.2.10 <i>Arten der Produktentwicklung*</i>	72
2.2.10.1 <i>Produktentwicklung</i>	72
2.2.10.2 <i>Virtuelle Produktentwicklung</i>	73
2.2.10.3 <i>Integrierte Produktentwicklung</i>	75
2.2.11 <i>Aspekte der Konstruktion*</i>	75
2.2.11.1 <i>Methodisches Konstruieren – Ziele und Methoden</i>	76

2.2.11.2	Differenzierung der Konstruktion nach ihrem Einsatz - Konstruktionsarten.....	79
2.2.11.3	Rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen	82
2.2.11.4	Design for X (DFX)	82
2.2.12	<i>Wissen und dessen Handhabung*</i>	83
2.2.12.1	Wissen.....	84
2.2.12.2	Wissensmanagement und Werkzeuge der Wissensrepräsentation 85	
2.2.13	<i>KBE und KBx*</i>	90
2.2.13.1	Für und wider den Einsatz von KBE.....	90
2.2.13.2	KBE: Überblick, Ansätze und Entwicklungsziele	91
2.2.13.3	Erweiterung auf KBx.....	94
2.2.14	<i>Erstellung und Visualisierung von Beziehungen in (automatisierten) Konstruktionen*</i>	97
2.2.14.1	Gleichteile und Variantenanalyse-app	97
2.2.14.2	Arbeitsumgebung für KBx – die xKBE-app	98
2.3	ANALYSE „ENGINEERING IN DER TECHNISCHEN LOGISTIK“	100
3	METHODIKEN UND METHODEN FÜR DAS ENGINEERING IN DER TECHNISCHEN LOGISTIK	107
3.1	ALLGEMEINES ZU METHODEN	108
3.1.1	<i>Begriffe und Methodenarten</i>	108
3.1.2	<i>Methodeneinsatz und –auswahl und deren Nutzen</i>	110
3.2	EIN BEITRAG ZUR SCHLIEßUNG DER IDENTIFIZIERTEN LÜCKE AUTOMOTIVE/AEROSPACE – TECHNISCHE LOGISTIK DURCH 10 METHODEN	114
3.3	ZUR GÜLTIGKEIT UND AKTUALITÄT DER IDENTIFIZIERTEN METHODEN: DAS METHODENFACTSHEET UND DAS TECHNISCH-LOGISTISCHE METHODENEINORDNUNGSMODELL	121
3.4	METHODIKEN DIE DIE KONSTRUKTION UNTERSTÜTZEN	128
3.4.1	<i>MeK1: simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik</i>	128
3.4.2	<i>MeK2: methodisches Entwickeln</i>	137
3.4.3	<i>MeK3: rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen</i>	145
3.4.4	<i>MeK4: Methodikeinsatz im CAD</i>	153
3.4.5	<i>MeK5: KBx</i>	162
3.5	METHODIKEN UND METHODEN DIE DIE BERECHNUNG UND SIMULATION UNTERSTÜTZEN	170
3.5.1	<i>MeB1: Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik – CAE</i>	170
3.5.2	<i>MeB2: Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und - gültigkeiten durch CAE</i>	177
3.5.3	<i>MeB3: template-driven Simulationslösungen</i>	184
3.6	METHODIKEN FÜR DEN UMGANG MIT WISSEN	189
3.6.1	<i>MeW1: Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess..</i>	189
3.6.2	<i>MeW2: Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen – xKBE-app</i>	197

4	DREI SYNOPTISCHE BEISPIELE FÜR DEN METHODENEINSATZ.....	204
4.1	BEISPIEL LADEHILFSMITTEL	205
4.1.1	<i>Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....</i>	205
4.1.2	<i>Konstruktion und Optimierung eines modularen Ladehilfsmittel – MODULUSHCA-Box.....</i>	206
4.1.2.1	Simultaneous engineering MeK1.....	206
4.1.2.2	Konstruktion – methodisches Entwickeln MeK2 und MeK3.....	209
4.1.2.3	Technische Berechnung zur Bewertung der Konstruktion MeB1: 217	
4.1.3	<i>Nutzen des Methodeneinsatzes</i>	218
4.2	BEISPIEL STETIGFÖRDERER (ROLLENFÖRDERER)	220
4.2.1	<i>Prinzipielle Gestaltung und Konstruktion</i>	220
4.2.1.1	Einordnung - Taxonomien:	220
4.2.1.2	Stand der Forschung:.....	221
4.2.1.3	Prinzipielle Lösungssynthese und automatische Konstruktion..	223
4.2.2	<i>Konstruktionswissen um den Rollenförderer.....</i>	225
4.2.3	<i>MKS des Bewegungsverhaltens eines Ladehilfsmittels - CAE..</i>	231
4.2.4	<i>Nutzen des Methodeneinsatzes</i>	234
4.3	BEISPIEL SORTERTECHNIK.....	236
4.3.1	<i>Konstruktion.....</i>	237
4.3.2	<i>KBx mit KBSD und KBL:</i>	240
4.3.3	<i>CAE</i>	245
4.3.3.1	Varianten von Transportgütern.....	245
4.3.3.2	Fahrverhalten von Kippschalensortern:	246
4.3.3.3	Zufördern und Einschleusen auf Sorter	249
4.3.3.4	Ausschleusen von Förderern	254
4.3.4	<i>Nutzen des Methodeneinsatzes</i>	258
5	ERREICHTE ZIELE UND WIRKUNG MIT DEN ANSÄTZEN UND METHODEN DER DREI THEMENKREISE – ZUSAMMENSCHAU	260
5.1	WIRKUNG UND ZIELERREICHUNG IN DEN THEMENKREISEN.....	261
5.1.1	<i>TK 1 – konstruieren.....</i>	261
5.1.2	<i>TK 2 – berechnen</i>	262
5.1.3	<i>TK 3 – wissen</i>	263
5.2	DIE METHODEN IM PEP – ZUSAMMENSCHAU.....	264
5.2.1	<i>Positionierung sowie Vernetzung und Abhängigkeit der Methoden.....</i>	264
5.2.2	<i>Wirkung der Methoden – dargestellt im Methodeneinordnungsmodell.....</i>	266
5.2.2.1	TK 1 – konstruieren	267
5.2.2.2	TK 2 – berechnen.....	272
5.2.2.3	TK 3 – wissen	274
5.3	EINSATZ DER METHODEN IN FORSCHUNG UND LEHRE.....	276
5.3.1	<i>Schlüsselpublikationen und -projekte.....</i>	277

6	LEHRANHANG	281
6.1	(TECHNISCHES) SYSTEM	283
6.2	LOGISTIK	286
6.3	TECHNISCHE LOGISTIK	289
6.3.1	<i>Materialflusssystem</i>	294
6.3.2	<i>Materialflusstechnik</i>	296
6.3.3	<i>Systematik materialflusstechnischer Gewerke</i>	297
6.3.4	<i>Einige Ingenieursaufgaben in der Materialflusstechnik [LAN09]</i> 304	
6.3.5	<i>Der Weg zur Technischen Logistik als wissenschaftliches Teilgebiet der Logistik</i>	306
6.4	MODELL UND MODELLBILDUNG	308
6.5	SIMULATION UND SIMULATIONSMODELL	313
6.5.1	<i>Technische Simulationsmodelle in der Fördertechnik und Technischen Logistik</i>	315
6.5.1.1	Trends beim Simulieren	317
6.5.1.2	Verwendung von Simulation	320
6.5.1.3	Simulationskonzepte für technische Simulationsmodelle dynamischer Untersuchungen	320
6.5.1.4	Exkurs: Simulationskonzepte – Anwendungsbeispiel Dynamik am Rundstahlkettenzug	322
6.5.1.5	Verbreitete Software für Dynamikuntersuchungen mit AS und MKS 323	
6.6	CAX	325
6.6.1	<i>CAD</i>	328
6.6.1.1	Funktionen von 3D-CAD am Beispiel ProE/Creo nach [RS12] ...	330
6.6.1.2	Modellarten und Modellierungstechnologien – Verwendung im „Engineering“	331
6.6.1.3	Konstruktionsmethoden im CAD	333
6.6.1.4	Externe CAD-Steuerung	336
6.6.1.5	Qualitätssicherung und Standardisierung im CAD-Bereich	337
6.6.1.6	Grenzen des CAD-Einsatzes nach [RS12].....	338
6.6.2	<i>CAE</i>	339
6.7	GRUNDLAGEN ZUR MODELLBILDUNG TECHNISCHER SIMULATIONSMODELLE IN DER LOGISTIK MIT FEM	340
6.7.1	<i>Die Idee der Finiten Elemente Methode</i>	340
6.7.2	<i>Anwendungsgebiete und Software-Angebot</i>	341
6.7.3	<i>Begriffe</i>	342
6.7.3.1	Processing	343
6.7.3.2	Freiheitsgrade	345
6.7.3.3	Diskretisierung	345
6.7.3.4	Idealisierung	348
6.7.3.5	Materialverhalten	350
6.7.3.6	Stationärer und transients Zustand.....	350

6.7.4	<i>Element-Beschreibung</i>	350
6.7.4.1	Balkenelement.....	351
6.7.4.2	Scheibenelement.....	352
6.7.4.3	3D-Volumenelement.....	352
6.7.4.4	Vernetzungs-Alternativen.....	353
6.7.5	<i>FEM – Theorie</i>	354
6.7.5.1	Grundlagen.....	354
6.7.5.2	Das Prinzip der virtuellen Arbeit.....	357
6.7.5.3	Einige Anmerkungen zur Finiten Elemente Methode.....	358
6.7.5.4	Wichtige Matrizen der Finiten Elemente Methode.....	359
6.7.6	<i>Numerische Integration</i>	360
6.7.6.1	Allgemein.....	361
6.7.6.2	Newton-Cotes-Quadratur.....	361
6.7.6.3	Gauß-Quadratur.....	361
6.8	GRUNDLAGEN, WIRKPRINZIPIEN UND SUBMODELLE ZUR MODELLBILDUNG TECHNISCHER SIMULATIONSMODELLE IN DER LOGISTIK MIT MKS (INKL. EXKURS ZU DEM) 363	
6.8.1	<i>Numerik</i>	366
6.8.2	<i>Reibung und 3D-Kontakte</i>	371
6.8.3	<i>Güter</i>	376
6.8.4	<i>Zugmittelgetriebe</i>	378
6.8.5	<i>Rollen, Rollkontakt und Schienenführungen</i>	383
6.8.5.1	Rad-Schiene System.....	383
6.8.5.2	Rollen und Rollenförderer.....	386
6.8.6	<i>Ein- und Ausschleusen</i>	387
6.8.7	<i>Exkurs DEM</i>	390
6.9	ASPEKTE DER ARBEIT MIT FEM UND MKS-SIMULATIONSMODELLEN 392	
6.9.1	<i>Anforderungen an Simulierende</i>	393
6.9.1.1	Qualitätsanforderungen an Ingenieure die mit Modellbildung und Simulation betraut sind.....	393
6.9.1.2	Anforderungen an das FEM bzw. MKS Systemverständnis des modellbildenden und Ingenieurs.....	394
6.9.2	<i>Analysemöglichkeiten</i>	397
6.9.2.1	Sensitivitätsanalysen.....	397
6.9.2.2	Optimierung im CAE.....	398
6.9.3	<i>Ergebnisinterpretation</i>	400
6.9.3.1	Verifikation und Validierung.....	401
6.9.3.2	Regeln zur Ergebnisinterpretation und Plausibilitätsprüfung maschinendynamischer Berechnungen nach [DS08].....	402
6.9.4	<i>Bewertung von Simulationsergebnissen - Berechnung technischer Sicherheiten</i>	404
6.10	ARTEN DER PRODUKTENTWICKLUNG..... 407	
6.10.1	<i>Produktentwicklung</i>	407
6.10.1.1	Inhaltliche Planung.....	407
6.10.1.2	Zeitliche und terminliche Planung.....	408
6.10.1.3	Kostenplanung.....	409
6.10.1.4	Strategien der Produktentwicklung nach [LIN05].....	410
6.10.1.5	Reverse Engineering nach [RS12].....	411

6.10.2	<i>Virtuelle Produktentwicklung</i>	412
6.10.2.1	Einige CAX-Prozessketten für die Technische Logistik, adaptiert nach [AND10]	416
6.10.2.2	Daten und Datenmanagement in der virtuellen Produktentwicklung	421
6.10.2.3	Strategien des virtual engineering: Simultaneous, concurrent und cross enterprise engineering	424
6.10.3	<i>Integrierte Produktentwicklung</i>	429
6.11	ASPEKTE DER KONSTRUKTION	432
6.11.1	<i>Methodisches Konstruieren – Konstruktions- und Produktentwicklungsprozesse</i>	438
6.11.1.1	Geschichte und Ziele methodischen Konstruierens.....	438
6.11.1.2	Überblick Vorgehensmodelle.....	441
6.11.1.3	Elementare Handlungsabläufe.....	443
6.11.1.4	Modelle auf der Ebene der operativen Arbeitsschritte	444
6.11.1.5	Phasen- und Arbeitsschrittmodelle.....	447
6.11.1.6	Gegenüberstellung und Bewertung der Vorgehensmodelle.....	458
6.11.1.7	Kritik an den Vorgehensmodellen.....	462
6.11.1.8	Methoden und Werkzeuge	463
6.11.1.9	IT-Tools für das methodische Konstruieren; Überblick und Praxisbeispiel „VDI-app“	466
6.11.2	<i>Differenzierung der Konstruktion</i>	471
6.11.2.1	Konstruktionsarten und ihre Vorgehenspläne.....	471
6.11.2.2	Variantenmanagement: Produktfamilien und Varianten - Produktstrukturierung	475
6.11.3	<i>Analyse, (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien</i>	481
6.11.3.1	Begriffsbestimmungen.....	482
6.11.3.2	Funktionsanalyse.....	483
6.11.3.3	Definition: (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien.....	484
6.11.3.4	Einsatzbeispiele in der Technischen Logistik.....	485
6.11.4	<i>Design for X (DFX)</i>	491
6.12	WISSEN UND DESSEN HANDHABUNG	495
6.12.1	<i>Wissen</i>	495
6.12.2	<i>Wissensmanagement und Werkzeuge der Wissensrepräsentation</i>	498
6.12.2.1	Konstruktionskataloge	502
6.12.2.2	Semantische Netze und Ontologien.....	503
6.12.2.3	DSM und weitere matrixbasierte Methoden	505
6.12.2.4	Weitere Methoden der Wissensverarbeitung	510
6.12.2.5	Komplexitätssoftware	513
6.12.3	<i>Exkurs: Wissensvisualisierung und Analyse der Komplexität am Beispiel autonomes Shuttle</i>	516

6.13	KBE UND KBx	521
6.13.1	<i>Für und wider den Einsatz des KBE</i>	525
6.13.2	<i>KBE: Überblick, Ansätze und Entwicklungsziele</i>	528
6.13.2.1	KBE-Systeme – eine Klassifizierung	528
6.13.2.2	Überblick KBE-Systeme und Methoden zur KBE-System- Entwicklung.....	531
6.13.2.3	Bewertung und Vergleich der KBE Methodiken	539
6.13.2.4	Entwicklungsziele für KBE	540
6.13.3	<i>Erweiterung auf KBx.....</i>	541
6.14	ERSTELLUNG UND VISUALISIERUNG VON BEZIEHUNGEN ZWISCHEN (KONSTRUKTIONS-)OBJEKTEN	545
6.14.1	<i>Gleichteile: Variantenanalyse</i>	545
6.14.2	<i>Arbeitsumgebungen für KBx – die xKBE-app.....</i>	548
6.14.2.1	Hauptfunktionen	549
6.14.2.2	Funktionsdetails	550
6.14.2.3	Entwicklungsplan	555
6.14.3	<i>Exkurs: Axiomatic design eines Hängeförderers zur Visualisierung von Konstruktionsbeziehungen</i>	556
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	565
7.1	ZUSAMMENFASSUNG	565
7.2	AUSBLICK	570
8	VERZEICHNISSE	571
8.1	LITERATUR	571
8.2	ABBILDUNGEN UND TABELLEN.....	603
9	ANHANG HABILITATIONSUNTERLAGEN	619
9.1	DARSTELLUNG DES FACHS „FÖRDERTECHNIK“	619

Vorwort

Dem stark zunehmenden Sendungsaufkommen von Waren unterschiedlichster Art mit ihren vielfältigen Sendungswegen bedarf es leistungsfähiger und hochintegrierter Maschinen zur physischen Bewegung der Güter. Die Disziplin der Logistik, und hier v.a. jene der Stückgutlogistik, hat dazu in den letzten Jahrzehnten ein breites Portfolio an Prozessen, Geschäftsmodellen, IT-Technologien aber eben auch Maschinentechnik für alle Arten von Bewegung mit den Gütern hervorgebracht. So kann die in der Technikgeschichte klar verortete Disziplin der Fördertechnik auf ein neues, verbreitertes und hochdynamisches Betätigungsfeld mitten in der Logistik hoffnungsvoll blicken. Allerdings wurde der Theorie und Praxis der Technikentwicklung nicht das gleiche Aufmerksamkeitsmaß beigemessen, als bspw. der IT oder den Geschäftsmodellen und –prozessen.

Der Ansatz der vorliegenden zweiteiligen Habilitationsschrift verfolgt nun das Ziel, durch Betrachtung von in der Technikentwicklung führenden Branchen, Methoden zu transferieren bzw. neu zu entwickeln und deren Wirksamkeit an Beispielen aus der Technischen Logistik darzulegen. Dem Wesen einer Habilitationsschrift gemäß ist nicht nur dem Wissenschaftlichem sondern auch dem Didaktischen großes Gewicht zudedacht – realisiert im Lehranhang, der die Arbeit unidirektional ergänzt und Produktentwicklungs-Know-how für den Fachbereich zusammenfasst. Er soll der auszugsweisen oder vollständigen Weitergabe an Studierende dienen und ist daher in der Art eines Lehrbuches (im Format der Institutsschriftenreihe) verfasst. Einige Darstellungen und Formatierungen (wie bspw. Fettdrucke in Leseabschnitten und ausladende Inhalte) mögen dem Leser in beiden Teilen ggf. „übertrieben“ vorkommen. Sie richten sich aber auch an abschnittsweise Leser, die schnell an den Inhalt heranzuführen sind bzw. nach einem derartigen Inhalt suchen. Ebenso ist einiges an Detailinformationen in Tabellenform dargestellt, um überblicksartig schnell an die Inhalte heranzuführen oder andererseits den Lesefluss nicht zu unterbrechen. Dem in der akademischen Lehre klassisch etablierten Fachbereich der Fördertechnik, die mit ihren Elementen und Maschinen seit jeher Verständnisobjekte für die Festigung von Maschinenbau-Grundlagenwissen darstellt, steht mit der Schrift und dem Lehranhang eine zeitgemäße methodisch-praktische Erweiterung hin zu einer modernen Produktentwicklung zur Seite.

Im Sinne einer effektiven Wissenswiederverwendung liegen nicht nur einzelne Publikationen als detaillierte Tiefensicht vor, sondern es wurde vielmehr angestrebt, mit den entwickelten Methoden eine Querschnittsicht über effektive Vorgehensweisen für das Fach zu erzeugen und somit einen „Überbau“ über die wissenschaftliche Fachtiefe zu schaffen. Die dazu herangezogenen 14 Schlüsselpublikationen und 6 Schlüsselprojekte aus den eigenen Erfahrungen der letzten Jahre verschmelzen somit mit der theoretischen und praktischen Betrachtung der oben erwähnten führenden Branchen. Für eine zukünftige Erweiterung der vorgestellten Methoden ist deren Identifikations- und Entwicklungsprozess ein effektives Hilfsmittel.

Die Motivation zur Arbeit entstand durch meine langjährige Tätigkeit im Fach an der Technischen Universität Graz, maßgeblich aber von der fachlichen Kompetenz und Weitsicht meines Institutsvorstandes Prof. Dirk Jodin befeuert.

Ihm gilt mein großer Dank für seine konstruktiven Anregungen, seinen umfassenden Überblick über die Branche aber auch für seine hervorragende menschliche Fähigkeit, Wissenschaftler zu führen und zu fördern. Im gleichen Atemzug möchte ich mich bei all meinen Projektpartnerinnen und -partnern bedanken, deren Möglichkeit zur Einsicht in ihre Arbeitsweisen und Herausforderungen mir die oben erwähnte Querschnittssicht überhaupt erst ermöglichte. Nicht zuletzt sei aber auch mein Kollegenkreis der Fördertechnik und Technischen Logistik bedankt, von dem ich besonders meine lieben Kollegen und oftmaligen Ko-Autoren am Institut für Technische Logistik erwähnen möchte. Ebenso konnten mir die beiden Ordinarien der Fördertechnik/Logistik-Institute in Dresden und München Prof. Thorsten Schmidt und Prof. Willibald Günthner viele gute Anregungen während meiner Forschungsaufenthalte bei Ihnen mitgeben. Meiner lieben Familie möchte ich ganz speziell danken, mir immer den nötigen Freiraum – oft und lange auch fernab von zuhause – für all meine Vertiefungen gewährt zu haben.

Der zunehmend geforderten Weiterentwicklung einer akademischen Konstruktionsausbildung, mit ihren anspruchsvollen Forderungen nach Synthese und Integration von Wissen aus unterschiedlichsten Disziplinen sowie Kreativität, möchte ich mit dem vorliegenden Werk, ebenso wie der Verwendung im konstruktionspraktischen Alltag, hiermit einen kleinen Beitrag liefern.

Christian Landschützer, Graz im Juni 2016.

14 Cogitationes enim mortalium timidae,
& incertae providentiae nostrae.

Liber Sapientiae IX, 14
Biblia Sacra, vulgatae editionis
Venetis, MDCCLVII

1 Einleitung

1.1 Netzwerke der Logistik

Logistik agiert gedanklich und faktisch primär in Netzwerken. Die Netzwerkmodelle sind sowohl **intra- als auch extralogistisch** (vgl. auch Kap. 2.2.2 und 2.2.3) als auch als Kombination betrachtbar und bestehen aus Kanten (Transportwege) und Knoten (Quellen/Senken). Sie können mit analytischen Mitteln und mit Simulationsmethoden analysiert und optimiert werden. Die Netzwerke sind ein Modell (s. auch Kap. 2.2.4) der Realität um grundlegende logistische Aufgaben zu bewerkstelligen; dazu zählen nach [JOD11] exemplarisch, ohne detaillierte Spezifizierung der einzelnen Probleme wozu auf die Fachliteratur, insbesondere [GUD05], verwiesen wird:

- Transportoptimierung
 - Klassisches Transportproblem - minimale Kosten?
 - Bottleneckproblem - minimale Fahrzeiten?
- Kürzeste Wege zwischen Knoten finden
- Rundreisen finden (Travelling Salesman Problem)
 - Suche nach Rundwegen, bei denen jeder Knoten nur einmal besucht wird (mehrere Reisende, Postbotenproblem)
- Touren planen
 - Belieferung von Kunden mit Waren aus Depots unter Berücksichtigung von Bestellmengen, Entfernungen und Transportressourcen mit einer entsprechenden Kapazität
 - Welcher Kunde mit welchem Transportmittel?
 - Welche Fahrtroute für welches Transportmittel?
- Standorte festlegen
 - Gesucht werden potenzielle Standorte für Logistikzentren mit entsprechenden Kapazitäten, Standort- und Transportkosten zur optimalen Belieferung des Kunden
- Funktionsflächen anordnen (Layoutplanung bzw. Planung)
 - Optimale Anordnung von Funktionsfläche mit quantifizierbaren Beziehungen entsprechend einer Prozesskette mit Ziel Minimierung des Transportaufwandes
- Bediensysteme/Wartesysteme auslegen
 - Die von einer Quelle erzeugten zufällig an der Systemgrenze mit gestreuten Zeiten eintreffenden Transporteinheiten werden an der Bedienstation mit ebenfalls zufällig gestreuten Bearbeitungszeiten bearbeitet. Hieraus entsteht ein Warteprozess.
- Konfliktzonen untersuchen und bewerten
 - Zusammenführung, Verteilungen und Kreuzungen verringern wegen Schaltzeiten, Reaktionszeiten sowie Dynamikverlusten die maximale Durchsatzleistung

Nach Bild 1.1 ist ersichtlich, dass die Welt als Ganzes als Netzwerk betrachtet werden kann um die o.a. Aufgaben zu erarbeiten. Die überregionalen See-/Luftgüterströme treffen in den Haupt-Umschlagpunkten an Land (Häfen) und es erfolgt eine weitere (Um)verteilung auf nationaler und internationaler Ebene an Land.

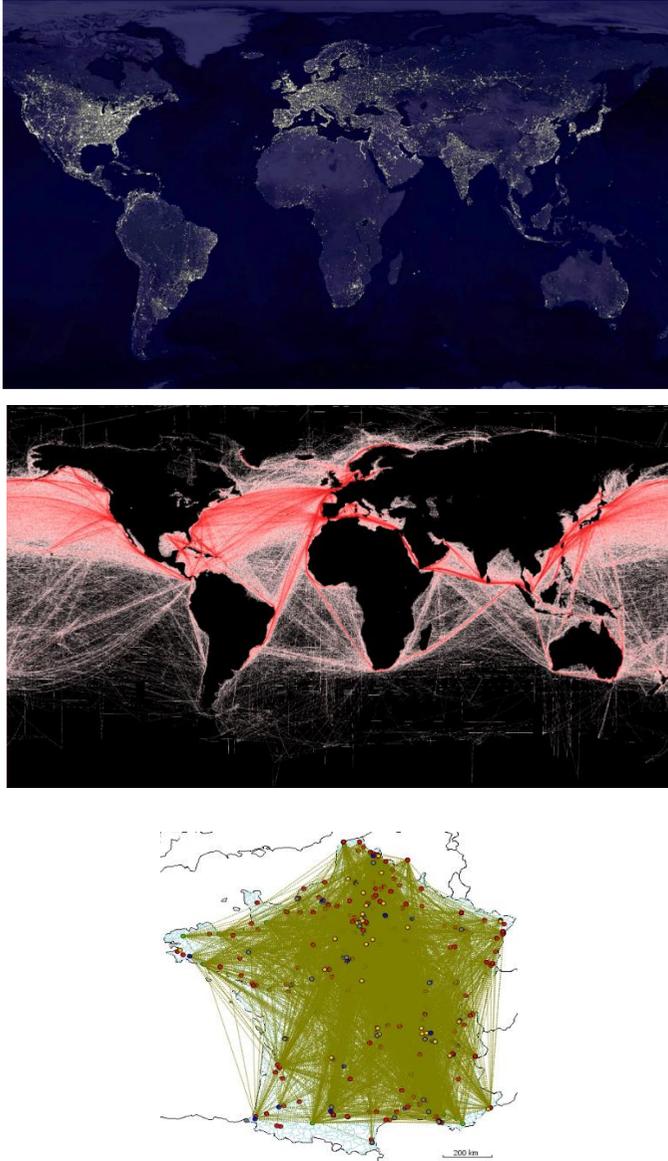


Bild 1.1: Von der Welt zum Netzwerk: global-Seeverkehr und national-Landverkehr,
Collage nach: [NAS15], [MOD13], [BAL15]

Bild 1.1 lässt am Beispiel Frankreich erkennen, dass dieses Netzwerk in seiner Gesamtheit unbeherrschbar und undarstellbar ist. Hier setzen neue integrierende Initiativen wie bspw. das **Physical Internet** an, um eine gewisse Selbstorganisation in das Netzwerk nach Vorbild des Datenverkehrs im Internet zu implementieren (s. auch Kap. 4.1).

Während die **Netzwerkanten vom Fachgebiet Extralogistik** größtenteils durch die Transport- und Verkehrslogistik bedient werden, sind **die Konten vorwiegend der Intralogistik zugeordnet**, wo Prozesse der Beschaffungslogistik, Produktionslogistik, Distributionslogistik und Entsorgungslogistik teilweise als intra-/extralogistische Kombination stattfinden (vgl. dazu die in der Literatur diversen Definitionen der Logistik in Kap. 2.2.2). Neben den organisatorischen und betrieblichen Strategien kommt der Technik bei der logistischen Aufgabenerfüllung v.a. intralogistisch eine entscheidende Rolle zu. Freilich führt nur eine allumfassende intra- und extralogistische Betrachtungsweise zum Verständnis des Ganzen, Optimierungen und Verbesserungen können und müssen aber durchaus im Detail der Knoten ansetzen.

Bild 1.2 verdeutlicht augenscheinlich, dass durch intralogistische Technik oft massive, wenn nicht sogar die umfassendsten Einsparungen bzw. Effizienzsteigerungen möglich sind. Die Hauptersparnis beim Versenden eines 45-Fuß-Containers von Le Havre nach New York (Bild 1.2) kommt durch die umfassende Verbesserung der Umschlags- und Hebeteknik in den Häfen (also den intralogistischen Knoten) zustande. Aus dem extralogistischen Bereich hat nachgeordnet noch der Seetransport Einsparungsanteil.

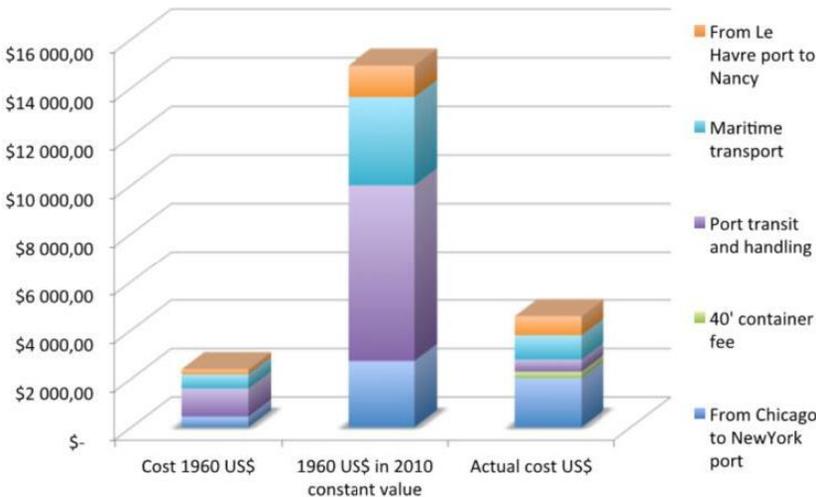


Bild 1.2: Kostenverteilung eines Secontainertransports Le Havre – New York [BAL15]

Die in den logistischen Knoten konzentrierte moderne Technik wirkt also einflussreich auf den derzeitig erreichten Effizienzgrad der Logistik und bietet Potenzial noch darüberhinaus. Drei **Wirkungen intralogistischer Technik** können ergänzend zur Erfüllung der o.a. Aufgaben angegeben werden:

- Standardisierung: Standards gehen von mechanisch-technischen Komponenten aus - wirken auf IT- u. Systemebene hinauf
- Kostenreduktion
- Leistungssteigerung

Die intralogistischen Netzwerke der Logistik sind **Technische Systeme und größtenteils Materialflusssysteme**, wenn von den Systemen abgesehen wird, die Menschen transportieren (Kap. 2.2.3.1, bspw. klassische Personenfördertechnik). Dabei handelt es sich um Lager- und Transportsysteme, Sortier- und Verteilsysteme, Kommissioniersysteme.

1.2 Herausforderungen für die Logistik

1.2.1 Megatrends

„Die Bedeutung der Logistik als Wirtschaftsfaktor wächst. Ihre Wahrnehmung in der Gesellschaft ist stark gestiegen, und ihr Einfluss auf strategische Unternehmensentscheidungen ist ungebrochen. Übergeordnete gesamtwirtschaftliche und gesellschaftliche Trends nehmen deshalb ungebremsst Einfluss auf die Entwicklung der Logistik.“ [SP08]

[KGZ12] mit [GH07] als Originalquelle und [SP08] sowie zahlreiche weitere Forscher betrachten Megatrends als nicht nur gesellschaftlich-umfassend wichtig sondern auch für die Logistik als äußerst erachtenswert.

Nach [ZPU15] sind „Megatrends langfristige und übergreifende Transformationsprozesse. Sie sind wirkungsmächtige Einflussgrößen, welche die Märkte der Zukunft prägen.“ Erstmals wurden Megatrends von Naisbitt in [NAI82] formuliert. Aktuelle Megatrends sind nach [ZPU15], nähere Spezifizierung s. ebendort:

- | | |
|--|---|
| 1 Demografischer Wandel | 10 Konvergenz von Technologien |
| 2 Neue Stufe der Individualisierung | 11 Globalisierung 2.0 |
| 3 Soziale und kulturelle Disparitäten | 12 Wissensbasierte Ökonomie |
| 4 Umgestaltung der Gesundheitssysteme | 13 Business Ökosysteme |
| 5 Wandel der Geschlechterrollen | <i>14 Wandel der Arbeitswelt</i> |
| 6 Neue Mobilitätsmuster | <i>15 Neue Konsummuster</i> |
| 7 Digitale Kultur | 16 Umbrüche bei Energie und Ressourcen |
| 8 Lernen von der Natur | 17 Klimawandel und Umweltbelastung |
| 9 Ubiquitäre Intelligenz | 18 Urbanisierung |
| | 19 Neue politische Weltordnung |
| | 20 Globale Risikogesellschaft |

Megatrends unterscheiden sich von anderen Trends nach [ZPU15] in dreierlei Hinsicht:

- **„ZEITHORIZONT:**
Megatrends sind über einen Zeitraum von Jahrzehnten beobachtbar. Für die Gegenwart existieren bereits quantitative, empirisch eindeutige Indikatoren. Sie können mit hoher Wahrscheinlichkeit noch über mindestens 15 Jahre in die Zukunft projiziert werden.
- **REICHWEITE:**
Megatrends wirken umfassend. Ihr Geltungsbereich erstreckt sich auf alle Weltregionen und alle Akteure – Regierungen, Individuen und ihr Konsumverhalten, aber auch auf Unternehmen und ihre Strategien.
- **WIRKUNGSSTÄRKE:**
Megatrends bewirken tiefgreifende, mehrdimensionale Umwälzungen aller gesellschaftlichen Teilsysteme – politisch, sozial und wirtschaftlich. Ihre spezifischen Ausprägungen unterscheiden sich von Region zu Region.

Megatrends sind als stabile Treiber des globalen Wandels häufig Startpunkt strategischer Zukunftsanalysen.“

Die BVL [SP08] identifiziert für die Logistik im Jahre 2008 die folgenden Megatrends, die nicht unbedingt deckungsgleich mit jenen nach [ZPU15] sind. Bild 1.3 zeigt die globale Wirkung der Megatrends mit einer Prognose für das Jahr 2015 aus Sicht von 2008:

- Globalisierung
- Sicherheit und Risiko
- Umwelt- und Ressourcenschutz
- Technologieinnovation
- Soziale Verantwortung
- Demografische Entwicklung
- Regulierung und Compliance

Für die Logistik spezifiziert [KGZ12] Megatrends, die in der obigen 20-Punkte-Aufzählung fett dargestellt sind. Ergänzend dazu ist aus Sicht des Autors noch „neue Konsummuster“ zu nennen, die mit dem e-commerce und den Multichannel-Vertriebskanälen die Logistik zusätzlich fordern. Die neuen Mobilitätsmuster beeinflussen die Verkehrstechnik und damit die extralogistische Verkehrslogistik und sind hier nicht Betrachtungsobjekt. Mit dem demografischen Wandel geht nicht nur das Konsumverhalten, sondern auch teilweise der Wandel der Arbeitswelt einher, der ebenso in der Logistik zu beobachten ist.

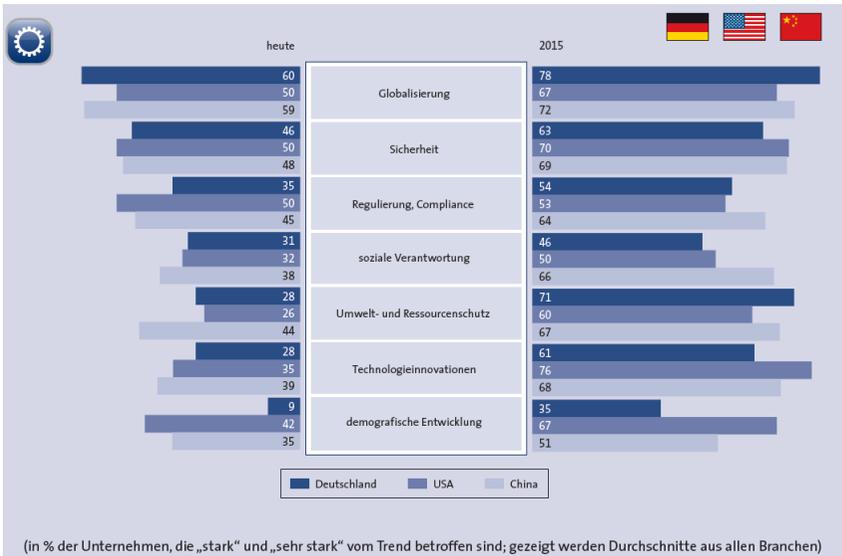


Bild 1.3: Beeinflussung der Logistik durch Megatrends im internationalen Vergleich [SP08]

[AC12] sieht im Umfeld „Menschen und Güter bewegen“ auch die Megatrends für die Logistik wirksam und benennt sie als Trends und Treiber. Daraus werden Forschungs- und Entwicklungslinien für die Logistik und zukünftige Herausforderungen formuliert; dies folgt mit Kap. 1.2.2:

- Globalisierung, Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit
- Klimaschutz und Ressourcenknappheit
- Gesellschaftlicher Wandel (in Deutschland):
Lebenswandel, demografische Entwicklung und Urbanisierung
- Technischer Wandel oder der Wandel zur Internet-Gesellschaft

1.2.2 Trends für die Logistik

Vor dem Formulieren von Trends ist die Betrachtung der historischen Entwicklung der Logistik hilfreich. Einen guten Überblick geben [GH07], [GDR08]. Bild 1.4 zeigt eine chronologische Zusammenschau und Positionierung intralogistischer Entwicklung mit den Stadien industrieller Entwicklung.

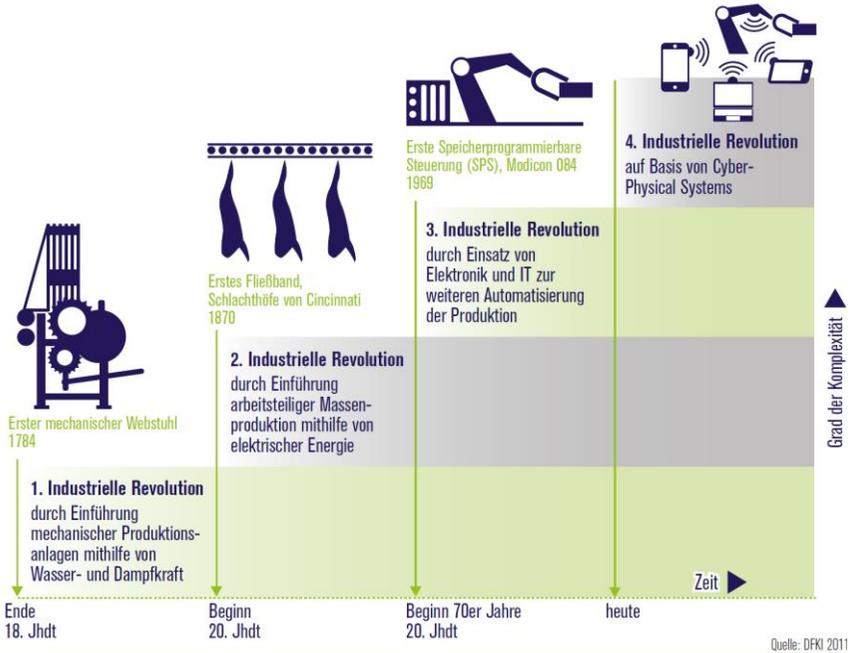
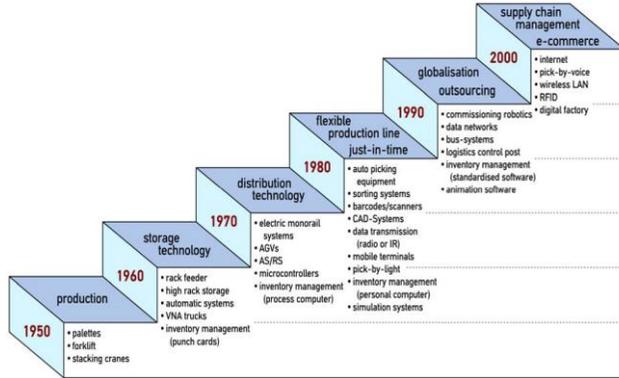


Bild 1.4: Entwicklung der Intralogistik nach [KGZ12] – Zusammenschau mit den vier großen industriellen Revolutionen nach [IND13]

Eine Zusammenschau der u.a. Literaturquellen liefert einen guten Einblick über die Trends und Bedarfe allgemeiner und technischer Art in der Logistik:

Zukünftige Herausforderungen für die Gestaltung von Systemen der Logistik und Mobilität – **allgemeine Trends und Herausforderungen:**

- [AC12]:
 - Auflösen des Widerspruchs zwischen Individualität, Effizienz und Nachhaltigkeit
 - Bereitstellen eines individuellen Zugangs zu Logistik- und Mobilitätssystemen – allerdings unter verschärften Rahmenbedingungen bezüglich Energieeffizienz und Klimaschutz
 - Beherrschung erhöhter Komplexität und Vernetzung auf allen Ebenen der Planung und des Betriebs von Systemen der Logistik und der Mobilität
 - Umgang mit Störungen und Steigerung der Zuverlässigkeit störungsbehafteter Verkehrs- und Logistiksysteme
 - Umgang mit Dynamik und Unsicherheit in der Gestaltung und Planung von Logistik- und Mobilitätssystemen
- [KGZ12]
 - Ungeordnet: Green logistics, ubiquitäre Intelligenz, Internet der Dinge (mit selbstorganisierten Transporteinheiten, Handling-Module und Software)
- [BTD08]
 - In fallender Wichtigkeit: Outsourcing, demografischer Wandel, lokales Produzieren, service-orientierte Architektur, transparente Intralogistik, Nachhaltigkeit, netzwerken, Globalisierung.

Forschungs- und Entwicklungslinien für Mobilität und Logistik – **technische Trends und Herausforderungen:**

- [AC12]:
 - Individualisierung: Effizienz durch die Nutzung von Synergiepotenzialen, aber auch integrierte Ansätze zur Begrenzung.
 - autonome Systeme: Wachsende Vernetzung und Komplexität erfordern zunehmend autonome Systeme.
 - Wandlungsfähigkeit: Infrastrukturen und Systeme werden so flexibel wie die Bedürfnisse ihrer Nutzer.
- [KGZ12]
 - Ungeordnet: Leichtbau, höhere Verfah- und Hubgeschwindigkeiten, Energieeffizienz, Modularisierung, Dezentralisierung, zellulare Fördertechnik, Mensch-Maschine-Interface.
- [BTD08]
 - In fallender Wichtigkeit: Bionik, dezentralisierte Materialflusssysteme, Automatisierung, Identifikationstechnik mit RFID, robuste Logistiksysteme, Energieeffizienz, Flexibilisierung.

Einen zusammenfassenden Überblick geben auch die, obwohl unabhängig von den oberen Quellen entwickelten und doch weitgehend deckungsgleichen – was für die Richtigkeit der Aussagen spricht –, folgenden Bilder Bild 1.5 und Bild 1.6. Die Einordnung der Trends gibt einen guten Einblick über deren Wichtigkeit und Umfeld-Positionierung.

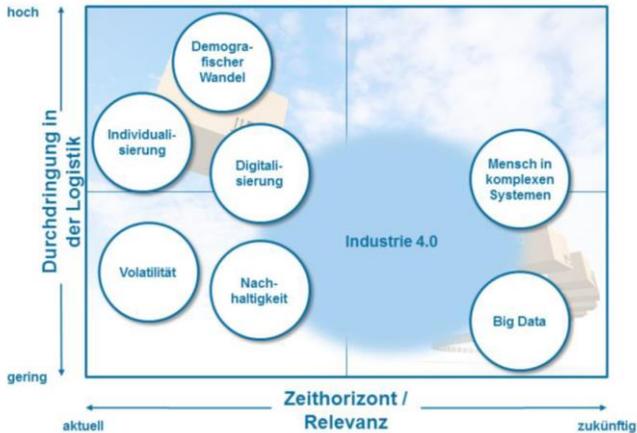


Bild 1.5: Innovationsfelder für die Logistik [GÜN15]

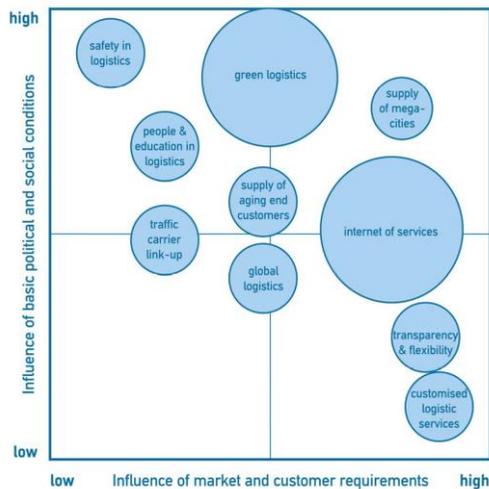


Bild 1.6: Zukünftige (informations)technische/technologische – Herausforderungen für die Intralogistik [KGZ12]

Die Bedeutung der Weiterentwicklung nicht nur der Geräte und Systeme sondern auch der **Wissenschaftlichkeit der Technischen Logistik** fasst Günthner in [ARN06] wie folgt zusammen:

„Neben den steigenden Leistungsanforderungen an die Logistik insgesamt werden zukünftig auch wesentlich höhere Anforderungen an die Entwicklung der Intralogistik-Systemtechnik gestellt. Aufgrund der hohen Komplexität und der hohen Anforderungen an Technologie- und Einsatzwissen können Potenziale zur Verbesserung der logistischen Prozesse heute vielfach nur noch durch eine wissenschaftliche Vorgehensweise erschlossen werden. Für die überwiegend klein und mittelständisch strukturierte Branche der Intralogistik ist daher sehr wichtig, an neuen wissenschaftlichen Entwicklungen partizipieren zu können. Universitäre Forschung ist ein wichtiger Schlüssel, um gerade auch kleinen und mittleren Unternehmen Zugriff auf wissenschaftliche Methoden und Vorgehensweisen zu ermöglichen. Von der öffentlichen Hand geforderte Forschung kann dabei als Multiplikator wirken. So können Technologien für die Intralogistik nutzbar gemacht werden und die Verbreitung des gewonnenen Wissens durch die Beteiligung kleiner und mittlerer Unternehmen sichergestellt werden. Als neutrale wissenschaftliche Stelle bieten die Hochschulen zudem den Vorteil, Standardisierungen unabhängig von finanziellen Interessen vorantreiben zu können.“

Der Einsatz moderner Engineering-Werkzeuge und -Methoden, der aufgrund der o.a. Struktur der Branche eher an den Universitäten als in den klein und mittelständisch Betrieben zu finden ist, trägt zur erhöhten Wissenschaftlichkeit bei. „Alle diese (Anm.: o.a.) Themengebiete haben gemeinsam, dass ihre Realisierung erst durch den Einsatz von Hochtechnologie ermöglicht wird. Nicht übersehen werden sollte jedoch auch das Potenzial, das in der konsequenten Weiterentwicklung bestehender Technologien liegt. Durch den Einsatz immer leistungsstarker werdender Methoden, wie zum Beispiel FEM (Finite Elemente Methode) oder MKS (Mehrkörpersimulation), wird die Leistung bekannter Geräte beständig gesteigert.“ [ARN06]

In Überleitung zu Ziel und Motivation dieser Arbeit kann auch noch Quelle [GW11] erwähnt werden, die ein Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin einfordert.

Als **Motivation für den notwendigen Fortschritt in der Intralogistik** kann abschließend auch noch die Größe und wirtschaftliche Wichtigkeit der Branche, neben aller organisatorischen Notwendigkeit herangezogen werden (Bild 1.7).

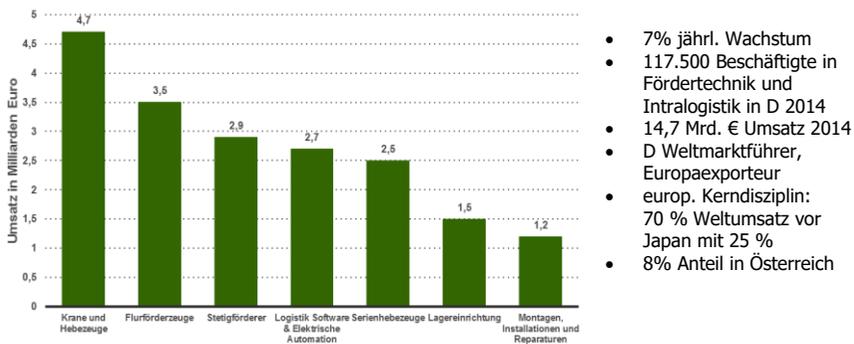


Bild 1.7: Umsatz der deutschen Fördertechnik- und Intralogistikbranche im Jahr 2014 [STA14]

1.3 Ziele der Arbeit

Die Logistik ist als Disziplin eine stark integrierende. Die Konzentration von Wissen unterschiedlichster Fachbereiche führt zur Erfüllung der logistischen Grundaufgaben (Kap. 2.2.2). Dies gilt für die Logistik ebenso, wie für ihre technischen Belange und das Engineering in der Logistik (Definitionen vgl. Kap. 2.2.3). Aufgrund der Interdisziplinarität des Faches an sich liegt der Schritt nahe, Erkenntnisse logistikintegrierter und –verwandter Fachbereiche nicht nur zu integrieren sondern auch Methoden, best practice und Wissen aus verwandten und führenden Fachbereichen zu transferieren.

Daraus folgt als Hauptziel der **Hauptansatz** der vorliegenden Arbeit, innovative und erfolgreiche Produktentwicklungsansätze führender Branchen¹ (hier automotive und aerospace) auf ihre Verwendbarkeit in der Logistik zu untersuchen, um sie adaptiert in der Logistik einzusetzen oder weiter- bzw. neu zu entwickeln. In einem wiederholbaren zweiteiligen Prozess (P-A und AW-M; Kap. 2.3ff mit Übersicht in Bild 2.36) werden Prämissen für das Engineering der Technischen Logistik identifiziert und mit Fakten führender Branchen, Theorie und Literatur verglichen. Aus den Abweichungen entsteht eine Forschungslücke des Fachbereichs², die durch die entwickelten Methoden (Kap. 3) geschlossen und anhand deren erfolgreichen Einsatzes gerechtfertigt wird. Mit der standardisierten Aufbereitung der Methoden (im Methoden-Factsheet und Methodeneinordnungsmodell, Kap. 3.3) und deren Zuordnung zu bekannten Produktentwicklungsprozessen (Übersicht mit Bild 3.6) wird wiederverwendbarer Nutzen für Engineering-Tätigkeiten in der Logistik gewonnen.

¹ Über die Führerschaft der Bereiche automotive und aerospace ist kritisch nachzudenken. Ob deren Einsatz modernster Entwicklungswerkzeuge (softwaretechnische und klassische Entwicklungsmethoden) getrieben durch den Konkurrenz- und Leistungsdruck ist, oder ob sie nur die ersten sind, die unabhängig davon entwickelte, u.a. auch durch den Fortschritt v.a. in der Berechnungstechnik entstandene, Werkzeuge einsetzen wird hier nicht weiter kritisch hinterfragt. Sondern es wird als Prämisse angenommen, dass die beiden Branchen die Entwicklung moderner Werkzeuge durch ihre hohen Anforderungen treiben und sie somit Trendsetter für deren Entwicklung sind.

Für die Gültigkeit der Vorgehensweise hat dies keinen Einfluss, da die Prämissen beliebig ausgetauscht werden können. Durch die gezeigte Wirkung der auf obiger Annahme beruhender Methoden kann aber die Gültigkeit, dass automotive und aerospace Trendsetter sind, zumindest pragmatisch als bewiesen angesehen werden.

² [GÖT16] Ordet eine ebensolche Lücke im Kranentwicklungsbereich und beschreibt die Anforderungen an Engineering im Kranbau ähnlich jenen für LKWs um die Jahrtausendwende (Kundenforderungen, rasch Umsetzung, Wettbewerb). Viele späte Rücksprünge in der Konstruktion bedürfen einer Parallelisierung des Engineerings im Kranbau mit virtuellen Konzepten früh im PEP. Der beschriebene integrative Ansatz fokussiert auf Kommunikation im Team mit gemeinsamer Sprache und Change Management Toolbox. Technische Umsetzungsdetails werden nicht ausgeführt, eine Aufwandssenkung 30-50 % wird angenommen.

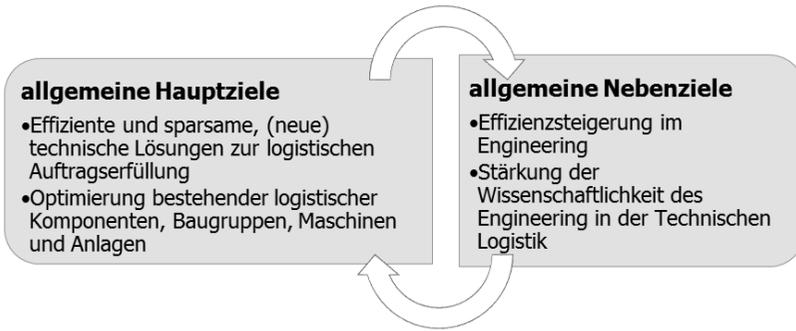


Bild 1.8: Allgemeine Haupt- und Nebenziele der Arbeit und der Logistik im Allgemeinen

Die **allgemeinen Haupt- und Nebenziele** der Arbeit (Bild 1.8) sind begründet durch die o.a. Trends denen die Logistik unterworfen ist. Sie sind insofern allgemein, als sie nicht nur durch die hier entwickelten Ansätze erreicht werden können. Die Ziele der Arbeit an sich sind somit ein Beitrag der Zielerfüllung der allgemeinen Ziele.

Die **Ziele und Zielerreichung** der Arbeit sind zusammenzuschauen mit den o.a. allgemeinen Zielen und können vierstufig mit Bild 1.9 angegeben werden:

Indem die vorliegende Arbeit als Hauptinhalt und -ziel die Methodenentwicklung und das Aufzeigen derer Wirksamkeit hat, reicht die Wirkung der Arbeit über diese Methodenentwicklung hinaus. Vielmehr sind es die allgemeinen Ziele (s.o.), die durch und mit dem Einsatz der Methoden erreicht werden können.

Die **Motivation** der Arbeit ist vielschichtig. Die Erstellung eines in den zahlreichen Lehrveranstaltungen des Institutes einsetzbaren Lehrwerkes war ebenso ausschlaggebend, wie die systematische Aufbereitung von in vielen erfolgreichen Projekten eingesetzten Vorgehensweisen zu Methoden zur weiteren wissenschaftlichen Verwendung.

Aus den Megatrends Globalisierung, Urbanisierung, Individualisierung, demografischer Wandel, Klimawandel und Umweltschutz (Kap. 1.2.1) sowie ubiquitäre Intelligenz folgen nach [KGZ12] logistische Motivationen:

- Höher, weiter, schneller
- Green logistics
- „Internet der Dinge“ und zellulare Fördermittel

Diese spielen sich nach [ARN06] vor allem in drei Themenfeldern als die großen Zukunftsthemen der Intralogistik ab. Dabei handelt es sich um die Gebiete:

- „Radio-Frequency-Identification – RFID
- Internet der Dinge und Ubiquitous Computing
- Digitale Planung und Entwicklung“

Daraus und mit den Trends nach Kap. 1.2.2 folgen mit Bild 1.8 für das Engineering in der Technischen Logistik die o.a. Ziele. Vor allem im Bereich Digitale Planung und Entwicklung sind die entwickelten Methoden neue und effektive Werkzeuge für ein modernes Engineering. Bild 1.10 fasst die Motivation und die Ziele der Arbeit nochmals abschließend grafisch zusammen.

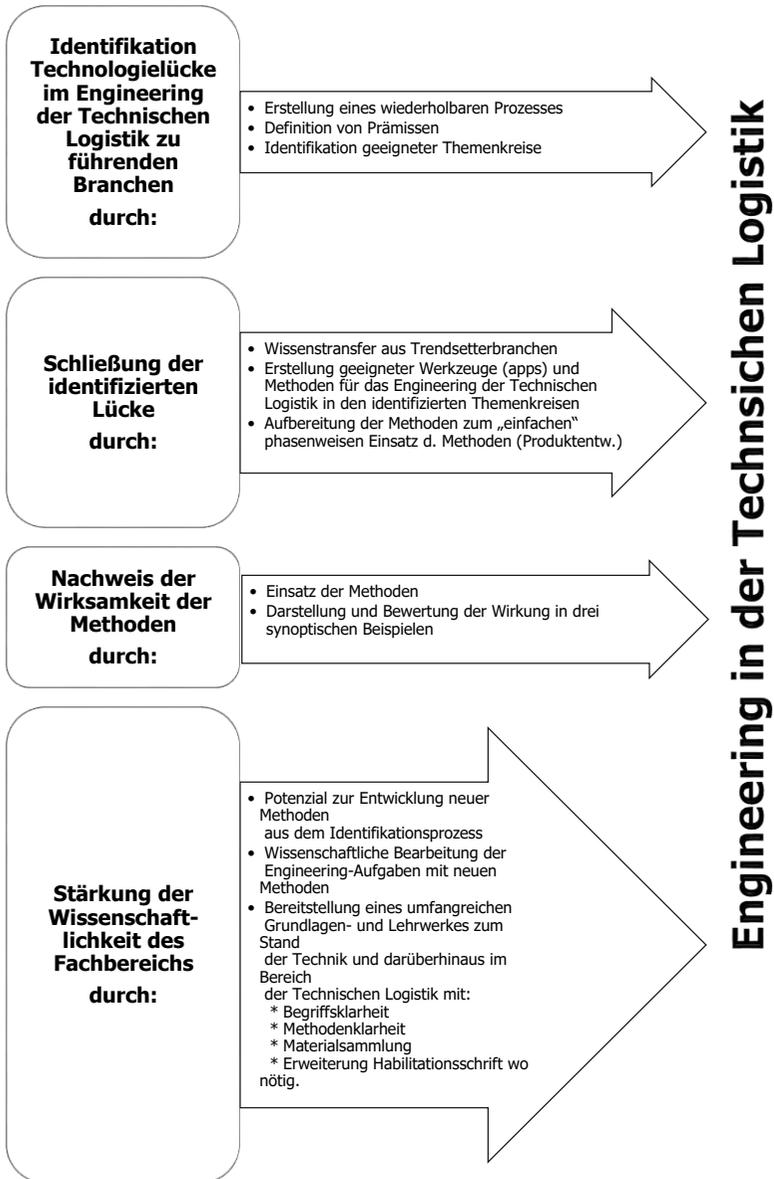


Bild 1.9: Ziele und Zielerreichung zum Engineering in der Technischen Logistik



Bild 1.10: Motivation der Arbeit

Damit sind die **Forschungsfragen der Technischen Logistik** nach Projektierung und Betrieb, Funktionsnachweis und Leistungssteigerung [JOD11] in Zukunft zumindest teilweise methodisch-wissenschaftlich beantwortbar. Die mit der Arbeit beantworteten drei Forschungsfragen und Herausforderungen liegen den entwickelten Methoden als Identifikationsprozessergebnis (Bild 3.4) zugrunde und sind hier vorausschauend angegeben³:

1. Bewältigung logistischer Herausforderungen mit optimierter Technik durch:

Geräteentwicklung mit Beherrschung von Größe, Varianz, Komplexität und "Geschwindigkeit" logistischer Systeme.

- Simulationseinsatz
 - Versuchsvirtualisierung
 - Sensitivitätsanalysen maßgeschneiderter Produkte

2. Beschleunigung der Logistik-Technik-Produktentwicklung durch:

kurze Angebotsphasen von Logistik-Technikern zwingen zu effizientem ...

- Wissens(management)einsatz
 - automatisierte Konstruktion
 - Übersicht und Beherrschung von Wissen und Abhängigkeiten in Produkten (Versionen)
- Entwicklungsmethodeneinsatz
 - neue Lösungen durch kreieren
 - Transparenz und Wiederverwendung zur Effizienzsteigerung

³ Begriffsdefinitionen dazu s. Kap. 2.2, Details zu den Forschungsfragen sind auch in den Methodenfactsheets Kap. 3.4ff. angegeben.

3. Systematisierung der Logistik-Technik-Produktentwicklung durch:

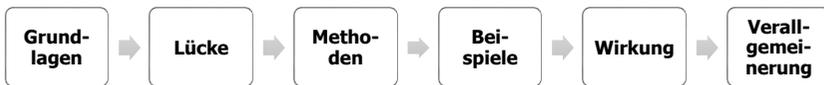
Darstellung und Sichtweise der Entwicklungsaufgaben losgelöst von klassischen Einteilungen logistischer Technik (stetig/unstetig, Stückgut/Schüttgut).

- elementbasierte Sicht für Funktionen und Funktionsdefinition
 - Einsatz von Konstruktionskatalogen und Synergien daraus
 - Funktionensynthese aus wissensbasiert verfügbaren Einzelfunktionen (über disassembling der Materialflusstechnik)
- prozessbasierte Sicht der Konstruktion
 - Orientierung an Standard-Produktentwicklungsprozessen, für Einsatz von etablierten Entwicklungsmethoden und -werkzeugen.
- querschnittsbasierte Sicht der Produkte über Produktgruppen hinweg anstelle projektzentrierter Entwicklungsaufgaben
 - Wissenswiederverwendung
 - Synergieeffekte

1.4 Struktur der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit folgt der folgenden Struktur mit der angegebenen Gliederung von Bild 1.11. Im Sinne der Lehrwertigkeit einer Habilitationsschrift ist den Grundlagen hier breiter Raum eingeräumt. Dies einerseits in den Ausführungen des Kapitels 2 aber auch mit dem unidirektionalen Verweis (Habilitationsschrift auf Lehranhang) auf den Lehranhang aus Kap. 2.2* auf Kap. 6⁴. Aufgrund des unidirektionalen Verweises kann der umfassende Lehranhang Kap. 6 Studierenden zur Erarbeitung von Fachinhalten teilweise oder ganz zum möglichen Selbststudium übergeben werden. Dies wurde in der Vergangenheit mehrfach erfolgreich für die Erstellung von Bachelor- und Diplom/Masterarbeiten durchgeführt!

Struktur:



Gliederung:

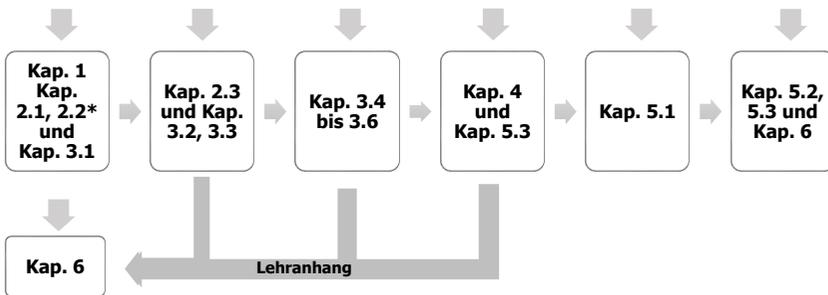


Bild 1.11: Aufbau und Gliederung der Arbeit

⁴ Mit einem Asteriskus (*) gekennzeichnete Kapitelüberschriften des Kapitels 2.2 verweisen auf ergänzendes und weiterführendes Material im Lehranhang. Zur besseren Verwendbarkeit im parallelen Gebrauch der beiden Einzelwerke folgt die Nummerung des Lehranhanges Kap. 6 jener von Kap. 2.2. So sind beispielsweise weiterführende Informationen zu Kap. 2.2.6 CAx* dem entsprechenden Kapitel 6.6 zu entnehmen. Da der Lehranhang Kap. 6 separat verwendbar ist und die Nummerung beibehalten wurde, kommt es bei einigen wenigen Kapiteln zu einer inhaltlichen Parallelisierung. Weitestgehend deckungsgleich sind somit die Kapitel 6.1, 6.2 und 6.3 mit den entsprechenden Kapiteln 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3.

2 Engineering: Stand der Technik und Zielentwicklung für die Technische Logistik⁵

2.1 Definition und Eingrenzung „Engineering“ und „Engineering in der Technischen Logistik“⁶

2.1.1 Der Begriff „Engineering“ in der maschinenbaulichen Literatur⁷

Primär lässt der Begriff „Engineering“ einen scheinbar modern aussehenden Anglizismus vermuten. Bei näherer Betrachtungsweise offenbart sich jedoch eine breit gebrauchte Fülle unterschiedlichster Bedeutungen auch im deutschsprachigen Ingenieurwesen (Engineering) bzw. Maschinenbau (Mechanical Engineering) und dessen Tätigkeiten. Folgend sind die wichtigsten Kombinationsbegriffe zum Engineering dargestellt; darüberhinaus gibt es zahlreiche weitere Begriffskombinationen wie bspw. Value-, Bio- und Quantenengineering oder das EngineeringDataManagement (EDM) auf die hier nicht eingegangen wird.

CAE als Abkürzung für **ComputerAidedEngineering** ist Teil der virtuellen Produktentwicklung und in Kap. 2.2.6.2 ausführlich dargestellt.

⁵ Ziel von Kap. 2 ist die Schaffung von begrifflicher und inhaltlicher Klarheit von Tätigkeiten, die dem Engineering zuzurechnen sind und eine Fokussierung von Engineering in der Technischen Logistik. Mit der Identifikation einer Forschungslücke zwischen dem Engineering im Allgemeinen und den Besonderheiten des Engineerings in der Technischen Logistik (Kap. 2.3 und Kap. 3.2) und deren Schließung durch die Entwicklung von speziellen Methoden in Kap. 3.4ff ergibt sich implizit eine Definition des Begriffs „Engineering“, der in der Literatur ganz unterschiedlich gebraucht wird. Einführend soll jedoch Kap. 2.1 schon explizit Klarheit schaffen, was unter „Engineering“ v.a. im Bereich des Arbeitsumfelds zu verstehen bzw. nicht zu verstehen ist.

⁶ Zur Wortwahl „Engineering“ im Titel der vorliegenden Arbeit sind die unten angegebenen Definitionen zu beachten. Beim Engineering für die Technische Logistik handelt es sich primär um eine Methoden- und Arbeitstechnikensammlung die auch zur Arbeitsorganisation zu verwenden ist; Engineering für die Technische Logistik liefert somit einen eigenständigen Beitrag im Definitionsraum des Engineerings (s. Kap. 2.1.1). Die Einteilung der entwickelten Ansätze in Auswahlempfehlungen, Handlungsempfehlungen und operative Ansätze nach Bild 3.5 ist ebenso zu beachten.

⁷ Details zu vielen Engineering-Begriffen siehe auch Kap. 2.2.10.2 und detaillierter Kap. 6.10.2.3, Kap. 6.10.1.5.

Simultaneous Engineering bedeutet nach [VDI 2209] überlapptes (paralleles) Bearbeiten von unterschiedlichen Aufgaben mit laufender Abstimmung des Fortschritts und ist eine weit verbreitete Methode der virtuellen Produktentwicklung. Bei sequenzieller Abarbeitung der Entwicklungsaufgaben spricht man vom **Serial Engineering**.

Concurrent Engineering ist nach [VDI 2209] das Aufteilen und überlappte Bearbeiten eines einzelnen Arbeitsschritts. [DOW95] untersucht die Rolle der Logistik im Concurrent Engineering aber bezieht sich nicht auf technische Details sondern v.a. auf Produktion, Packaging und Transport.

Logistics Engineering ist nach [DOW95] der logistikgerechten Produktentwicklung ähnlich [PSS05], [SCH11] und bezieht sich auf den Einfluss des Engineering Designs, also der physischen Produktgestaltung, auf die logistischen Aufgaben mit dem Produkt. Ein umfangreiches Handbuch [LOG08] fasst unter Logistics Engineering die logistischen Grundlagen und Optimierungsmethoden des Operations Research zusammen in ähnlich umfanglicher und inhaltlicher Art wie [GUD05].

Cross Enterprise Engineering ist nach [ES09] eine mehrdimensionale Zusammenarbeit in allen Entwicklungsphasen in unterschiedlichen Netzwerken auf Ebenen der Mechanik, Elektronik, Software und Dienstleistung. Es wirkt durch Parallelisierung, Verteilung und Vernetzung von Projekten, Produkten und Prozessen und beginnt bereits in sehr frühen Entwicklungsphasen. Es umspannt sowohl die Zulieferer und die Kunden als auch die verschiedensten internen und externen Produktdatenmanagement-Lösungen.

Reverse Engineering analysiert ein bestehendes System um dessen Teile, Aufbau, Strukturen, Zustände, Verhaltensweisen und Eigenschaften möglichst für die Aufgabenstellung ausreichend exakt abzubilden⁸.

Reengineering-Konzepte fokussieren auf „eine tiefgreifende Restrukturierung des gesamten Unternehmens, wobei eine weitgehende Neubestimmung der Wettbewerbsposition vorzunehmen ist. Im Mittelpunkt stehen hier nicht inkrementale Verbesserungen und Entwicklungen im Sinne einer Evolution, sondern fundamentale Neuanfänge, so dass das Konzept auch nur bei tatsächlich existenzbedrohenden Krisen sinnvoll ist.“ [BSW+09]

Um Anforderungen zu erheben, was Kunden v.a. auch in der Logistik von den Produzenten und Generalunternehmern erwarten, ist das **Requirements Engineering** bekannt. Dies geschieht in und mit unterschiedlichen Stakeholdergruppen wie bspw. nach Bild 2.1.

„Engineering und Betrieb großer Materialflusssysteme sind aufgrund der hohen Komponentenanzahl sowie der herzustellenden Schnittstellen sehr komplex. Komplexität tritt in allen Phasen der Lebensdauer logistischer Systeme auf. Die Optimierung von Kosten, Qualität und Leistung einzelner Bestandteile eines Systems wirkt sich in der Regel auf den gesamten Life Cycle aus. Vor diesem Hintergrund ist die Wirksamkeit technischer und organisatorischer Optimierungsmaßnahmen an den unterschiedlichen Anforderungen zu spiegeln, die im Lebenszyklus eines Logistiksystems auftreten.“ [BH07] Hier setzt **Modellbasiertes Requirements Engineering** an. Requirements Engineering wird bspw. in den Bereichen Baggage Handling und Warehouse Logistics

⁸ Weiterführendes s. Tabelle 2

angewandt. „Detailliert erfasstes Projekt- und Domänenwissen soll genutzt werden, um mögliche Anwendungsfelder der adressierten Technologien zu identifizieren und dabei gleichsam Ansatzpunkte für Prozessoptimierungen darzustellen.“ [BH07]

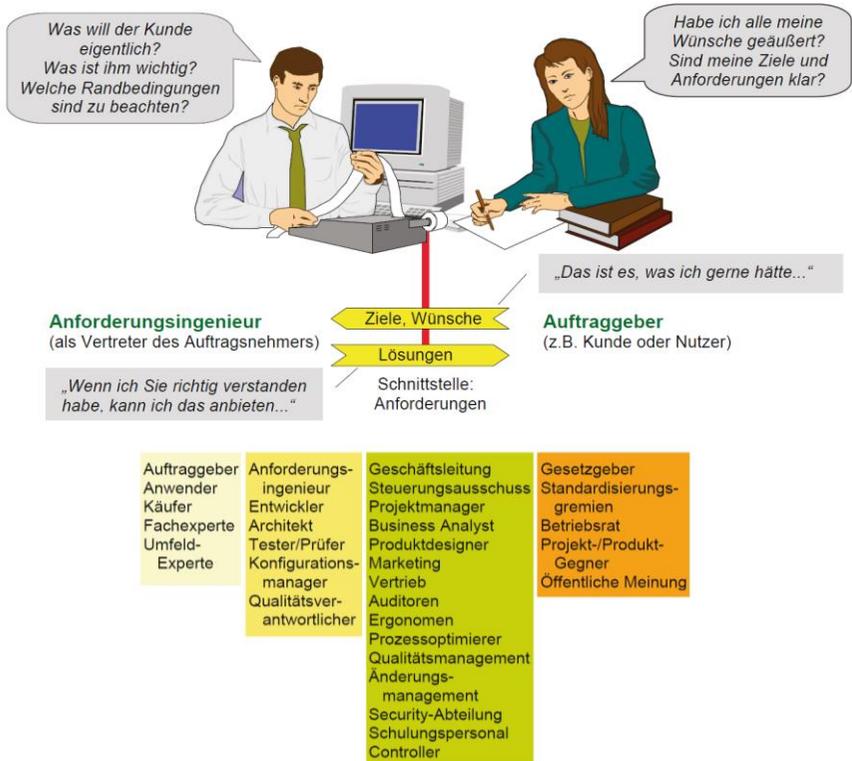


Bild 2.1: Rollenverteilung im Requirements-Engineering (oben) und Stakeholdergruppen [PAR10]

Das Ziel der Systemtechnik oder **Systems Engineering** ist die Bereitstellung interdisziplinärer Methoden und Hilfsmittel zur Analyse und Planung (Synthese) für die optimale Gestaltung komplexer technischer Gebilde. „Es ist heute nämlich einfach nicht mehr möglich, in der Ausbildung zum Konstrukteur alle bekannten Produkte in all ihren Einzelheiten zu lehren, dafür sind es zu viele. Es ist deshalb notwendig, das Schwergewicht in der Ingenieurausbildung auf das Erlernen von Arbeitsmethoden zu legen, die es ermöglichen, Analogieschlüsse zwischen verschiedenen Produkten mit ähnlichen Strukturen zu ziehen, d. h. Methodenkompetenz zu vermitteln.“ [NAE09] Systems Engineering ist nach [EM13] „besonders die Unterstützung der Anforderungsklärung, Systemarchitektur und Integration von Teilsystemen und -komponenten. Dies erfordert eine intensive Schnittstellenbetrachtung, die die Grundlage für das spätere Testen, Validieren und Verifizieren der entwickelten Teillösungen und des Gesamtsystems darstellt.“

„Mit dem erst seit rund einem Jahrzehnt eingeführten Begriff **Service Engineering** bezeichnet man die methodische Entwicklung von (neuen) Dienstleistungen. Als Bestandteil der Ingenieurwissenschaften ist das Service Engineering somit eine sehr junge Disziplin. Im europäischen Raum waren die Technikwissenschaften traditionell hauptsächlich auf die produktionsorientierte industrielle Wertschöpfung fixiert. Nur sehr vereinzelt fanden sich Dienstleistungsthemen in den Aktivitäten von Universitäten und Forschungsinstitutionen wieder – die meisten Dienstleistungen sah man entweder als nicht technisch an oder ordnete sie pauschal beim Handwerk ein, womit allzu leicht „Handarbeit“ assoziiert wurde (im Gegensatz zur „Kopfarbeit“ der Ingenieure) Dieses deutlich zu kurz greifende bisherige Denken weicht mittlerweile zurück – zugunsten einer sehr viel stärkeren Wahrnehmung und höheren Wertschätzung von Bedeutung und Potentialen moderner Dienstleistungen und eines zugehörigen Service Engineering. Dienstleistungen stellen mittlerweile gut zwei Drittel der Bruttowertschöpfung und der Beschäftigung in allen hoch entwickelten Volkswirtschaften dar Ansätze für Service Engineering finden also einen überaus fruchtbaren und ergiebigen Nährboden vor. Eine Clustering der Dienstleistungen nach vier Merkmalen hat sich ausgeprägt:

- Standardisierungsgrad
- Variantenvielfalt
- Kontaktintensität
- Kopplung an materielle Güter.“ [EM13]

Industrial Engineering bezeichnet „ein Arbeitsgebiet, in dem es um die Gestaltung, Planung und Optimierung von Leistungserstellungsprozessen im weitesten Sinne mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden geht. In der Umsetzung handelt es sich immer um Arbeitsgestaltung. Die Wurzeln des Industrial Engineering reichen zurück zur Wissenschaftlichen Betriebsführung. ... Der Begriff des Industrial Engineering hat sich seit Mitte der sechziger Jahre im deutschen Sprachraum als eigenständiger Begriff etabliert und löst damit seine ursprüngliche deutsche Vokabel „Arbeitsingenieurwesen“ ab. Bisher existiert jedoch weder im deutschen noch im englischen Sprachraum eine einheitliche Definition. Es wird wie folgt charakterisiert (Stowasser):

- Das Industrial Engineering zielt auf eine hohe Produktivität der Führungs-, Kern- und Unterstützungsprozesse des Unternehmens ab.
- Das Industrial Engineering definiert und entwickelt Sollzustände und Standards der Prozesse.
- Hierbei sorgt das Industrial Engineering für eine hohe Transparenz, um Abweichungen vom Standard erkennen und wirksame Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.
- Das Industrial Engineering verwendet hierzu geeignete Methoden und Instrumente und bedient sich arbeits-, ingenieur- und betriebswirtschaftlicher Kenntnisse und Grundlagen.

... Während die meisten Ingenieurwissenschaften auf sehr spezielle Anwendungsgebiete konzentriert sind, ist das des Industrial-Engineers breit und in nahezu jeder Branche auffindbar. ... Die Aufgabenfelder des Industrial Engineering sind: Arbeitsplanerstellung, Zeitwirtschaft, Entgeltgestaltung, Planungsvorbereitung, Materialplanung, Betriebsmittelplanung und Methodenplanung. Im Zuge der Weiterentwicklung ist das moderne Industrial Engineering verantwortlich für das Produktivitätsentwicklungssystem bestehend

aus Mensch, Material und Maschine. „Es gestaltet den Wertstrom von der Produktplanung über die Produktionsplanung/Prozessplanung bis zur Fertigungsoptimierung. Diese gehören zusammen und treiben ganzheitlich die Produktivitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Humanaspekten. Des Weiteren sorgt das Industrial Engineering für die notwendige Transparenz und liefert Daten für die strategische Planung des Managements, beispielsweise im Rahmen des Produktivitätsmanagements. ... Bei allen Anstrengungen des Industrial Engineering gilt die primäre Zielsetzung, die Produktivität zu verbessern und so die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens sicherzustellen.“ [WIK14j]

„Das Verhalten spezieller Produkte kann bezüglich der Funktion, dem Gebrauch und der Ergonomie (FMU = Functional Digital Mock-up), bezüglich Herstellung und Montage, bezüglich Service, Instandhaltung und Recycling simuliert werden. Ein hervorragendes Mittel ist auch die Mehrkörper-Simulation bei dynamisch beanspruchten (auch elastischen!) Bauteilverbänden (MKS). Mit diesem **Predictive Engineering** spart man Versuchsmuster, späte und teure Änderungen, Enttäuschungen im Betrieb. Zunehmen wird auch Computer Aided Testing CAT als Hilfsmittel bei und statt Versuchen eingesetzt. Ein Schwerpunkt wird die Möglichkeit werden, mit Optimierungsprogrammen zielangepasste Produkte zu erzeugen. Eine filmartige Virtual Reality (VR) und Digital Mock-up (DMU) wird erkennen lassen, wo noch auszumerzende Schwachpunkte liegen.“ [EM13]

Over-Engineering ist primär negativ geprägt und wird von vielen Quellen gleich definiert. Nach [TÖP07] handelt es sich um die Ausstattung von Produkten mit zu vielen kostenträchtigen technologischen Details. Parallel dazu spricht man aber auch beim unverhältnismäßigen Einsatz moderner Entwicklungswerkzeuge – v.a. im Bereich der virtuellen Produktentwicklung – vom Over-Engineering.

Oft wird sehr unkonkret „nur“ von **Engineering** ohne der obigen Zusätze gesprochen. Die folgende Definitionssammlung fasst einige Quellen dazu zusammen⁹:

- Herbert Simon schreibt in seinem Buch "The Science of the Artificial": „Science is the study of what is. **Engineering** is the creation of what is to be!“[EM13]
- „**Engineering** is the application of scientific, economic, social, and practical knowledge in order to invent, design, build, maintain, research, and improve structures, machines, devices, systems, materials, and processes. The discipline of engineering is extremely broad, and encompasses a range of more specialized fields of engineering, each with a more specific emphasis on particular areas of applied science, technology and types of application. The term Engineering is derived from the Latin ingenium, meaning "cleverness" and ingeniare, meaning "to contrive, devise". [WIK14h]

⁹ Man kann die Begriffsdefinition „Engineering“ auch an den Studienprogrammen der Fachhochschulen und Universitäten ansetzen, wenn man bedenkt, dass die maschinenbaulichen Abschlüsse und akademischen Titel des Diplom-Ingenieurs heute äquivalent sind mit dem Master of Engineering! Eine weitere Detaillierung hierzu unterbleibt.

- [BSW+09] sieht im **Engineering** v.a. die planerischen Tätigkeiten der Arbeitsorganisation als vielmehr die konkrete Ausarbeitung einzelner Aufgaben, bezeichnet aber auch die Tätigkeiten des Konstruierens und Entwickelns als „engineering“:
- Im **Engineering** (= Produktentwicklung nach [SCH06] im Umfeld der Produktion) werden die Produkte des Unternehmens mittels CAD-Systemen entwickelt. Als Ergebnis liegen Konstruktionszeichnungen und Stücklisten vor, die zumeist in einem Engineering und Product Data Management (EDM-/PDM) System verwaltet werden. Das Engineering bzw. die Produktentwicklung liefert somit die Stammdaten für die Informationssysteme der Auftragsabwicklung.
- Auch [EM13] spricht oftmals generell vom „Engineering“, ohne dessen Tätigkeiten weiter zu konkretisieren!

Es lässt sich daraus folgern, dass es sich beim Kern des Engineerings um die im deutschen klassische vorhandene Paarung Entwicklung/Konstruktion mit all ihren Methoden und Werkzeugen zur kreativen Erstellung und deren Arbeitsorganisation handelt. Bei dieser Tätigkeit werden „ausgehend von Anforderungen die geometrisch-stofflichen¹⁰ Merkmale eines technischen Produkts mit allen seinen lebenslaufbezogenen Eigenschaften bis zur Entsorgung bzw. Recycling festgelegt (**life-cycle-engineering**). Dabei handelt es sich um einen Optimierungsprozess bei zum Teil widersprüchlichen Zielsetzungen unter enger Einbeziehung von Musterbau, Versuch, Fertigung, Montage und Zulieferern.“ [EM13]

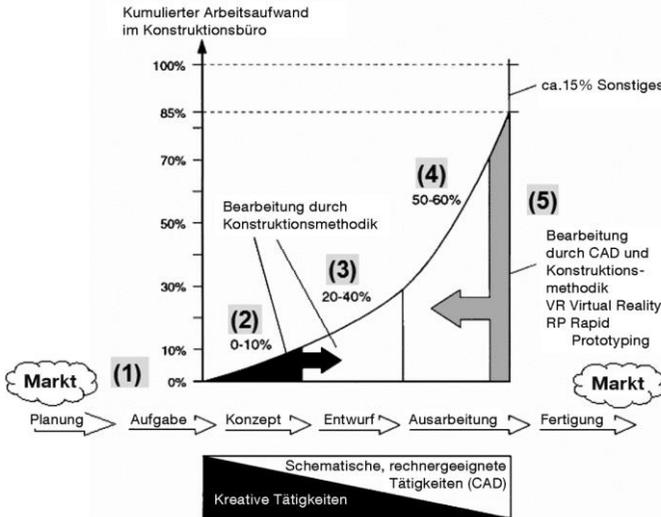


Bild 2.2: Fünf Bereiche der Produktentwicklung in denen Methoden zur Bearbeitung eines Produktes entstanden sind [EM13]

¹⁰ Zur Bedeutung des Begriffs „stofflich“ vgl. die Abstraktion entwicklerischer Tätigkeiten in die drei allgemeine Größen: Stoff, Energie, und Information zur Bestimmung ihrer zugehörigen Funktionen nach [VDI 2222] mit Details dazu in Kap. 6.11.

„Bild 2.2 soll eine Vorstellung von fünf Bereichen des **Entwickelns und Konstruierens** geben, die im Lauf der Jahrzehnte (seit Mitte des letzten Jahrhunderts) methodisch weiterentwickelt wurden. ... Die Denkweise der Entwickler reicht aber weit hinaus über die Abteilungsgrenze der Produktentwicklung zur Fertigung am rechten Bildrand.

1. Planung von neuen Problem- und Tätigkeitsfeldern für die Produktinnovation.
2. Konzeptbereich eines Produkts: Methoden zum Entwickeln von neuen, innovativen Produktprinzipien (Konstruktionsmethodik).
3. Entwurfsbereich: Eine zunächst vorläufige Gestaltung von geometrischen und stofflichen Eigenschaften eines Produkts, insbesondere wichtiger Baugruppen.
4. Ausarbeitung: Endgültige Festlegung des Produkts. Der Bereich verschmilzt mit dem Entwurfsbereich, da die computergestützten Werkzeuge keinen Unterschied zwischen grob und fein machen.
5. Methoden zur Rationalisierung der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit. Vor allem von Softwarefirmen zusammen mit Industrie und Hochschulen vorangetrieben. Da die Effizienz betriebswirtschaftlich rechenbar ist, sind Methoden, Programmsysteme und Tools in allen Unternehmen eingeführt.“ [EM13]

2.1.2 Der Engineering-Gestaltungsprozess in der Technischen Logistik

Wenn es sich nun beim Engineering um die Tätigkeiten der Entwicklung und Konstruktion mit den in Kap. 2.1.1 angegebenen Ausprägungen handelt ist folgend festzulegen, was unter dem Engineering für die Technische Logistik im speziellen zu verstehen ist.

2.1.2.1 Tätigkeiten

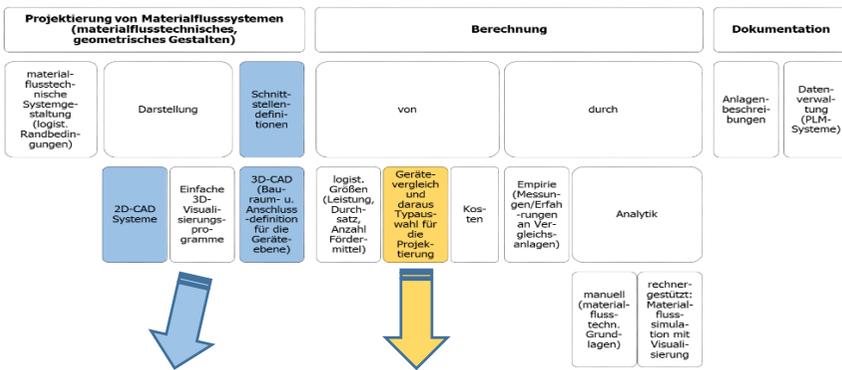
Das Engineering für die Technische Logistik „denkt“ wie alle technischen Ansätze in Systemen (s. Kap. 2.2.1). Die Vorgehensweise ist abhängig von der Größe des betrachteten Systems und es wird vor einer weiteren Untergliederung in Kap. 2.2.3 vorerst zwischen System-/Anlagen- und Geräteebene unterschieden.

Es ist mit Bild 2.3 gut ersichtlich, dass sich die Arbeitsgebiete und Tätigkeiten und nicht zwingenden (Haupt-)Entwicklungsschritten auf ganz unterschiedlichen Größenebenen bewegen. Während der Layouter bzw. Planer eines Materialflusssystemes einen Überblick am Gesamtsystem hat und dabei an Details der einzelnen Geräten weniger interessiert ist als an den logistischen Eckdaten, bewegt sich der Konstrukteur/Entwickler/Berechner¹¹ eines Fördermittels in den „letzten Mikrometern“ der Geometrie und optimiert sie mit unterschiedlichen Mitteln hin auf Betriebssicherheit und Kosteneffizienz. Die Transferpfeilrichtungen von der System- auf die Geräteebene geben den

¹¹ Die Strukturen der Unternehmen der Technischen Logistik sind nur in wenigen Fällen ähnlich umfassend wie jene in bspw. automotive und aerospace. Obwohl die Tätigkeiten unterschiedlichster Art sind, werden sie in vielen Konstruktions- und Berechnungsabteilungen von oft einigen wenigen Mitarbeitern (in Personalunion) ausgeführt.

üblichen Informationsfluss im Entwicklungsprozess des Gesamtsystems wieder. Hier kann zur Effizienzsteigerung angesetzt, wenn die Informationsflüsse so früh wie möglich stattfinden (s. dazu Kap. 3.4.1 – simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik). Der Informationstransfer von der System-/Anlagenebene zur Geräteebene ist tatsächlich aber bidirektional im Rückfluss von Gerätedaten auf das Gesamtsystem in den Kategorien Leistung und Geometrie. Dabei wird iterativ ein Prozess mehrmals durchlaufen, der in Bild 2.4 dargestellt ist. Die Entwicklungsziele sind darin eher generell spezifiziert und decken sich mit aktuellen Herausforderungen des Engineerings.

System-/Anlagenebene



Geräteebene

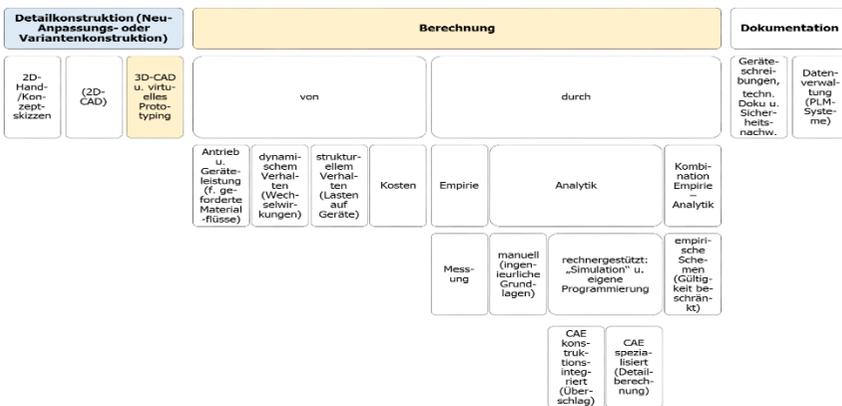


Bild 2.3: Geometrisch-stoffliche Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten auf System-/Anlagenebene und auf Geräteebene

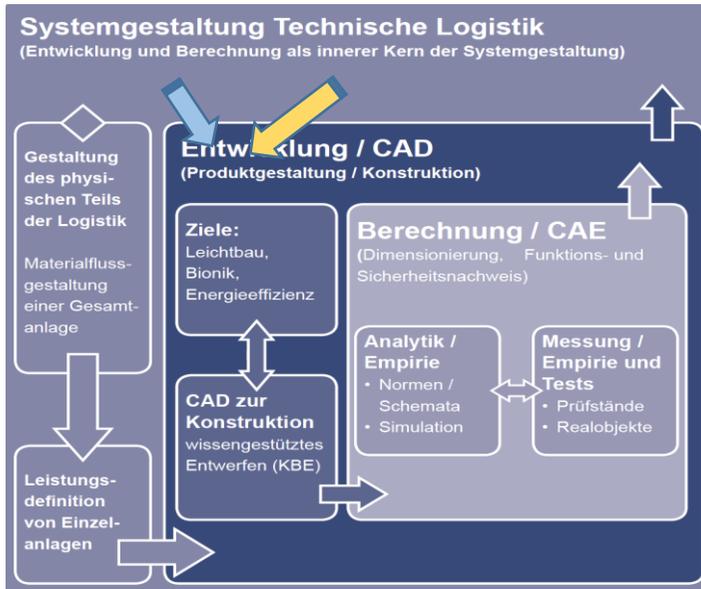


Bild 2.4: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von der System- /Anlagenebene zur Geräteebene zurück zur System- Anlagenebene [ITL14]

Die **Fachgebiete des Engineerings der Technischen Logistik** sind aufgrund der o.a. Definition und Beschränkung auf geometrisch-stoffliche Gestaltung eng an jene des allgemeinen Maschinenbaus und somit an die Ingenieurwissenschaften gebunden. Diese Tätigkeiten sind vorwiegend gestalterisch-kreativ (Konstruktion CAD) und berechnend (Berechnung CAE¹²).

¹² Anmerkung zur **Berechnungspraxis in der Förder- und Materialflusstechnik:**

Der Hauptberechnungsschwerpunkt der Fördertechnik liegt auch im PC-Zeitalter noch auf manuell „durchzurechnenden“ Schematas und Normen, deren Gültigkeit allgemein akzeptiert und anerkannt, aber teilweise auch auf Spezialfälle beschränkt ist. Gerade wegen dieser Einschränkungen ist durch den Einsatz von Simulation (im Bereich strukturellen und dynamischen Verhaltens) ein zukunftsfähiger Schritt möglich, der einerseits enge Gültigkeitsbereiche (aus den empirisch ermittelten Fakten abgeleitet) aufbrechen kann und andererseits virtuelles Prototyping in einem frühen Entwicklungsstadium ermöglicht. Da es im Fachbereich aber um durchaus sensible Bereiche der Technik geht, an deren funktionieren oft das Leben von Menschen hängt (Aufzüge, Seilbahnen,...) tendiert man nicht dazu, Bewährtes (Normen) durch Innovatives zu ersetzen (Simulation), da kein Zusatznutzen erkannt werden kann, und die Sicherheitsfrage ohnehin durch unverhältnismäßig große Sicherheitsfaktoren abgedeckt ist. Eigentlich sollte man in diesem Zusammenhang ja eher von Unsicherheitsfaktoren sprechen (z.B. im Seilbetrieb $S > 7$), da bei genauer Kenntnis von Materialverhalten und Belastungssituation ein derartig großer Faktor nicht nötig ist. Dies zeigt aber wiederum, dass eben die Kenntnis und Modellierung von Material- und Belastungsverhalten eine nur sehr vereinfacht angesetzte ist. Auch der Zusatznutzen von modernen Konstruktions- und Berechnungslösungen im Bereich virtuellen Prototypings (und damit das Nachvorverlegen von relevanten Entscheidungen im Entwicklungsprozess) ist im Fachbereich nur schwer argumentierbar, da bewährte und ausgereifte Konstruktionen schon vorhanden sind – die Fördertechnik zählt ja zu einem der ältesten Teilbereiche der Ingenieurwissenschaften – und das Änderungspotenzial schon

Darüberhinaus ist das mechanische-technische Wissen, neben jenem der logistischen, materialflusstechnischen Planung und –berechnung, weitgehend deckungsgleich mit den Inhalten der namhaften Monographien [EM13] und [RS12]. Es zeigt sich, dass nicht nur die Förder- und Materialflusstechnik sondern die gesamte Technische Logistik ein interdisziplinäres und anwendungsorientiertes Ingenieurfach ist – Details dazu in Kap. 2.2.3 – das auch noch um seine Etablierung ringt [GW11]. [WIK14i] zählt zu den Inhalten der Ingenieurwissenschaften folgendes auf, wobei die grau dargestellten Fachbereiche für das Engineering der Technischen Logistik nicht relevant in Frage kommen und kursiv dargestellte Einträge eigene Ergänzungen sind:

- **„Grundlagenfächer:**
Mathematik, Physik, Technische Mechanik *und Festigkeitslehre*, Werkstoffkunde, Thermodynamik, *Strömungslehre*, Konstruktionslehre, *Materialflusslehre*, Regelungstechnik (einschließlich Steuerungstechnik), Messtechnik, elektronische Datenverarbeitung, Elektrotechnik, technisches Zeichnen.
- **Kernfächer:**
Maschinenelemente, Maschinendynamik, *Betriebsfestigkeitslehre*, Fluidenergiemaschinen, Wärmekraftmaschinen (speziell Strömungsmaschinen und Kolbenmaschinen), Verfahrenstechnik und Apparatebau.
- **Fachrichtungen:**
Anlagenbau, Energietechnik, Fahrzeugtechnik, Fertigungstechnik, Fördertechnik, *Materialflusstechnik*, *Logistik*, Kunststofftechnik, Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenbauinformatik, Mechatronik, Schiffbau, Schiffstechnik, Schweißtechnik und Umwelttechnik“

Die o.a. Fachbereiche lassen auf das **Berufsbild des (akademischen) Konstrukteurs** schließen, der die Aufgaben des Engineerings der Technischen Logistik bewältigt. Dies ist nicht abwegig, wenn man die folgende Aussage heranzieht und den Konstrukteur größer sieht, als man ihn landläufig denkt (s.u.). Mit der u.a. Forderung des im-Auge-Behaltens des größeren Ganzen durch den Konstrukteur ist die oben angegebene Brücke zwischen materialflusstechnischer Planung auf System-/Anlagenebene hin zur Geräteebene geschaffen: „Ein guter Konstrukteur hat das Ganze im Blick und weiß, wie sein Bauteil im ganzen System wirkt und vor allem, was eine Änderung im Kleinen im Großen bewirkt.“ Mit diesem Zitat eines Industrievertreters und Mitglieds der Projektgruppe wird der Konstrukteur von morgen sehr treffend beschrieben. Konstrukteure werden auch in Zukunft Entwickler, Treiber und Gestalter neuer mechanischer und mechatronischer Produkte sein, die sich fortwährend mit neuen Materialien, Prozessen und Technologien auseinandersetzen müssen. Sie sind gleichzeitig auch Manager, die Projekte und

weit ausgeschöpft ist. Somit ist der Fachbereich hier nicht mit dem technologietreibenden Bereich der Automobilindustrie vergleichbar, wo schnelle Modellwechsel und Innovationen ein unumgänglicher Wettbewerbsvorteil sind, woraus der unumgängliche Einsatz modernster Ingenieurlösungen folgt. Einzig in einigen Randbereichen der Fördertechnik ist es schon gelungen, PC-gestützte Berechnungsmethoden einzuführen. Dazu zählen die Materialflussberechnung, die Schwingungsberechnungen an Kranen (hier wurden schon zu frühen Zeiten analytische Modelle erstellt, die erst mit dem Einsatz von PC-Methoden vernünftig lös- und visualisierbar sind) und in Randbereichen die Animation von Maschinen und Geräten, hier aber nur zur Unterstützung von Verkaufsargumenten.

Produkte selbstständig planen, steuern und kontrollieren und dabei stets auf Qualität, Kosten, aber auch Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit achten. Und sie sind kreative Menschen, die schöpferisch arbeiten.

Entscheidend für die Arbeit zukünftiger Konstrukteure ist es jedoch, stets das Ganze im Auge zu behalten. Der Konstrukteur von morgen braucht neben klassischem Konstruktions-Know-how, wie Kenntnisse zu Maschinenelementen, Funktionsgruppen, Fertigungs- und Montagetechnik, und räumlichem Vorstellungsvermögen zunehmend Kenntnisse in Informatik, Simulationstechnik, Elektrotechnik und Mechatronik. Er muss aber auch im Projektmanagement firm sein sowie ganzheitliches Denken, Kreativität, Kommunikations- und Problemlösungsfähigkeit mitbringen.“ [ACA12]

Mit dem Anspruch einer akademischen Bildung und **wissenschaftlichen Fundierung** (s. dazu auch Kap. 2.2.3) und damit Etablierung eines ingenieurwissenschaftlichen, neuen Faches stellt sich die Frage, ob die o.a. Konstrukteurstätigkeit diesem Anspruch nach Wissenschaftlichkeit genügt. „Die Akademiker sollten beim Detail-Engineering nicht stehen bleiben, sondern in das Basic-Engineering übergehen, das heißt auch Entwürfe machen. Die beruflichen Konstrukteure übernehmen eher das Detail-Engineering, also die Details einer Konstruktion: Oberflächenangaben, Passungen, Toleranzen, Werkstoffe etc. Das seien eher standardisierte Aufgaben. Der beruflich qualifizierte Konstrukteur sei eher der Ideenumsetzer, der Akademiker der Ideengeber. Das könne man so sagen. Aber die Praktiker hätten natürlich auch Ideen. Es gebe letztlich keine richtige Trennung zwischen beruflich und akademisch qualifizierten Konstrukteuren. Ein Interviewpartner sieht die Trennung in seinem Betrieb weniger zwischen Facharbeitern und Fachhochschulingenieuren, denn diese könnten auf einer Ebene zusammenarbeiten, sondern vielmehr zwischen Universitätsingenieuren und Facharbeitern, weil erstere theoretisch sehr stark ausgebildet seien, so dass die anderen da nicht mitkämen. „Konstrukteur“ ist nicht nur die Berufsbezeichnung von Akademikern, sondern auch von Facharbeitern. Die einen Befragten heben die Differenzen zwischen akademischer und beruflicher Qualifikation hervor, für die anderen ist die Trennung zwischen den Gruppen weniger ausgeprägt.“ [ACA12]

2.1.2.2 Einordnung und Abgrenzung

Wenn man den Definitionsversuch der Ingenieursaufgaben im Engineering der Technischen Logistik (Kap. 2.2.3.4) mit den o.a. Fachbereichen und Tätigkeiten zusammenschauend betrachtet, stellt sich die Konzentration auf die geometrisch-stofflichen Gestaltungsaufgaben klar dar. Nun handelt es sich bei den Geräten und Anlagen/Systemen der Technischen Logistik aber um hochgradig integrierte und automatisierte Produkte, die nicht rein geometrisch-stofflich betrachtet werden dürfen. Bild 2.5 zeigt die Verbindungen des Engineerings zu verbundenen Disziplinen, um integrierte Produkte zu entwickeln¹³.

¹³ Zu den Bereichen über das Engineering hinaus existieren Grundlagenarbeiten zur Materialfluss-Systemtechnik mit bspw. der: Identifikationstechnik, Automatisierungstechnik, Sensorik, OR-Optimierungstechnik, Transport-/Verkehrstechnik und den nötigen Informationssystemen mit bspw. [GUD05], [HS08] und [HNS07]. Die vorliegende Arbeit liefert aber einen Beitrag zur fundierten, und bisher nicht erfolgten,

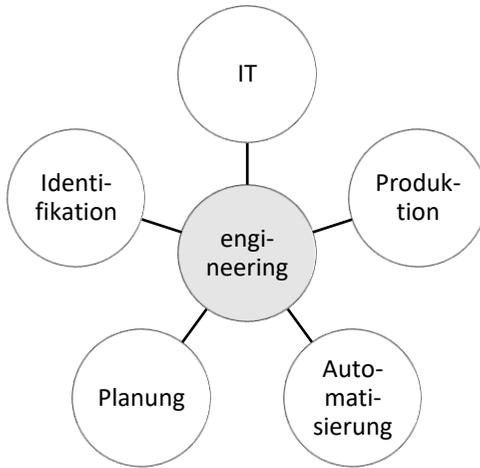


Bild 2.5: Relationen des Engineerings zu weiteren Disziplinen für integrierte Produkte

Ein **spezifisches Engineering der Technischen Logistik** als Erweiterung und Adaptierung allgemeiner maschinenbaulicher Grundlagen erscheint mehrfach gerechtfertigt. Die entwicklerische Tätigkeit in der Technischen Logistik weist folgende Merkmale auf¹⁴:

- Betrachtungsobjekte unterschiedlichster Größe (vgl. Systembegriff und Komponenten- Baugruppen- Maschinen- und Anlagendefinition in Kap. 2.2.3.1)
- Güter sind diversester Art¹⁵ (Überblick mit Bild 2.6)
- Individuelle Lösungen auf allen Größenebenen (Kein logistisches System gleicht einem anderen hinsichtlich Raum, Gut, Gut-Spektrum, Leistung)
- Hoher Innovations- und vor allem Leistungssteigerungsdruck (Kap. 1.2)

Betrachtung der konstruktiv-entwicklerischen Möglichkeiten und schließt damit eine Lücke für den integrierten Produktenwicklungsprozess.

¹⁴ Die Aufzählung greift auf die Prämissen der Methodenidentifikation in Kap. 2.3 vor.

¹⁵ Eine Gültigkeitseinschränkung der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der transportierten **Güter** ergibt sich aufgrund der allgemeinen Formulierung der entwickelten Methoden nur in einigen wenigen Bereichen. Obwohl die in Kap. 4 dargelegten Beispiele allesamt aus dem Bereich der Stückgutfördertechnik stammen, sind die Methoden von Kap. 3 auch auf die Komponenten, Baugruppen, Maschinen und Systeme der Schüttgutfördertechnik anwendbar. Details in Kap. 6.8.3



Bild 2.6: Exemplarischer Überblick über die Diversität logistischer Güter (Schüttgut, formstabiles Stückgut und folierte Ware als flexibles Stückgut) [THE15], [MAT15], [GOL15]

Im Rahmen einer integrierten Betrachtung von Produktentwicklung und Betrieb derer in der Technischen Logistik stellt sich mit dem aktuellen **Industrie 4.0** – Trend eine neue Herausforderung zu einer erweitert integrierenden Betrachtungsweise für die Technische Logistik. Wenn neben den bereits betrachteten Themenfeldern „Technik“ und „Organisation“ noch der Mensch als Forschungsthemenfeld (nach [IND13]) dazukommt, kann für einen umfassenden nachhaltig effizienten und schonenden Betrieb von Technischer Logistik ein echter Mehrwert gewonnen werden.

2.2 Grundlagen „Engineering“¹⁶

2.2.1 (Technisches) System

Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System). Die Funktion eines Systems kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Nach ihrem Verhalten werden statische und dynamische Systeme unterschieden. [GÜN14]

Technische Systeme sind künstlich erzeugte geometrisch stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen und somit Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken. Systeme können anhand ihrer Eigenschaften beschrieben werden. Eine Eigenschaft ist hierbei alles, was durch Beobachtungen, Messergebnisse, allgemein akzeptierte Aussagen usw. von einem Gegenstand festgestellt werden kann. Wichtige kennzeichnende Eigenschaften können zur besseren Hervorhebung mit dem Begriff Merkmal bezeichnet werden. Für technische Systeme fasst [DIN 2330] die Produktmerkmale in drei Hauptgruppen zusammen: Beschaffenheit, Funktion und Relationen (s.u.).

Die Erscheinungsformen von **Lösungen technischer Aufgaben** sind technische Gebilde, die nach [FEL13a] als Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder Einzelteil bezeichnet werden¹⁷. So werden auch komplexere Strukturen wahlweise als Anlagen, Maschinen oder gar Geräte bezeichnet, ohne genau zu differenzieren. Die Benennungen sind vielfach Ergebnis historischer Entwicklungen aus unterschiedlichen Einsatzbereichen; für die Technische Logistik wird ein Definitionsversuch in Kap. 2.2.3.3 eingeführt.

Nach [FEL13a] hat die bisherige Diskussion gezeigt, dass eine strenge Einteilung nach Merkmalen nicht immer möglich oder im Hinblick bereits eingeführter Begriffe nicht immer zweckmäßig ist. Hubka [[HUB84] aus [FEL13a]] schlägt die Betrachtung technischer Gebilde nach systemtechnischer Betrachtung vor. Die Verwendung dieses Begriffes hat sich mittlerweile in der Technik durchgesetzt und in fast allen Bereichen spricht man vom Technischen System, auch in der Logistik [HNS07], [BHS11] (s. auch Kap. 2.2.2f.).

¹⁶ Durch die folgenden Detaillierungen von Begriffen und v.a. Methoden des Engineerings wird die oben begonnene Definition der Bereiche und Begriffe des Engineerings ausgebreitet und es kann ein fachlicher Einblick gewonnen werden. Die Methoden von Kap. 3 bilden dann den Übergang zum spezifischen Engineering in der Technischen Logistik und dessen Detaillierung. Zugehörig dazu ist der zweistufige Definitionsprozess dieser speziellen Methoden P-A in Kap. 2.3 und AW-M in Kap. 3.2.

¹⁷ Diese Bezeichnungen werden je nach Fachgebiet unterschiedlich verwendet. Ein Beispiel dafür ist der Begriff Apparat, der sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Elektronik als Fotoapparat mehrfach verwendet wird.

Nach Hubka [[HUB84] aus [VWB+09]] müssen für die Betrachtung technischer Systeme Schlüsselfragen über ihren Zweck, ihre Wirkweise und ihren Aufbau beantwortet werden. Darüberhinaus wird untersucht, welche Zustände ein technisches System erreichen kann; dafür führt [EM13] als **Zweck dieser Betrachtungsweise** drei Argumente an:

- Das „Denken in Systemen“ erleichtert die Planung, Entwicklung und Konstruktion sowie den Bau des technischen Systems. Insbesondere ist die Einführung klarer Systemgrenzen von großer praktischer Bedeutung.
- Am gedanklichen bzw. graphisch oder mathematisch dargestellten Modell können die Eigenschaften des technischen Systems frühzeitig erkannt bzw. simuliert werden.
- Die abstrakte Modellierung ermöglicht die Reduktion der Betrachtung aufs Wesentliche.

Ein (technisches) System besteht nun (nach [EM13], [VDI 3633] und [VDI 2221]) aus:

- einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft und geordnet (Struktur) sind.
- einer Systemgrenze, die das System von der Umgebung abgrenzt.
- Beziehungen zur Umgebung durch Ein- und Ausgangsgrößen.

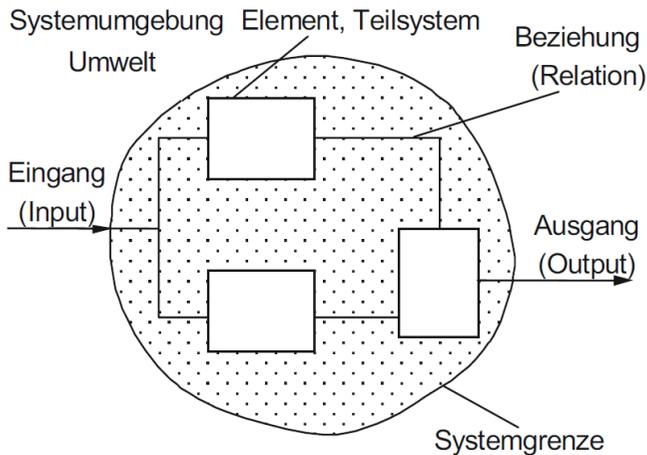


Bild 2.7: Darstellung eines Systems [EM13]

Die **Funktion eines Systems** kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Die Systemelemente können selbst wiederum Systeme sein (Subsysteme), die aus Elementen und Beziehungen bestehen. Jede Abbildung technischer Gebilde als technisches System stellt eine Modellierung dar (vgl. Kap. 2.2.4). Die o.a. Grundstruktur eines Systems ist Bild 2.7 zu entnehmen.

Durch Klassifikation unterschiedlichster Art kann man die Komplexität von Systemen zusammenfassend beherrschen (weitere Ansätze und Klassifikationen im Umgang mit Komplexität in der Entwicklungsarbeit sind Kap. 2.2.12 zu entnehmen). Nach [EM13] können die folgenden drei **Hauptmerkmale eines technischen Systems** festgehalten werden. Eigenschaften (Merkmale) von technischen Systemen haben eine Bedeutung (Semantik, Qualität) und eine eventuell zahlenmäßige Ausprägung (Quantität).

- **Beschaffenheitsmerkmale:**
sind Merkmale, die am Produkt selbst festgestellt werden können (z.B. Gestalt, Werkstoff, Farbe, Verbindungsart). Auf diese Merkmale lassen sich alle Eigenschaften (also auch die nachfolgend aufgeführten Funktions- und Relationsmerkmale) zurückführen.
- **Funktionsmerkmale:**
bezeichnen den gewollten Zweck eines Produkts, wie z.B. das zu übertragende Drehmoment oder den zu messenden Temperaturbereich.
- **Relationsmerkmale:**
sind Eigenschaften eines Produkts, die erst im Zusammenhang mit anderen Systemen (oder mit dem Menschen) von Bedeutung sind. Beispiele sind Spannungen und Verformungen aufgrund äußerer Kräfte, Geräusche, Passungen, Kosten, Bedienbarkeit oder Umweltbelastung.

Die Identifikation und der Einsatz von Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik¹⁸ greift den Systemgedanken auf und bezieht sich in drei Themenkreisen somit auf:

- Relationsmerkmale im „Umgang mit Wissen“
- Beschaffenheits- und Funktionsmerkmale in „Unterstützung der Konstruktion“ und „Berechnung und Simulation“

¹⁸ Die Betrachtung von Systemen des Materialflusses¹ und der Logistik als technisches System ermöglicht die Anwendung vieler technischer Methoden und Regelwerke, die auf diesem Ansatz basieren. Erwähnt sei dazu der große Bereich der Entwicklungsmethodik mit den energetischen, stofflichen und informationstechnischen Umsätzen in einem technischen System (s. auch Kap. 2.2.3.1 und Bild 6.105).

2.2.2 Logistik

Die Logistik kann als Wissenschaft von Planung, Steuerung und Überwachung von Material- Personen- und Informationsströmen in komplexen Systemen betrachtet werden [GW11]. Logistik ist aber auch eine Branchenbezeichnung, die von Dienstleistern verwendet wird und alle mit der Logistik befassten Unternehmen einschließt. Logistik agiert in Netzwerken und verfügt über Organisationsmechanismen die sich aus unterschiedlichen Topologien zusammensetzen. Die Strukturen der logistischen Netze sind als Graphen mit der Graphentheorie oder mit der Systemtheorie als Knoten und Kanten beschreib- und berechenbar. Die Dimensionen der Netzwerke reichen von global über national bis intern. Die Knoten können von Flughäfen über Geschäfte auch einzelne Maschinen sein, und die Kanten sind Flugrouten, Straßen und Förderstrecken. Das logistische Grundprinzip der „**sieben r**“ wirft Fragen wie Durchlaufzeitoptimierung der Objekte, Durchsatz und Kapazitätsoptimierung, Wegoptimierung und Tourenplanung auf:

- Die richtige Ware
- zur richtigen Zeit
- am richtigen Ort
- in der richtigen Menge
- in der richtigen Qualität
- zu den richtigen Kosten
- mit den richtigen Informationen.

Es existieren unterschiedliche Untergliederungen bzw. **Systematisierungen** der Logistik in Fachdisziplinen, einmal nach:

- Beschaffungslogistik
- Produktionslogistik
- Distributionslogistik
- Verkehrslogistik
- Entsorgungslogistik

aber auch mit [PFO00] nach:

- Makrologistik
- Metalogistik
- Mikrologistik
 - Krankenhauslogistik
 - Unternehmenslogistik
 - Industrielogistik
 - innerbetrieblich
 - zwischenbetrieblich
 - Handelslogistik
 - Dienstleistungslogistik
 - Militärlogistik

Die Systemfunktionen der Logistik sind nach [JÜN89] weitestgehend die Themen der zuvor erwähnten Fragestellungen („sieben r“) und können mit Kosten, Qualität, Kapazität, Sorten, Wege, Durchlaufzeiten, Bestände, Service und Termine angegeben werden.

Die Makrologistik stellt hier eine effiziente Güterversorgung sicher und kann global gesehen werden. Sie benötigt ebenso wie die anderen Bereiche eine leistungsfähige Infrastruktur, geeignete Institutionen und wirksame Gesetze [GUD05].

Die Metalogistik ist zwischen Makro- und Mikrologistik einzuordnen. Sie reicht über die Grenzen von Einzelorganisationen hinaus und beinhaltet eine Kooperation mehrerer Organisationen im Güter- und Informationsfluss. Es kann unterschiedlich kooperiert werden zwischen Unternehmen und der verladenden Wirtschaft. Der Fokus liegt hier auf einzelnen Absatzkanälen zusammenarbeitender Organisationen in makrologistischem Kontext [PFO00].

Die Mikrologistik versorgt einzelne Verbraucher kostenoptimal mit den benötigten Gütern. In der Mikrologistik ist die Unternehmenslogistik und darin die Industrielogistik eine querschnittsbildende Funktion über viele Unternehmensbereiche hinweg. Die Ausführungen zu den Methoden für die Entwicklung von Materialflusssystemen in dieser Arbeit beziehen sich nach obiger Gliederung hauptsächlich auf die innerbetriebliche Industrielogistik in Unternehmen und sind daher dem Bereich Mikrologistik zuzuordnen.

Einstufend bewertend kann abschließend aus [GUD05] zitiert werden:

„Neu an der Logistik von heute sind - abgesehen von dem Begriff - die Vielzahl der technischen Lösungsmöglichkeiten, die höheren Geschwindigkeiten, die größeren Kapazitäten sowie die zunehmende Vernetzung. Hinzu kommen die vielfältigen Handlungsmöglichkeiten, die sich aus der Steuerungstechnik, der Telekommunikation und der Informatik ergeben. Neu vor allem aber ist die Erkenntnis, dass die Verkehrsverbindungen, Lager und Umschlagzentren ein Geflecht von Netzwerken bilden, die Unternehmen, Haushalte und Konsumenten in aller Welt mit den benötigten Gütern und Waren versorgen. Diese Erkenntnis hat sich in den letzten Jahren rasch verbreitet und ist heute unter dem modernen Begriff Logistik in aller Munde. Sie ist ein Ergebnis der theoretischen Logistik. ... Die theoretische Logistik ist aus der Planung für die praktische Logistik sowie aus der Kriegswissenschaft, den Ingenieurwissenschaften und den Wirtschaftswissenschaften hervorgegangen. Sie wurde lange Zeit unter anderen Namen betrieben, wie Materialflusstechnik, Transporttheorie, Verkehrswirtschaft, Materialwirtschaft und Operations Research. Die Theoretiker der Logistik haben zunächst die historisch gewachsenen Fertigkeiten und Geschäftspraktiken studiert, Techniken und Handlungsmöglichkeiten analysiert und Lösungen für aktuelle Probleme entwickelt. ... Eine rein technische oder allein ökonomische Sicht der Logistik verstellt den Blick für das Ganze und verbaut viele Handlungsmöglichkeiten.“¹⁹

¹⁹ Das herausragende Merkmal der Branche ist laut [VDM12a] das interdisziplinäre Zusammenspiel in der Logistik. Die Betonung liegt hierin auf dem Zusammenspiel und adressiert demnach auch die oben dargelegte Nichteffizienz losgelöster Betrachtungen. In diesem Rahmen der Interdisziplinarität soll die vorliegende Arbeit einen technisch-ingenieurwissenschaftlichen Beitrag für die Entwicklung von Logistik-Technik liefern, ohne

Die Logistik unterliegt seit einigen Jahrzehnten einem sehr starken Wandel von einer reinen Beschaffungsfunktion hin zu globalen Netzwerken; Bild 2.8 fasst dies grafisch zusammen.

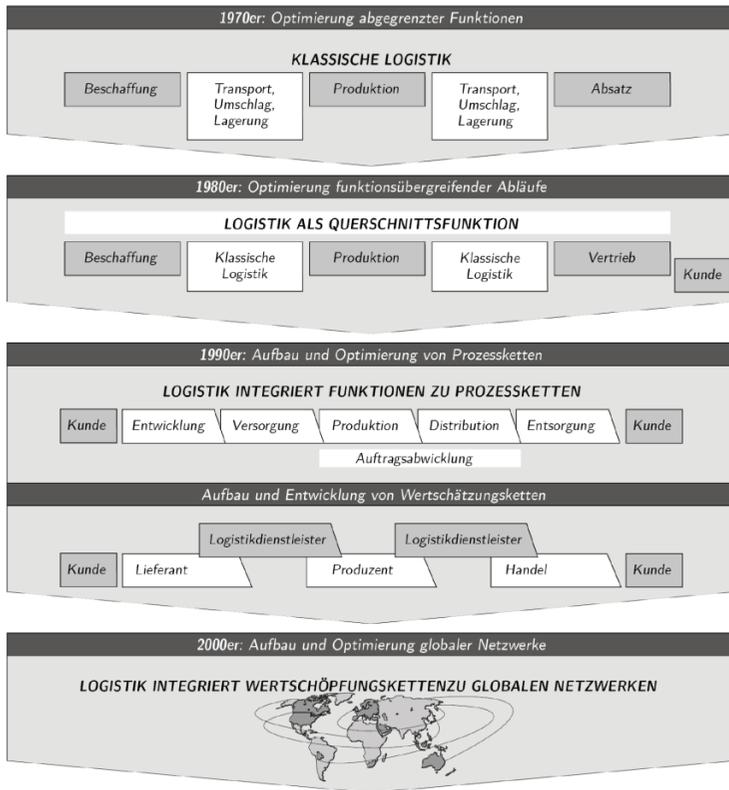


Bild 2.8: Wandel der Logistik und ihres Verständnisses [BAU14]

2.2.3 Technische Logistik

Die VDI-Gesellschaft „Produktion und Logistik“ [VDI12] **definiert** Technische Logistik folgend:

„Die Logistik ist heute die drittgrößte Branche in Deutschland. Die Verfügbarkeit von intelligenten Logistikdienstleistungen gehört zu den wichtigsten Anforderungen an einen modernen Industriestandort. Die industrielle Produktion ist darauf angewiesen, dass „die richtige Ware zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort“ ist. ... Unter Technischer Logistik (auch Intralogistik)²⁰ versteht

den logistischen Kontext jeder daraus resultierenden technischen Fragestellung auszublenken.

²⁰ Auffallend dabei ist die Gleichsetzung von Technischer Logistik mit Intralogistik, die nach Meinung des Autors bspw. im Bereich der Schüttgut-Fördertechnik oder Seilbahntechnik

man die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen. Dabei beinhaltet die Technische Logistik die Prozesse von der Rampe bis zur Rampe wie zum Beispiel:

- Wareneingang
- Verpackung
- Warenidentifikation
- Lagerung
- Kommissionierung
- Sortierung
- Warenausgang
- Verladung
- Warenumschlag

... Thematisch werden im Fachbereich Technische Logistik auch alle Arten der Fördertechnik, d.h. Gabelstapler, FTS, Krane, Rollenförderer usw. betreut. Ein weiteres spezielles Feld in der Logistik ist das Schüttgut, d. h. der Transport von grob- und feinkörnigen Materialien aus Bergbau, Chemie und Nahrungsmittelindustrie über teilweise sehr weite Strecken. Der Fachbereich versteht sich als die erste Adresse in der Technischen Logistik in Deutschland. ... Einen besonderen Stellenwert hat in der Logistik das Thema Ladungssicherung. Ein umfangreiches Regelwerk von VDI-Richtlinien hat als anerkannte Regel der Technik in die Straßenverkehrsordnung Einzug gehalten.“ [VDI12]

Im Fachbereich "Technische Logistik" (FB3) der VDI befassen sich folgende Fachausschüsse in ihren Richtlinienausschüssen mit Intralogistik-Themen, daraus kann man auch auf den Inhalt der Technischen Logistik schließen: Logistiksysteme und -management

- Logistikprozess und IT
- Zuverlässigkeit in der Intralogistik
- Krane
- Flurförderzeuge
- Lager- und Materialflusstechnik
- Schüttgut-Fördertechnik
- Verpackungslogistik, Ladungssicherung
- Fahrerlose Transportsysteme (FTS)
- Auto ID-Technologie

Eine Monographie [KOE07] inkludiert unter dem Titel „Technische Logistik“ auch logistikkonforme Fertigung (s. Kap. 2.2.11.4) und Qualitätssicherung sowie rechnergestützte Planungsmethoden und Anlagenverfügbarkeit mit Technikbewertung von Logistiksystemen.

weit gefasst ist, bedenkt man dort Anlagenlängen von durchaus mehreren Kilometern. Hier zeigt sich auch eine nicht durchgängige Definition und Unterscheidung von Intra- und Extralogistik. Bei Aufruf „Technische Logistik“ auf den Seiten der VDMA wird man gar automatisch zu „Fördertechnik“ weitergeleitet (sic!) [VDM12b], dort findet sich keine weitere Untergliederung.

Man kann die Technische Logistik auch in Abgrenzung zur betriebswirtschaftlichen Logistik sehen. Wenn nach [JOD12] (dort v.a. nach [DIN 30781]):

- Logistik die wissenschaftliche Lehre von der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie-, und Informationsflüsse in Systemen, Netzen und Prozessen ist.
- Die Technische Logistik die Strukturen, Systeme und Geräte um den optimalen Fluss der Objekte durch die Netzwerke zu ermöglichen bereitstellt und
- "Materialfluss die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb fester Bereiche" ist.

Die Technik der Logistik ist nach [HNS07] neben der Informatik und der Betriebs- und Volkswirtschaft eine der drei tragenden Säulen der Logistik.

Die technische Sicht der Logistik hat den Materialfluss im Vordergrund. Die Vorgänge dabei sind Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie Verteilen von Gütern innerhalb fester Bereiche. Die Objekte darin sind Güter, Personen, Informationen, Energie, Materialfluss- Informations- und Produktionsmittel sowie Infrastruktur. Diese Objekte durchlaufen Transformationsprozesse die den Systemzustand der Objekte hinsichtlich Zeit, Ort, Menge und Qualität durchlaufen.

Eine ähnlich lautende Sichtweise findet sich in [GW11]. Im Erkenntnisobjekt „Flüsse in Netzwerken“ spielt die Technik die folgende Rolle:

„Die technische Sichtweise der Logistik bezieht sich auf das Zusammenwirken von Infrastrukturen (z.B. Straßen, Schienen, Lagerhäuser), Maschinen (z.B. Lkws, Gabelstapler, Flurförderzeuge), Behältern (z.B. Container, Paletten) und Personen (z.B. Kommissionierer, Gabelstaplerfahrer, Lkw-Fahrer). Technische Fragestellungen ergeben sich auf allen Ebenen der Logistik. Komplexe Materialflusssysteme sind aus verschiedenartigen Komponenten zusammengesetzt, deren anforderungsgerechtes Zusammenwirken betrachtet werden muss. Für die Gewährleistung einer logistikgerechten Materialflussteuerung ergibt sich z.B. eine Vielzahl unterschiedlichster technischer Gestaltungs- und Konstruktionsprinzipien zur Realisierung von Förder- und Lagerkonzepten für Güter mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften.“

Die Technische Logistik betrachtet nach [AIK08] ganzheitlich die Technik zur Erfüllung des Materialflusses' zwischen Quelle und Senke und schließt somit die Verkehrstechnik mit ein, da sie inner- und außerbetriebliche Logistikketten, zum Teil über beträchtliche Distanzen, berücksichtigt. Die Verkehrstechnik ist somit Erfüllungselement außerbetrieblicher logistischer Funktionen. In Abgrenzung zur Verkehrstechnik hat die Materialflusstechnik als Teil der Transporttechnik einen örtlich begrenzten Betrachtungsraum und ist inner- und außerbetrieblich eingesetzt.

In der Literatur werden die Begriffe, wie oben dargestellt, oft unterschiedlich verwendet und die Begriffe **Fördertechnik, Materialflusstechnik und Transporttechnik** bisher nicht ausreichend differenziert [LOG15]. Die Differenzierung nach Transportentfernungen „weit und begrenzt“ ist unscharf aber gebräuchlich [MRW08]. Abgegrenzt (mit Unschärfe) muss auch noch zur Handhabungstechnik werden, die nach [VDI2860] neben Fördern und Lagern mit dem Handhaben (und darin dem Speichern Menge verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren) den Materialfluss bewirkt (Details s. auch [HES13]).

Eine Abgrenzung analog eigenem Bild 2.9 findet sich bei [HKS04]: „Die Fördertechnik ist der Teil der technischen Wissenschaften, welcher sich mit jenen Einrichtungen und Verfahren beschäftigt, die es ermöglichen, Ortsveränderungen von Personen und Gütern über begrenzte Entfernungen, meist auf festgelegten Wegen, durchzuführen. Im Gegensatz dazu spricht man von Verkehrstechnik, wenn diese Ortsveränderungen über relativ unbegrenzte Entfernungen erfolgen – auf dem Festlande, auf dem Wasser oder in der Luft.“

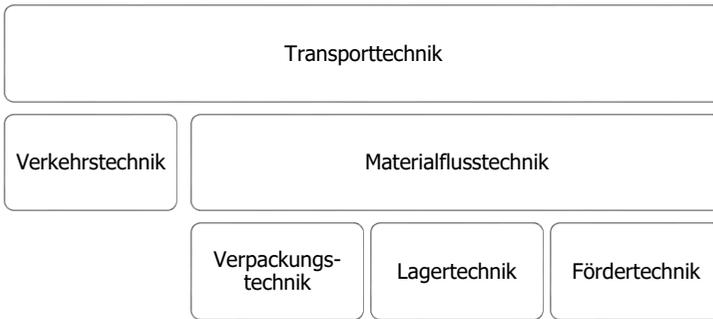


Bild 2.9: Einstufung der Materialflusstechnik

Man kann folgende Systematisierung und **Dimensionen der Technischen Logistik** klassifizierend nach Bild 2.10 mit den Begriffen Fördertechnik, Materialflusstechnik, Materialflusssanlage und Materialflusssystem festhalten. [ARN06] gibt eine ähnliche Struktur wieder, allerdings ohne zwischen Materialfluss- und Fördertechnik zu unterscheiden²¹. Das Bild ist von unten nach oben zu lesen:

²¹ Nach Meinung des Autors wirkt auch der Begriff Materialflusstechnik und abgeleitete Begriffe daraus als verbreiteter Oberbegriff über die Fördertechnik notwendige Diskussionen auf, da er vom Wortsinn her Personenfördertechnik ausschließt. Auch dafür gilt wie oben, dass nicht durch alle Quellen hinweg scharf differenziert wird.



Bild 2.10: Dimensionen der Technischen Logistik

Ein einzelnes **Fördersystem** kann wie nach Bild 2.11 dargestellt werden und besteht aus den darin angegebenen Bestandteilen [JOD12].

Eine Herausforderung ist in jedem Planungs- bzw. Entwicklungszeitpunkt eines Systems der Technischen Logistik die Verknüpfung der organisatorischen, logistischen Anforderungen mit den maschinenbaulich-technischen Aufgaben. Lösungen zu diesem Problem versucht eine entwickelte Methode für das Engineering in der Logistik bereitzustellen (MeK1, simultaneous engineering in der Technischen Logistik – Kap. 3.4.1), indem der Entwicklung der Technik der Logistik frühestmöglich genügend Aufmerksamkeit gewidmet wird²².

Zur obigen und folgenden Systematisierung des Fachbereichs mit den vielen **divers verwendeten Begriffen** sei nochmals auf Gudehus [GUD05] verwiesen (s. Kap. 2.2.2), dass Logistik schon lange Zeit unter vielen Namen betrieben wurde und wird. Mit dem gegenwärtigen Erstarken einer wissenschaftlichen Befassung mit allen Domänen von Logistik wird diesem Umstand implizit noch Entwicklungs- und Fokussierungspotenzial zugestanden²³.

²² Die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit beziehen sich stets auf die mechanisch-maschinenbauliche Materialflusstechnik und ggf. Materialflussanlagen ohne Betrachtung mechatronischer Ansätze und organisatorisch-informationstechnischer Beschreibung. Die Kombination der Mechanik der Materialflusstechnik mit der Elektrotechnik ist im Rahmen der dynamischen Betrachtung (Simulation mit bspw. MKS) der Materialflusstechnik hier sehr wohl Gegenstand.

²³ Eine kurze, übersichtliche Darstellung des Fachgebiets ist auch Abschnitt 8.1 zu entnehmen, der diese für das Habilitationsvorhaben geforderte Aufbereitung beinhaltet.

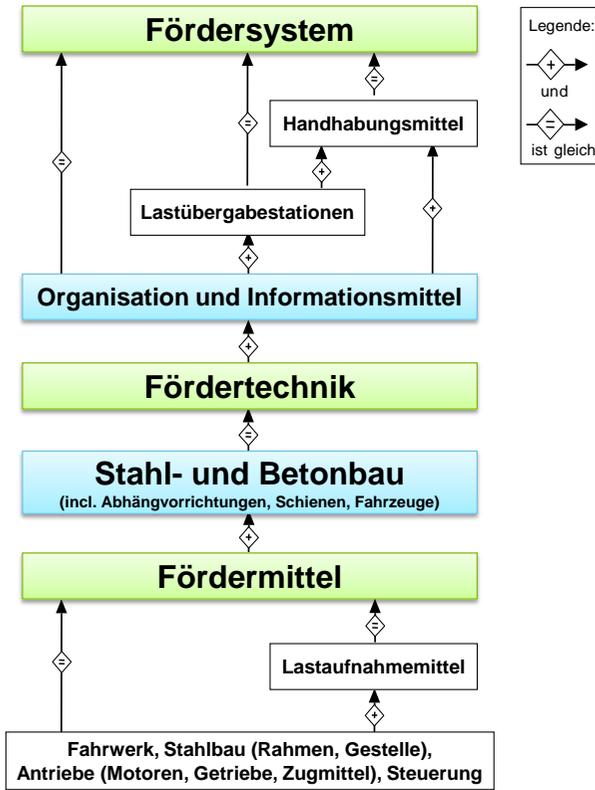


Bild 2.11: Systematik eines Fördersystems [JOD12]

2.2.3.1 Materialflusssystem

Materialflusssysteme sind mit den Disziplinen ihrer Gestaltung, Organisation und Automatisierung/Identifizierung vor allem jene drei großen physischen Bereiche in der Technischen Logistik mit den Teilsystemen:

- Lager- und Transportsysteme
- Sortier- und Verteilsysteme
- Kommissioniersysteme

Sie sind untergliederbar in die **vier Systemdimensionen Komponente, Baugruppe, Maschine, Anlage** gemäß Bild 2.12 und Bild 2.18.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.2.1 ist in der Technik die Betrachtung jener als System gebräuchlich. Für die Betrachtung von Materialflüssen in logistischen Systemen wird das Materialflusssystem nach Bild 2.12 definiert eingeführt. Es besteht entsprechend der Systemtheorie aus Relationen zwischen Elementen, Subsystemen und dem Gesamtsystem mit definierter Systemgrenze und Ein/Ausgangsgrößen. Die Differenzierung in die Domänen Stoff, Energie und Anlage ist im Fokus der entwickelten Methoden sinnvoll, da dies eine in vielen Regelwerken und Richtlinien angewandte

Betrachtung ist. Dies ermöglicht eine Projektion allgemeiner theoretischer und praktischer Erkenntnisse aus „verwandten“ Bereichen auf die Problemstellungen im Materialflusssystem (z.B. agiert die Entwicklungsmethodik in verschiedenen Ansätzen nach Stoff, Energie und Information)²⁴.

Entsprechend der Systematik von Abschnitt 2.2.3.3 wird den Systemobjekten eine oder mehrere materialflusstechnische Entsprechung, die auch überlappend sein kann, zugeordnet. Die das System, Subsystem und Element verbindenden Relationen können unterschiedlicher Art (ist Teil von, gehört zu,...) sein und verschiedenen Typen (Geometrie, Hersteller,...) angehören. Sie sind gegenwärtig in der technischen Logistik vor allem in den Planungs- und Konstruktionsdaten vorliegend aber auch im Projektmanagement zu finden. Eine nähere theoretische Betrachtung dazu erfolgt unter Abschnitt 2.2.14.

²⁴ Die vorliegenden Betrachtungen beziehen sich vorwiegend auf die stoffliche Ebene.

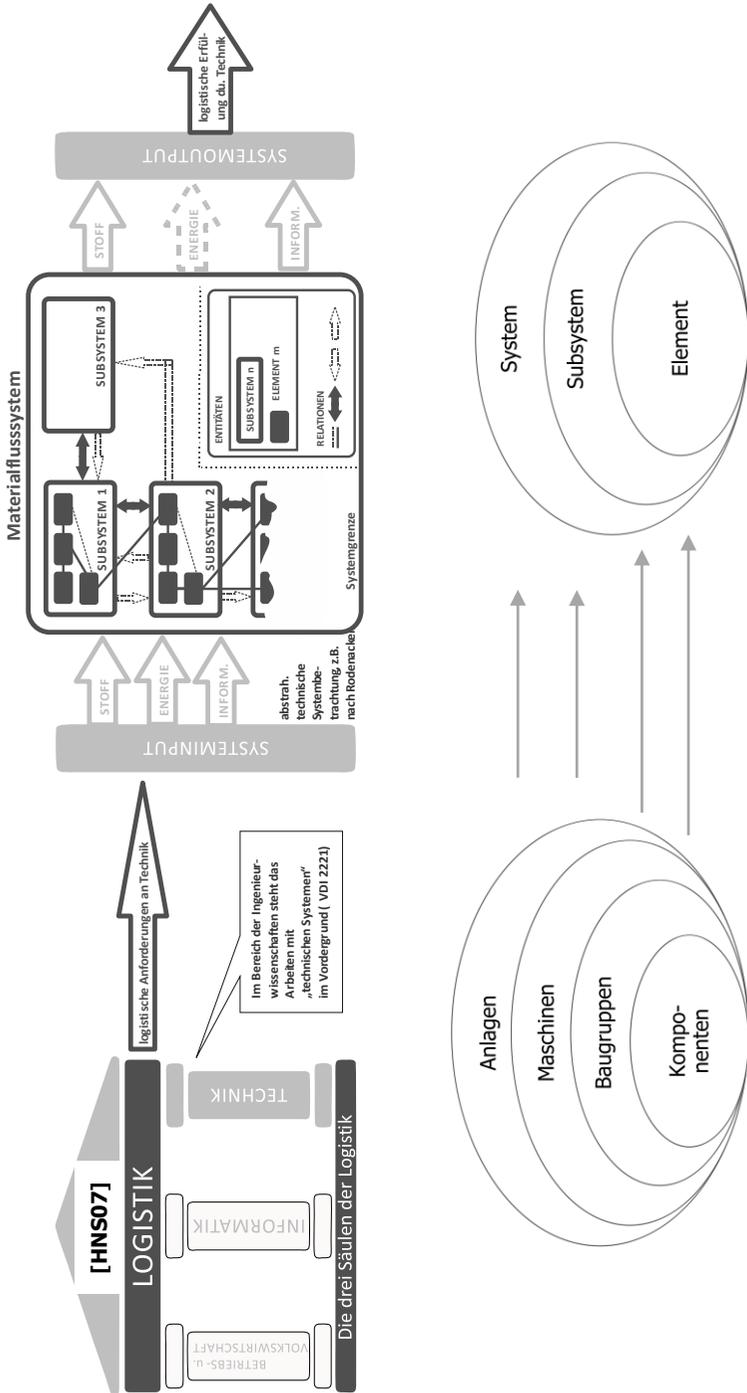


Bild 2.12: Systemtheoretische Abstraktion Materialflusssystem und Zuordnung Materialflusssystem zur Systemtheorie

2.2.3.2 Materialflusstechnik

In der Materialflusstechnik werden nun deren Mittel auf „relativ kurzen Entfernungen“ [MRW08] zum Transport, Umschlag und Lagern eingesetzt. Man spricht von sogenannten TUL-Prozessen (Transport-Umschlag-Lager). Dazu gehört die technologische und ökonomische Prozessgestaltung mit den zur Realisierung notwendigen Maschinen und Ausrüstungen. Die Materialflusstechnik wird ergänzt durch Informations- und Organisationssysteme und ist nur in Kombination mit diesen wirksam.

Man kann die gliedernden Ausführungen von oben präzisieren, wenn man die **Funktionen des Materialfluss** mit Bild 2.13 näher betrachtet. Einige Unterfunktionen sind durchaus in mehreren Funktionen beheimatet, diese sind in ihrer Hauptgruppe mit einem ° gekennzeichnet:

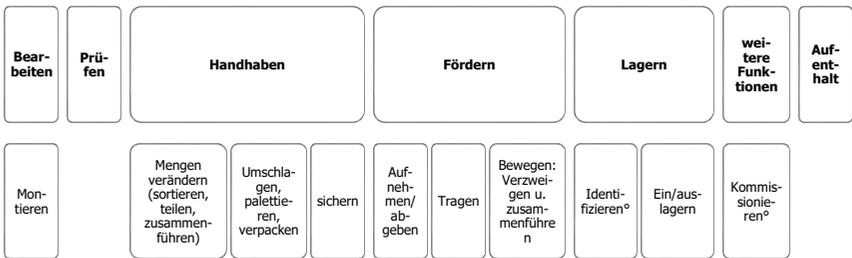


Bild 2.13: Funktionen von Materialflusstechnik (adaptiert nach [HS08])

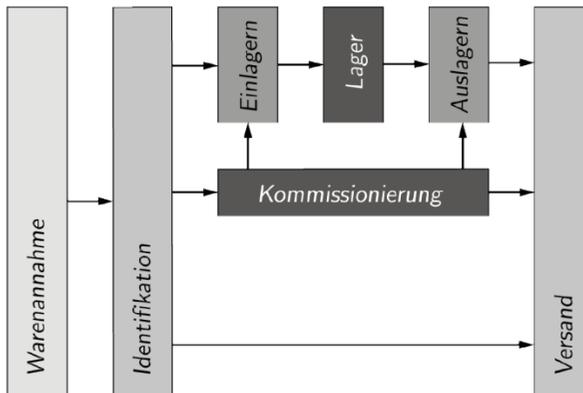


Bild 2.14: Beispiel des Materialfluss' in einem Distributionszentrum [SCH13] nach [FE08]

Typische übergeordnete **Umgebungen für diese Funktionen** und Prozesse sind oftmals intralogistisch. Die Intralogistik ist gemäß der Definition des VDMA und des Forum Intralogistik "die Organisation, Steuerung Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen" [VDM12a]. Sie beinhaltet nun die folgenden Prozesse und ihre zugehörigen Bereiche, von der Rampe bis zur Rampe, in beispielsweise Distributionszentren (Bild 2.14), Produktions- oder Nachschublägern; die (Material)Flüsse zwischen den u.a. Bereichen, die nicht immer allesamt vorhanden sein müssen:

- Wareneingang
- Lagerung
- Sortierung
- Kommissionierung
- Verpackung
- Warenausgang
- Verladung
- Warenumschlag

2.2.3.3 Systematik materialflusstechnischer Gewerke

Mit den Funktionen und v.a. Prozessen der Materialflusstechnik kann man eine überblickende **Systematisierung** entwickeln²⁵. Hier wird nach unterschiedlichen Merkmalen kategorisiert. Die Fördertechnik ist darin einmal nach baulicher Durchbildung und einmal nach Funktion angegeben (

Bild **2.15**). Auch diese Systematik ist als starre Grafik nicht eindeutig erstellbar, da Mehrfachzuordnungen möglich sind²⁶.

[DIN 15201] gliedert die Stetigförderer, als Teilmenge der Materialflusstechnik, nach Wirkprinzip.

[VDI 3648] systematisiert Behälterförderanlagen nach ihrer Funktion:

- Angetriebene Elemente für waagrechte, steigende und fallende Streckenförderung
- Angetriebene Elemente für Senkrechttransport
- Nichtangetriebene Elemente
- Eingabeelemente
- Eckumführungen
- Weichen – Elemente zur Richtungsänderung wie auch Ausschleuser

²⁵ [VDI 2411] war das maßgebende Werk zu Begriffen und Erläuterungen im Förderwesen und wurde aufgrund ihres Erscheinungsdatums zurückgezogen. Die dortige Auflistung entsprach nicht mehr der evolutionären Entwicklung der Technik und der Vielfalt der Geräte 40 Jahre nach deren Erscheinen. Eine Gliederung und Systematisierung wurde darin nicht vorgenommen und die Begriffe alphabetisch in lexikalischer Form angeführt.

²⁶ Beispielsweise sind bewegte Regale mit feststehenden Ladeeinheiten (Karusselllager) durchaus unter Regallagerung wie unter Lagerung auf Fördermittel einordenbar.

Für die Entwicklung einer Systematisierung logistischer Gewerke stößt man also auf unterschiedlichste Klassifizierungsarten, von denen die breiteste in [HNS07] zu finden ist (Bild 2.16). Dort wird vor allem die Stückgut-Intralogistik betrachtet und die Gewerke dazu nach Bestimmungskriterien wie Verwendungszweck, Anforderungseignung klassifiziert²⁷. Merkmale dazu sind:

- Förderart (stetig/unstetig)
- Aufstellungsart (flurgebunden/aufgeständert/flurfrei)
- Ortsbindung (ortsfest/geführt verfahrbar/frei verfahrbar)
- Antriebswirkprinzip (Abwälzung/Schwerkraft/Muskelkraft/Einzelantrieb/Zugmittel)

Für den Fokus der Entwicklung und Konstruktion logistischer Gewerke wird hier ein **4-Ebenen-Modell** vorgestellt und folgend verwendet, das eine Objektzuordnung der entwickelten Methoden ermöglicht. Die Gliederung der Gewerke aus Stückgut- und Schüttgutfördertechnik orientiert sich dabei vor allem an der physischen Größe und dementsprechend an der Komplexität der Objekte²⁸.



Bild 2.15: Systematik der Materialflusstechnik

²⁷ Dieses Mehr-Ebenen-Modell unterstützt vor allem bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Planung von Anlagen. Die statische, abgedruckte Struktur könnte durch Verwendung von Datenbankalgorithmen im Rahmen des Wissensmanagements weitere Kriterien und mehrdimensionale Auswahlmöglichkeiten einschließen und eignet sich z.B. zur Implementation in eine Ontologie (s. Abschnitt 2.2.12.2). Diese Systematisierung der Fördertechnik nach [HNS07] ist gut etabliert und verbreitet (Bild 2.16), und wird dementsprechend hier für eine Feingliederung der Materialflusstechnik übernommen (Bild 2.18).

²⁸ Vergleicht man alle hier vorgestellten Gliederungsansätze mit der Struktur des Kapitels „Fördertechnik“ in [DUB01], findet sich dort eine bauformorientiertere Gliederung nach Teilbaugruppengröße wieder, die aber nicht explizit angegeben ist, sondern als Struktur des Gesamtkapitels erscheint. Andere Gliederungen gehen auch von Leistungsmerkmalen aus. Weitere Gliederungen der Literatur betreffen bspw. eine Systematisierung der Fördermittel nach Verwendung, als Bestandteil dynamischer Lager, zum Ein- Auslagern, in der Lagervorzone befindlich oder mit Lagerfunktion. All diese Ansätze sind aber für die Ein- und Zuordnung der vorzustellenden Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden nicht verwendbar, womit dem Ansatz nach Bild 2.17 unter Zuhilfenahme von Bild 2.18 gefolgt wird.

Fördermittel													
Stetigförderer						Unstetigförderer							
flur-gebunden		aufgeständert				flurfrei		flurgebunden		aufgeständert		flurfrei	
ortsfest		ortsfest				ortsfest		geführt verfahrbar		frei verfahrbar		geführt verfahrbar	
Zugmittel		Abwälzung		Schwerkraft		Zugmittel		Zugmittel		Einzelantrieb		Einzelantrieb	
Unterflur-schlepp-kettenförderer	Rollenbahn, angetrieben	Rollenbahn	Tragketten-förderer	Kreisförderer	Umsetzer	Schlepper	Aufzug/ Senkrecht-förderer	Kanalfahr-zeug	Trolleybahn	Brückenkran			
		Röllchenbahn	Bandförderer	Power-and-Free-Förderer	Verschiebe-wagen	Wagen		Verteiltfahr-zeug	Rohrbahn	Portalkran			
		Kugelbahn	Wandertisch		Elektro-tragbahn	Hubwagen					Kabelkran		
		Rutsche	Gliederband-förderer		Regalbedien-gerät	Stapler					Ausleger-/Drehkran		
			S-C-Förderer		automat. Flurförder-zeug	automat. Flurförder-zeug							Elektro-hängbahn
			Kettenförder-system			Kommissio-nierfahrzeuge							

Bild 2.16: Systematik der Fördermittel für die Stückguttechnik [HNS07] nach Tätigkeitsart stetig/unstetig

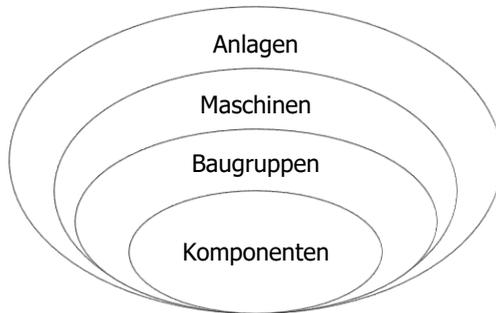


Bild 2.17: Größendimensionen von Materialflusstechnik (Komplexität) als 4-Ebenen-Modell mit Objekten der Materialflusstechnik nach Bild 2.18²⁹

Die **Objekte der 4 Größendimensionen** der Materialflusstechnikstrukturierung sind in Bild 2.18 unterteilt und beinhalten die grau angegebenen Gewerke. Die Systematik ist insofern als vollständig anzusehen, als sie alle mit den entwickelten Methoden bearbeitbaren Objekte beinhaltet³⁰.

29

Bild 2.17: Größendimensionen von Materialflusstechnik (Komplexität) als 4-Ebenen-Modell mit Objekten der Materialflusstechnik nach Bild 2.18

stellt neben der Systematisierung von Materialflusstechnik (mit Objekten nach Bild 2.18) auch die vertikalen Komponenten des Methodeneinordnungsmodells vor (Kap. 3.3).

³⁰ Die Betrachtung mit den in Kap. 3 eingeführten Methoden bezieht sich auf die Systematisierung materialflusstechnischer Gewerke nach Bild 2.18 und hierbei vorwiegend auf die Bereiche Komponenten, Baugruppen und Maschinen. Anlagen und v.a. Systeme sind für die Entwicklung und Konstruktion (Engineering) physisch nicht ausreichend detailliert gesamtheitlich darstellbar, dass die dargestellten Methoden dort greifen könnten.

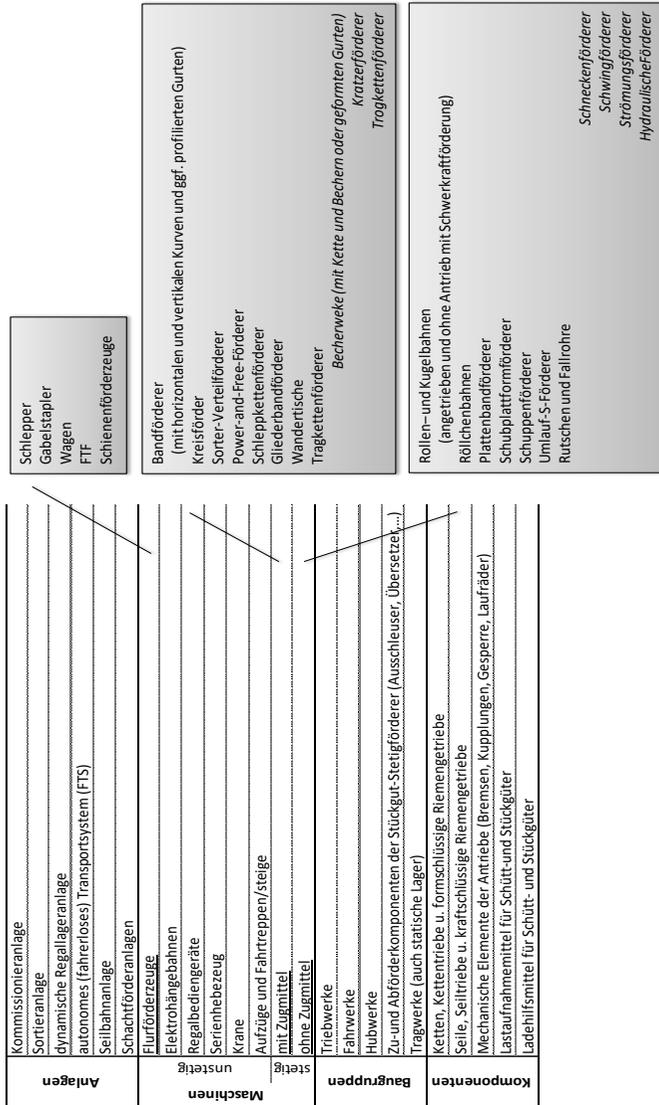


Bild 2.18: Systematik materialflusstechnischer Gewerke für das 4-Ebenen-Modell (Förderer der Schüttguttechnik kursiv und rechtsbündig), Objekte nach [HNS07]

Gegenüber einer streng hierarchischen Strukturierung von Wissen, hat die Darstellung mit **MindMaps** einige Vorteile v.a. im kreativen Erstellungsprozess

Hier kommen abstrahierende, systemische Betrachtungen wie (Leistungs-)Verfügbarkeit und Energiebetrachtungen zum Einsatz [HEG14].

(s. Kap. 2.2.12)³¹. Wenn mit dem Ziel wissensunterstützter Konstruktionen Konstruktionswissen gesammelt und aufbereitet werden muss, stellt eben die MindMap ein probates Vorbereitungsmittel dar.

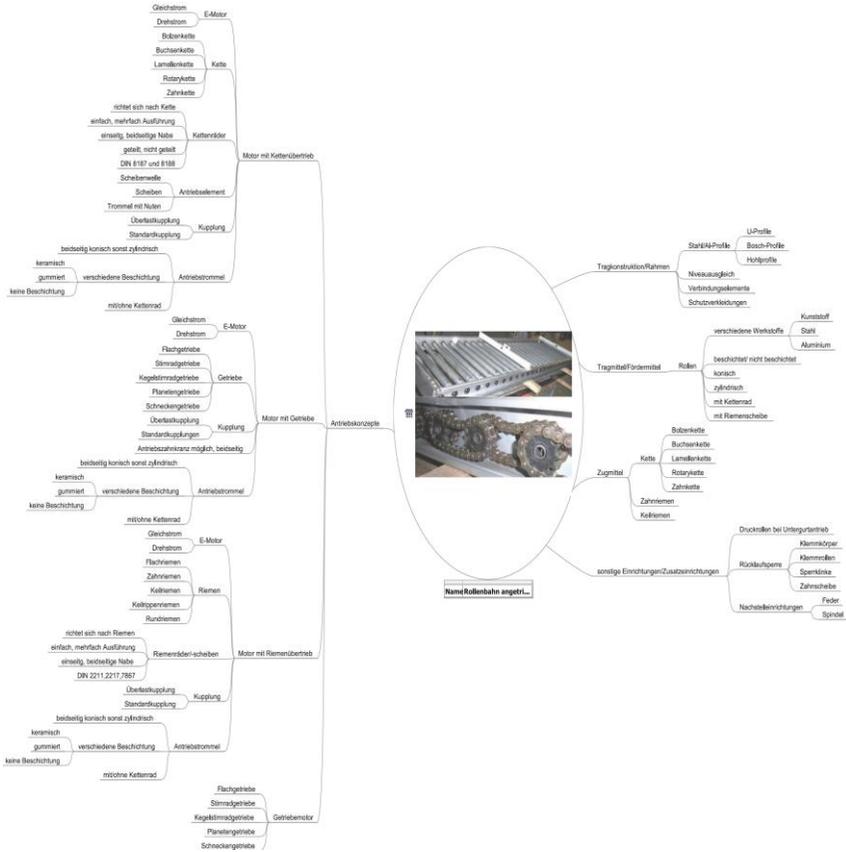


Bild 2.19: technikorientierte Systematik für Rollenförderer (keine Motorrollenantriebe, keine Staufunktion)

Bild 2.19 zeigt am Beispiel des angetriebenen Rollenförderers/Rollenbahn ohne Staufunktion (und ohne der Konstruktionsvariante „Motorrollenantrieb mit Übertrieb“) Ausprägungen technischer Merkmale dieses Förderers³².

³¹ Freilich kann auch die MindMap den Zwiespalt von notwendiger Mehrfachzuordnung einzelner Objekte nicht befriedigend lösen, hier kommen Datenbanksysteme zum Einsatz.

³² Die bisher in dieser Form im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten technischen Beschreibungen logistischer Anlagen (MindMap) stellen eine Basis zur wissensbasierten Konstruktion dar und können zur Funktionssynthese im methodischen Konstruieren herangezogen werden bzw. soweit formalisiert werden, dass sie konfigurier- und funktionierbar zu Maschinenkonzepten zusammengestellt werden können. Gegenwärtig in dieser Form für die folgenden Gerätschaften aufbereitet, die Detailtiefe dazu entspricht jener von Bild 2.19:

2.2.3.4 Einige Engineeringaufgaben in der Materialflusstechnik*

Die **Breite der Materialflusstechnik** umfasst Berechnungen und Anwendungen unterschiedlichster Art und wird in vielen Konstruktions- und Berechnungsabteilungen oft einigen wenigen Mitarbeitern aufgebürdet. Die Durchdringung mit modernen Werkzeugen ist weitaus geringer als in den als innovativ identifizierten Branchen automotive und aerospace. Die Produktentwicklung ist stark versuchsgetrieben, wobei stets real-physische Abbilder der künftigen Produkte (Prototypen) erstellt werden. Die Anpassungskonstruktion ist auch bei neuen Produkten verbreitet, demgegenüber stehen aber auch viele innovative neue Konzepte – wie beispielsweise die autonomen Shuttles [DEM12] – die gänzliche Neukonstruktionen darstellen. Aber auch hier ist zumindest im Bereich der technischen Realisierung Softwareeinsatz in der Produktentwicklung maximal im Konstruktionsbereich (CAD) und Steuer-/Regelungsbereich zu sehen.

Aufgaben in der Technischen Logistik stellen sich den Ingenieuren, abseits der planerischen Tätigkeiten des Materialfluss³, aus unterschiedlichsten Bereichen. Dazu kann man folgende Tätigkeiten zählen [LAN09], graue sind nicht Gegenstand der hier entwickelten Methoden einer mechanisch-maschinenbaulichen Sichtweise:

- Konstruktive Tätigkeiten:
geometrische Gestaltung, Komponentenwahl und -dimensionierung, Werkstoffwahl, Vernetzung mit Einkauf/Beschaffung
- Berechnerische Tätigkeiten:
Auslegung, Nachrechnung und Optimierung
- Kostenbewertende- und optimierende Tätigkeiten
- Systemische Bewertungen:
Energiebewertungen, Verfügbarkeitsbetrachtungen [FEM 9.222].
- Elektro- Antriebstechnik mit Automatisierung und Systemintegration
- Steuernde und vernetzende Aufgaben zu Verwaltungssystemen

2.2.3.5 Von der Wissenschaftsdisziplin „Logistik“

Die Logistik im Allgemeinen und die Technische Logistik als Teildisziplin sind **sehr junge und noch nicht vollends etablierte Wissenschaften des Ingenieurfaches**. Das Anliegen der in diesen Fächern tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist neben der fachbegründeten Suche nach Lösungen von Problemen auch eines der Festigung und Anerkennung der

-
- Anlagen:
 - Sorter: Kammsorter, Kippschalensorter, Quergurtsorter, Schuhsorter
 - Maschinen:
 - Stetigförderer: Drahtgurtförderer, Drehtisch, Elektrohängebahn, S-/C-Förderer, Gurt- und Kurvgurtförderer, Power-and-Free-Förderer, Kugelbahn, Gliederbandförderer, Plattenbandförderer, Rollenbahn, Rollenförderer, Röllchenbahn, Staurollenförderer, Schleppkettenförderer, Tragkettenförderer
 - Unstetigförderer: autonome Fahrzeuge (AGV/FTS), Serienhebezeuge
 - Baugruppen: Hubtisch, Schwenktisch, Pusher- und Abweisersysteme, Gurt- und Kettentransfer
 - Komponenten: Rutschen und Fallrohre

Wissenschaftlichkeit des Faches. In einem Positionspapier der BVL haben sich die führenden Forscher des Fachgebietes zu einem Statement zusammengeschlossen, das dem Fach das nötige Gehör und die entsprechende fachliche Zu- und Einordnung verschaffen soll. Darin heißt es nach [GW11]:

„Die Logistik als anwendungsorientierte Wissenschaft bezieht ihre Problemstellungen aus der Wirtschaftspraxis und trägt proaktiv zur deren Weiterentwicklung bei.“

„Das spezifische Erkenntnisinteresse der Logistik zielt auf die Überwindung der Grenzen etablierter anwendungsorientierter Wissenschaftsdisziplinen und die Generierung spezifisch logistischer Erkenntnisfortschritte durch die synergetische Verbindung der Wissensbestände dieser Disziplinen.“

Als anwendungsorientierte Wissenschaft nimmt die Logistik Methoden aus anderen Disziplinen (z.B. Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften, Sozialwissenschaften) auf, entwickelt sie aber auch weiter. Zwar baut jede wissenschaftliche Disziplin auf anderen Wissenschaften auf und ist insofern interdisziplinär. Für die Logistik gilt dies aber angesichts ihres Objektbereiches und ihres multiperspektivischen Ansatzes in besonderer Weise. So verfolgt die Logistik das erklärte Ziel, Wirtschaftssysteme als Netzwerke zu modellieren, ihre Verknüpfungen zu analysieren und dadurch Hinweise für ihre optimale Gestaltung und Implementierung zu gewinnen.

An dieser Stelle wird besonders deutlich, warum das spezifische Erkenntnisinteresse der Logistik eine über etablierte Wissenschaftsdisziplinen hinausgehende Perspektive erforderlich macht und diese insofern transzendiert. Logistik baut als wissenschaftliche Disziplin nicht nur auf Grundlagenwissenschaften auf, wie andere anwendungsorientierte Disziplinen auch, sondern Logistik verbindet darüber hinaus auch anwendungsorientierte Wissenschaften wie z.B. Betriebs- und Volkswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften, (Wirtschafts-) Informatik Wirtschaftsgeographie oder Jura, um auf diese Weise neue, spezifisch logistische Erkenntnisse zu generieren. Insofern ist die Logistik als wissenschaftliche Disziplin auch kein (echtes) Teilgebiet nur einer dieser Wissenschaften, sondern sie zielt gerade auf die Verbindung der Wissensbestände verschiedener Disziplinen und damit auf die Überwindung etablierter Disziplingrenzen ab. Insofern besitzt die Interdisziplinarität für die Logistik eine zentrale und über die für jede anwendungsorientierte Wissenschaft hinausgehende Bedeutung. Sie ist zentrales Element des logistischen Paradigmas.

Selbstverständlich schließt diese Interdisziplinarität nicht aus, dass einzelne logistische Analysen oder Forschungsfelder sich auf spezifische Fragestellungen innerhalb der einzelnen etablierten Wissenschaftsdisziplinen konzentrieren und insofern nur begrenzt interdisziplinär sind. Dies ergibt sich ganz einfach aus wissenschaftsökonomischen Gründen. Hieraus folgt unmittelbar, dass es in den etablierten anwendungsorientierten Wissenschaftsdisziplinen spezialisierte Logistik-orientierte Fachgebiete gibt, z.B. die betriebswirtschaftliche Logistik oder die ingenieurwissenschaftliche Logistik.“

Die **Technische Logistik ist hiermit eine solche anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin**, die z.B. in der normativen Sachgebietsgliederung ÖSTAT noch nicht vorhanden ist [ÖST14]. Darin gibt es lediglich das Fach „Fördertechnik 2206“, das aber nach den Definitionen von oben nur einen Teilbereich der Technischen Logistik darstellt. Die Methoden und Werkzeuge des

Fachgebiets sind jene der Ingenieurwissenschaften, die Erkenntnisobjekte jene der Logistik.

2.2.4 Modell und Modellbildung*³³

Ganz allgemein [VWB+09] dient ein **Modell** dafür, dass für einen Beobachter B das Objekt M ein Modell des Objektes A ist, wobei er M benutzen kann um Fragen zu beantworten, die ihn an A interessieren³⁴. Vor allem Berechnungs- und Simulationsmodelle sind unterschiedlichen physikalischen Domänen (Dynamik, Elektrik, Thermik, Hydraulik, ...) zuzuordnen. Wesentlich im Umgang mit Modellen ist die Betrachtung derer Gültigkeit und Genauigkeit, die ein direktes Ergebnis der Modellbildung sind (s. auch [ROD06]). Dafür existieren zahlreiche unterschiedliche Vorgehensweisen. Für die technischen Berechnungs- und Simulationsmodelle kann nach [DH06] zwischen induktiver und deduktiver Modellbildung unterschieden werden. Die induktive Modellbildung³⁵ hat sich im Bereich der für die Technische Logistik relevanten Dynamik- und Strukturmechanikmodelle etabliert. Sie liefert Berechnungs- und Simulationsmodelle vom Speziellen zum Allgemeinen hin. Beide Modellarten sind stets durch Verifikation und Validierung zu bestätigen³⁶. Die Simulationsmodelle sind mit dem Simulationssystem die Grundlage für virtuelle Experimente und Simulationsstudien³⁷.

Die **Modellbildung** ist stets aufgabenspezifisch, kann jedoch durch die Submodelltechnik für gewisse physikalische Grundprinzipien standardisiert werden (s. auch [DH06]). Für die technischen Grundfunktionen des Materialfluss werden im Rahmen dieser Arbeit solche Submodelle erstellt, die es effizient erlauben, spezifische Gesamtmodelle zu erstellen (Kap. 2.2.8 und 2.2.9). Mit den Methoden MeB1, MeB2 und MeB3 (Kap. 3.5) wird eine Auswahlhilfe für die Modellierungsumgebung und Szenarien für den Umgang/Nutzung erstellter Simulationsmodelle bereitgestellt.

2.2.5 Simulation und Simulationsmodell*

Simulation ist eine Möglichkeit zur Analyse von Systemen zum Verständnis derer Wirkungsweise, deren Ein- und Ausgangsverhaltens und zum Experimentieren an einem Modell; Grundlage jeder Simulation ist ein Modell, das

³³ Die Ausführungen der Abschnitte 2.2.4 bis 0 sind stets im Kontext der Entwicklung und Konstruktion in der Technischen Logistik aus der Gruppe technisches Simulationsmodell zu sehen. Einen guten Überblick zur Thematik am Sektor v.a. der Materialfluss(simulations)modelle gibt [HKS04] und VDI 3633ff. [VDI 3633].

³⁴ Tabelle 21 in Kap. 6 gibt einen vergleichenden Überblick über die Konkretisierung der Modelldefinition im Engineering unter Einbeziehung der relevanten Quellen VDI 2206 [VDI 2206], VDI 2211 [VDI 2211], VDI 2209 [VDI 2209] und VDI 3633 [VDI 3633]. Modelle lassen sich unterscheiden nach Anwendungszweck und Modellierungsebene je Phase der Produktentwicklung (u.a. nach [VWB+09] und [VDI 2249], s. auch Bild 6.26).

³⁵ s. Bild 6.16

³⁶ Details in Kap. 6.9.3.1

³⁷ S. Bild 6.17

Simulationsmodell das mathematisch alle Modellzusammenhänge abbildet. Nach VDI 3633 [VDI 3633] ist „Simulation ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden. Mit Hilfe der Simulation kann das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden (Simulationsmethode).“ Simulation kommt nach VDI 2209 [hier aus VWB+09] zum Einsatz wenn:

- kein reales System verfügbar ist (z.B. in der Entwurfsphase)
- das Experiment am realen System zu lange dauert
- das Experiment am realen System zu teuer ist (z.B. Crashtest)
- das Experiment am realen System zu gefährlich ist (z.B. bei Flugzeugen, Kraftwerken)
- die Zeitkonstanten des realen Systems zu groß sind (z.B. Klimamodelle).

Man kann die **Simulationsmodelle** bspw. nach den zugehörigen bekannten physikalischen Domänen einteilen³⁸:

- Dynamik inkl. Eigenwertprobleme
- Strukturmechanik
- Hydraulik/Pneumatik
- Elektrik
- Thermik
- Strömungsmechanik

Die Modelle der o.a. Domänen sind für aussagekräftige Analysen stets interdisziplinär und miteinander zu koppeln, was mit heutigen Werkzeugen effizient möglich ist (s.u.). Sie dienen dem Auslegen, Nachrechnen und Optimieren mechanisch-physikalischer Strukturen³⁹ in unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung (vgl. dazu MeB1). Berichtet werden v.a. Modelle aus den Domänen Dynamik und Strukturmechanik. Insbesondere die Dynamik ist mit den Domänen Elektrik und Hydraulik/Pneumatik eng verbunden.

Dazu braucht es neben dem Simulationsmodell das **Simulationswerkzeug** (Einteilung nach [DAS06]). Dieses ist im Falle technischer Mehrkörpersimulationsmodelle der Technischen Logistik meistens ein blockorientierter (**abstrahierende Dynamiksimulation – AS**) oder objektorientierter Simulator (**objektorientierte Dynamiksimulation – MKS**)⁴⁰. Es kann auch ein Simulationsprogramm einer bestimmten Systemklasse, wie im Falle der Strukturmechanik (FEM), sein. Die objektorientierten Simulatoren nehmen dem Benutzer oftmals die mathematische Modellbildung⁴¹ durch Submodelltechnik und Bibliothekselemente/-objekte ab.

³⁸ Systematisierung von Simulationsmodellen der Technischen Logistik siehe Kap. 6.5.1.

³⁹ s. Kap. 6.9.4

⁴⁰ detaillierte Differenzierung AS/MKS s. Kap. 6.5.1.3 und [P7]

⁴¹ mathematische Modellbildung als dritter Schritt einer Modellbildung: physikalisch-geometrisch-mathematisch nach [MEY07]

„Eine Systematisierung der Simulation kann abhängig vom eingesetzten Modell (physikalisches, analytisches bzw. numerisches oder grafisches Modell) und abhängig von der Frage, ob eine Rechnerunterstützung sinnvoll oder erforderlich ist, nach [VDI 2209] vorgenommen werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine klare Trennung der verschiedenen Simulationsarten in der Praxis schwer durchzuführen ist.“ [VDI 2209]

Der Prozess des Arbeitens mit dem Simulationswerkzeug ist werkzeugübergreifend ähnlich und wird in Pre-Processing, Berechnung und Post-Processing gegliedert [VDI 3633]. Er ist eingebettet in einen größeren Prozess, der die Modellbildung miteinschließt und iterativ so lange durchlaufen wird, bis die durch simulatorische Lösung des mathematischen Modells erreichten Erkenntnisse mit jenen zur Validierung bereitliegenden (aus Vergleichsrechnungen, Messungen, praktischen Erfahrungen) übereinstimmen⁴².

Die Simulationswerkzeuge bzw. **Softwareprodukte** sind heutzutage durchwegs intuitiv bedienbar, was zwar die Hemmschwelle erniedrigt und „quick and dirty“ Lösungen ermöglicht, aber nicht zur Qualitätssteigerung und Güte der Ergebnisse beiträgt⁴³. Insbesondere die CAD-integrierten Simulationslösungen dienen dieser Vorgehensweise; generell können Simulationswerkzeuge differenziert werden in CAD-embedded-Simulationslösungen und Stand-alone-Simulationslösungen. Verbreitete Werkzeuge nach Einsatzzweck und Produktentwicklungsphase gibt MeB1 (Kap. 3.5.1) an.

Die technischen Simulationswerkzeuge sind wahrscheinlich jene Hilfsmittel, die die meisten technischen Produkte von heute zu dem gemacht haben, was sie sind: funktionssicher, ausfallstolerant, bedienerfreundlich und komfortabel. Man kann für Simulationswerkzeuge ohne Bedenken vom Hauptfortschritt des Engineerings der letzten Jahrzehnte sprechen. Dabei zeichnen sich aktuell einige Trends ab, die v.a. von den oben identifizierten Trendsetter-Branchen automotive und aerospace getrieben werden:

- Verwendung standardisierter Modellierungssprachen wie bspw. MODELICA [MOD05]
- Management von Simulation Content mit Datenverwaltung, Automatisierung der Simulationsläufe und autom. Berichtsgenerierung
- Kopplung von Simulatorwerkzeugen
 - in den Werkzeugen direkt, bspw. flexMKS.
 - über Proprietäre Schnittstellen: MKS-FEM.
 - über FMU bzw. FMI⁴⁴ [MOD14b]: MKS-DEM in [CRR+14].

Die **Aufgabenstellungen** für die Simulationen können zusammengefasst werden:

- Funktionsstrukturen und physikalische Lösungen (u. Prinzipien) virtuell erproben
- Leichtbau ausfallskritischer Komponenten

⁴² s. auch Bild 6.19

⁴³ s. dazu ausführlich Kap. 6.9

⁴⁴ Bei FMI handelt es sich um ein von Daimler lanciertes Vorgehen für den Austausch zwischen Simulationsprogrammen mit C-Code-Generierung eines MKS-Modells zur Verwendung in weiteren Simulationsumgebungen.

- Schwingungsvermeidung in Antriebssträngen und mechanischen Strukturen
- Leistungssteigerung von dynamischen Gewerken (beispielsweise Durchsatzsteigerung, Vergrößerung des Gutspektrums eines Förderers)
- Nachweis von Sicherheiten

2.2.6 CAx*

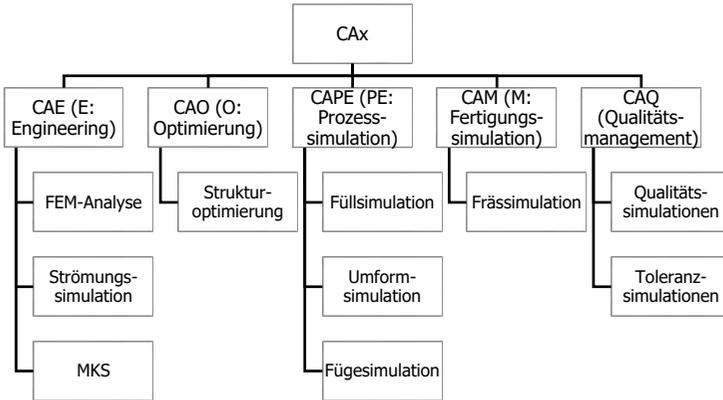


Bild 2.20: Simulationen des CAx (nach [RS12])

Der Begriff **CAx steht für die rechnerunterstützte Produktentwicklung**, worin die rechnerbasierte Simulation einen entscheidenden Stellenwert einnimmt [RS12]. Die Programme des CAx-Bereiches (Bild 2.20: Simulationen des CAx (nach [RS12])) folgen alle dem EVA-Prinzip (Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe), wobei der Datenaustausch zwischen den CAx-Bereichen eine Herausforderung darstellt⁴⁵ [RS12].

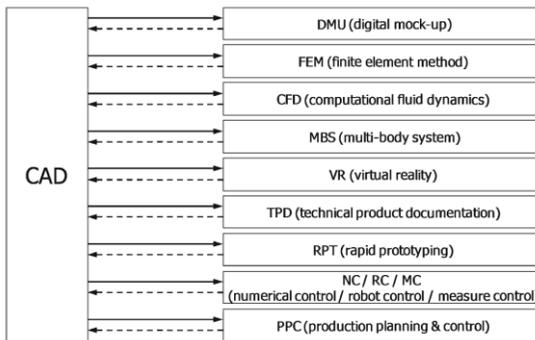


Bild 2.21: Beispiele für Workflows CAD-CAE (nach [HDG+13])

⁴⁵ (s. dazu auch Prozessketten des virtuellen Produkts in Kap. 6.10.2.1)

CAX ist Teil der virtuellen Produktentwicklung und als solches im Engineering der Technischen Logistik vorwiegend im CAD und CAE zu sehen. Das CAD ist das Geometriemodellierungswerkzeug des CAX mit den workflows nach Bild 2.21. Wenn man die Dimensionen des CAE nach Bild 2.21-rechts mit den Simulationen des CAX nach Bild 2.20 vergleicht wird man feststellen, dass eine durchgängige Definition für das „x“ unterschiedlich vorliegt. CAX inkludiert also eine große Spanne von Berechnungs-, Simulations-, Optimierungs-, und Planungswerkzeugen aus unterschiedlichsten physikalischen und organisatorischen Domänen wie Mechanik, Elektrik/Elektronik, Optik, Thermik, Strömungsmechanik bis hin zu Ablaufsteuerung und –planung. In einigen Quellen wird CAX sogar synonymisch für die (virtuelle) Produktentwicklung gebraucht, laut [HIR11].

Nach Einschätzung und Erfahrung des Autors können folgende Bereiche des **CAX für das Engineering in der Technische Logistik** (ohne organisatorisch-planerische Simulationen) als bedeutsam festgemacht werden (s. auch Kap. 2.2.10.2)⁴⁶:

- Das CAD als Geometriemodellierungswerkzeug in 2D (beschränkt zur Geometriemodellierung tauglich – vielmehr als Geometrieabstraktion eingesetzt) und 3D durchdringt die Branche nahezu vollkommen.
- Das CAE ist mit
 - FEM-Strukturmechanik und
 - Dynamiksimulationen (als AS/MKS und DEM) vertreten.
- Weitere Bereiche des „x“ umfassen in der Branche die Produktionsplanung und –steuerung, das CAM mit Fertigungsmaschinenkopplung zu CAD und das rapid prototyping; alle in abfallender Durchdringungstiefe wie gelistet.

2.2.6.1 CAD

CAD dient der Erstellung geometrischer Modelle von Produkten während ihres Lebenszyklus⁴. CAD ist zu einem unersetzbaren **Werkzeug der Produktentwicklung** geworden, das neben (vollständigen) geometrischen Informationen für Domänen des CAX auch geometrische Informationen während des gesamten Produktlebenszyklus⁴ in unterschiedlicher Detaillierung dokumentieren bzw. generieren kann⁴⁷.

VDI 2209 [VDI 2209] ist derzeit das maßgebendste und modernste Kompendium zu Begriffen, Beispielen und Modellierungsstrategien in CAD, neben den wertvollen Ausführungen in [VWB+09] und [RS12]. Die software-orientierte Literatur (u.a. [BRÖ08]) bleibt methodisch-strategisch oberflächlich und liefert größtenteils klick-to-klick Anleitungen und wenig Konzepte. Einen guten Einblick in CAD im Umfeld des automotive engineering liefert [HDG+13].

Einerseits entwickeln die Hersteller der großen CAD-Softwarewerkzeuge laufend innovative und effizienzsteigernde Modellierungswerkzeuge wie bspw. direct-

⁴⁶ [VDI 2223] ordnet den Tätigkeiten des „Entwerfens“ rechnerunterstützte Arbeitsmittel des CAX zu und spezifiziert die Rechnerverwendbarkeit im Konstruktionsprozess (s. Bild 6.26). [EM13] gibt Aufschluss über den Einsatz von CAD im Produktlebenszyklus (s. Bild 6.32).

⁴⁷ Domänen des CAX s. Bild 6.31 und Bild 6.32.

modelling und flexible Modellierung⁴⁸. Andererseits entscheidet aber der methodisch richtige Aufbau von CAD-Modellen maßgebend sowohl über die Variationsmöglichkeiten einer Konstruktion als auch über den Aufwand der Ersterstellung und Adaption. Dem widmet sich MeK4 (Kap. 3.4.4), als eine zu schließende Lücke der Fachliteratur. Die Ausführungen dort beziehen sich auf CAD als Geometriemodellierungswerkzeug im Engineering und sind nicht auf den 2D-CAD-Einsatz für Planungszwecke der Technischen Logistik übertragbar⁴⁹.

2.2.6.2 CAE

CAE-Einsatz ist für die Technische Logistik vor allem der **Mechanik-Simulations-Bereich** des CAx (s. oben) und mit seinen Werkzeugen nur spärlich vertreten und dokumentiert⁵⁰. Die Methoden des Abschnitts 3.5 nehmen sich dieser Lücke an.

2.2.7 Grundlagen zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit FEM*

Das Kapitel wird aufgrund der kompatiblen Nummerierung mit dem Lehranhang hier gelistet. Die Ausführungen dazu sind gänzlich dem entsprechenden Kapitel 6.7 zu entnehmen, da die Methoden der Berechnung (MeB1 bis MeB3) nicht auf technischen Details der Modellbildung und Simulation mit FEM im Detail beruhen, sondern vielmehr Handlungsempfehlungen dafür sind. Kapitel 6.7 gibt den lehrgemäßen Einblick in die Idee von FEM, deren Anwendungsgebiet mit Software-Angebot, Begriffsklärung, Element-Beschreibung, FEM-Theorie und zugehöriger numerischer Integrationsverfahren⁵¹.

2.2.8 Grundlagen, Wirkprinzipien und Submodelle zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit MKS (inkl. DEM)*

Das Kapitel wird aufgrund der kompatiblen Nummerierung mit dem Lehranhang hier gelistet. Die Ausführungen dazu sind gänzlich dem entsprechenden Kapitel 6.8 zu entnehmen, da die Methoden der Berechnung (MeB1 bis MeB3) nicht auf technischen Details der Modellbildung und Simulation mit MKS im Detail beruhen, sondern vielmehr Handlungsempfehlungen dafür sind. Kapitel 6.8 gibt den lehrgemäßen Einblick in die Idee von MKS, die Numerik der Bewegungsgleichungslösung, Submodelle für Reibphänomene

⁴⁸ Evolutionsstufen s. Bild 6.30

⁴⁹ Kap. 6.6.1 stellt Funktionen, Modellarten, Konstruktionsmethoden, Möglichkeiten der externen CAD-Steuerung, Qualitätssicherung für CAD und Grenzen des CAD-Einsatzes dar.

⁵⁰ Die Arten des CAE sind den Ausführungen zu CAx oben zu entnehmen. CAx-Prozessketten sind Teil der virtuellen Produktentwicklung und als solche in Kap. 6.10.2.1 für die Technische Logistik ausgewählt und angegeben. Details der Modellbildung und Simulation mit CAE-Werkzeugen der MKS und FEM sind in den Abschnitten 6.8 und 6.7 einzusehen. Die Rolle der CAE-Simulation im Produktentwicklungsprozess ist in Abschnitt 6.10 dargestellt. CAx-Simulation mit Bild 6.27 und deren Verbreitung mit Bild 6.29.

⁵¹ Relevante Literaturquellen siehe Kap. 3.5.1 – MeB1.

und Kontakte, Güter, Zugmittelgetriebe, Rollen, Rollkontakte und Schienenführungen, Ein- und Ausschleusen sowie einen Exkurs zu DEM in der Intralogistik.

Tabelle 1: MKS-Modellbibliothek „Engineering for logistics“ CAD-CAE [P7]

level	model - function principle	simulation approach
basic function	interaction of loading devices with var. conveyors	MBD, flexMBD
	behavior of parcels	MBD, DEM [FWJ13]
	Wire ropes	FEM, MBD and signalflow [P8]
	(flat)belt drives and belt conveyors	MBD
	chain drives	signalflow and MBD
	tooth belt drives	signalflow
sub-system	carousel system drive	signalflow [P12]
	infeed of parcels on sorters	signalflow and MBD [P11], [JW10]
	discharge of parcels from sorters	MBD [P11]
	discharge of loading devices from conveyors (var. principles)	MBD
	AS/RS dynamics	signalflow [P5]
	piston compressors for tire repair	MBD, flexMBD [LW10]
	tilting arm gripper (charge/discharge in AS/RS)	Signalflow [RKL+04]
	personal rescue device	signalflow and MBD [KL06]
	sorter drives	MBD
	sorter dynamic behavior (wheel-rail)	MBD
system	crawler drives	MBD, flexMBD
	chain hoist (with cranes)	signalflow and MBD [P1]
	overhead transmission – load transposition	signalflow and MBD [FL12]

Die DEM wird zunehmend in der Simulation von Systemen mit vielen Teilen, wie bspw. Paketströmen eingesetzt und kann als alleinige Methode diese Aufgabenstellung beherrschen [FWJ13]⁵².

Tabelle 1 gibt einen prinzipiellen Überblick über die bis dato erstellten **MKS-Basisfunktionen**, -Submodelle und -Systemmodelle mit dem zugehörigen Vorgehen in der Technischen Logistik, worin „signalflow“ die AS bezeichnet und MBD für MKS steht^{53,54}.

⁵² Relevante Literaturquellen siehe Kap. 3.5.1 – MeB1.

⁵³ Für die Bezeichnungen abstrahierende Dynamiksimulation – AS (signalflow) oder objektorientierter Simulator (objektorientierte Dynamiksimulation – MKS) siehe die detaillierte Differenzierung AS/MKS Kap. 6.5.1.3 und [P7].

⁵⁴ Die oben avisierte Submodellbibliothek für Wirkprinzipien und Module der Technischen Logistik ist Tabelle 26 detailliert zu entnehmen.

2.2.9 Aspekte der Arbeit mit FEM und MKS-Simulationsmodellen*

Mit den oben erwähnten „niederschwellig benutzbaren“ CAD-embedded Simulationslösungen, stehen einfach und **effizient benutzbare Werkzeuge** bereit. Der korrekte Umgang mit der Software liegt jedoch immer in der Verantwortung des Bedieners [RS12]. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an den Bediener⁵⁵. Prinzipiell ist aber die Stellung der Simulation innerhalb der Produktentwicklung stets im Auge zu behalten; diese stellt Bild 2.22 anschaulich dar.

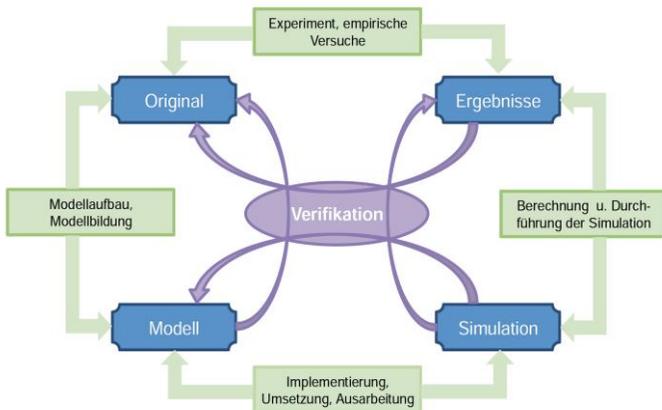


Bild 2.22: Die Stellung der Simulation innerhalb der Produktentwicklung [RS12]

„Die Simulation kann bei richtiger Anwendung die Produktentwicklung vereinfachen und verbilligen, allerdings ist weiterhin der reale Versuch unumgänglich und bildet mit dem virtuellen Versuch eine Einheit.“⁵⁶ [RS12]

Die **Analysemöglichkeiten mit Simulationsmodellen** lassen sich nach [VDI 2211] und [EM13] in Auslegung, Nachrechnung und Optimierung unterteilen (s. auch MeB1 in Kap. 3.5.1).

Mit der **Sensitivitätsanalyse** können „die Auswirkungen einer innerhalb eines als zulässig erachteten Rahmens vorgenommenen Parametervariation auf das Endergebnis hinsichtlich der Gültigkeit und Richtigkeit sowie der Empfindlichkeit gegenüber den Parametervariationen ... untersucht werden.“ [LIN05] Sie wird zur Entscheidungsvorbereitung bei fast allen Verfahren der Bewertung angewandt. Sie ist vorrangig vorzunehmen, wenn die Aussagen aus bestimmten Gründen mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind. [LIN05].

⁵⁵ Detailliert in Kap. 6.9 und 6.9.1 gelistet.

⁵⁶ Die Kapitel 6.9.2, 6.9.3 und 6.9.4 richten sich an die im Bild 2.22 abgebildeten Kategorien „Verifikation“, „Ergebnisse“ und „Berechnung“. Zur „Modellbildung“ sei auch noch auf Kap. 6.4, 6.5, 6.7 und 6.8 verwiesen

Die **Optimierung** setzt ein, wenn mit der Sensitivitätsanalyse der Einfluss von Parameteränderungen bekannt ist [VDI 2211]. Sie kann mit einer Optimierungsschleife durchgeführt werden und unterschiedlichste Ziele verfolgen. Stand der Technik sind gegenwärtig Struktur- und Topologieoptimierungen bspw. mit bionischen Prinzipien⁵⁷.

Die **Ergebnisinterpretation** zählt mit der Verifikation und Validierung zum Post-Processing. Dafür sind Modelle und Vorgehensweisen bekannt (z.B. nach [DS08]) und die Erfahrung des Berechners tritt hinzu. Bei den technischen Simulationslösungen wird die Validierung oftmals durch einen Vergleich mit messtechnisch unterschiedlichst erfassten Größen durchgeführt. Bild 2.23 zeigt die messtechnische Erfassung der Geschwindigkeit eines KLTs auf einem Rollenförderer mit den angegebenen Parametern und unterschiedlichen Messprinzipien. Insbesondere im dargelegten Fall der optischen Erkennung des KLTs und dessen rückgerechneter Geschwindigkeit handelt es sich um einen neuartigen Ansatz⁵⁸.

Alle **Ergebnisse von Simulationen** stellen hier die „vorhandene linke Seite“ einer Auslegungs- oder Nachrechnung dar (vorhanden < zulässig), bei der die „rechte Seite“ durch die zulässigen Werte gebildet wird. Dafür existieren im Engineering umfassende Regelwerke, wie bspw. die FKM-Richtlinie [FOR03] oder [SAN08]. Erst damit werden die Ergebnisse der Simulation quantitativ bewertbar.

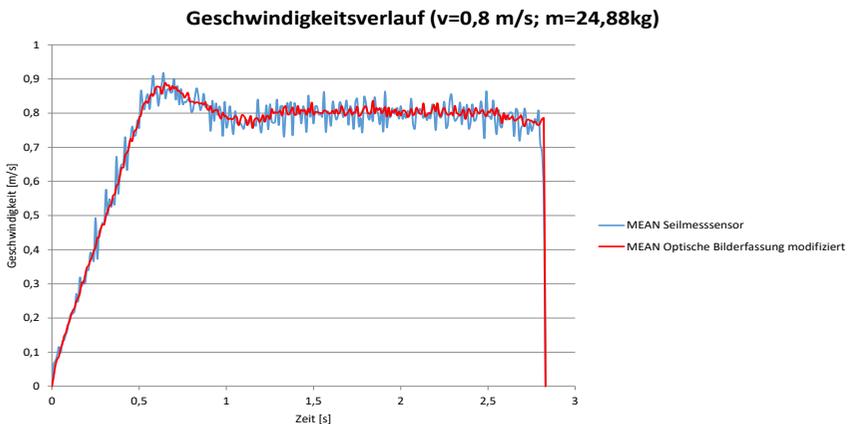


Bild 2.23: Geschwindigkeit eines KLTs auf einem Rollenförderer zum Abgleich mit einem MKS-Simulationsmodell (vgl. Kap. 4.2.3)

⁵⁷ Beispiel einer Simulationsoptimierungsschleife mit Bild 6.64 und zur bionischen Topologieoptimierung eines Rundstahlkettengliedes mit Bild 6.34.

⁵⁸ Kap. 6.9.3.1 gibt Aufschluss über weitere Schritte der Ergebnisinterpretation wie Plausibilitätsprüfung und interne Validität.

2.2.10 Arten der Produktentwicklung*

Die Entwicklung von Produkten des Maschinenbaus und der Technischen Logistik ist zunehmend interdisziplinär und kann sowohl eine Neu- als auch Varianten- bzw. Anpassungsentwicklung sein. Durch die Fülle der Aufgaben ist die effiziente Organisation der Entwicklung ein Schlüssel zum wirtschaftlichen und technischen Erfolg des Produktes. Dazu existieren unterschiedliche Ansätze von denen relevante hier angeführt sind.

2.2.10.1 Produktentwicklung

Ein grundsätzliches Dilemma der Produktentwicklung besteht nach [LIN05] darin, dass die Festlegung bestimmter Produktmerkmale (z.B. Abmessungen) zu einem Zeitpunkt erfolgt, zu dem daraus resultierende Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit oder Herstellkosten noch kaum ermittelt werden können. Daher müssen Erfahrungen und Wissen um aus vergangenen Projekten gewonnene Informationen erweitert werden, um zukünftige Produkte mit höheren Anforderungen erfolgreich zu realisieren (Bild 2.24).

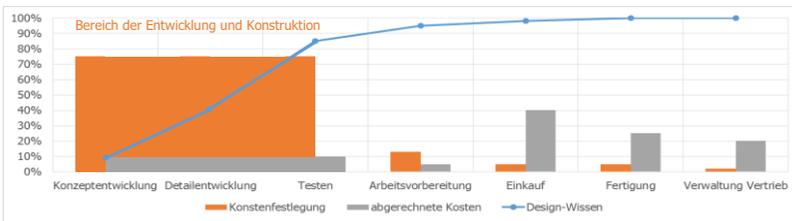


Bild 2.24: Produktkostenfestlegung und -entstehung im Kontext des Design-Wissenszuwachses nach [CP99] mit [ES05], [EKL+14]

Planerische Ansätze in der Produktentwicklung (PE) beziehen sich auf die inhaltliche, zeitliche/terminliche und die Kostenplanung und helfen die PE-Prozesse zu beherrschen.

Mit den **Strategien der PE** sollen weiters die Prozesse beschleunigt, die Produktqualität verbessert, die Kosten gesenkt und die Flexibilität erhöht werden. Dazu zählen die übergeordneten Strategien der integrierten Produktentwicklung (s.u.), des Projektmanagements und das Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering, Cross Enterprise Engineering. Sie ermöglichen systemorientiertes Arbeiten, zielgerichtetes Vorgehen und beschreiben Vorgehens- und Verhaltensweisen. Das reverse engineering versucht aus einem physikalisch vorliegenden Objekt eine abstrakte Beschreibung abzuleiten.

Während der **PE-Prozess** des Maschinenbaus sehr allgemein und grobgranular formuliert ist (s. Bild 2.27 und vergleiche Bild 2.25) kann er im Bereich automotive, aufgrund der Ähnlichkeit zu seiner Vorversion, spezifischer formuliert werden. Die PE-Prozesse in der Logistik richten sich nach den allgemein gültigen des Maschinenbaus und sind noch nicht näher definiert. Das Methodeneinordnungsmodell (Kap.3.3) kann einen ersten Beitrag dazu liefern!

Die Methoden der Produktentwicklung entstammen, wie die beschreibende Fachliteratur, größtenteils dem Bereich automotive und sind auf Bereiche des allgemeinen Maschinenbaus übertragbar. Quellen dazu sind [EM13], [LIN05] und [RS12].

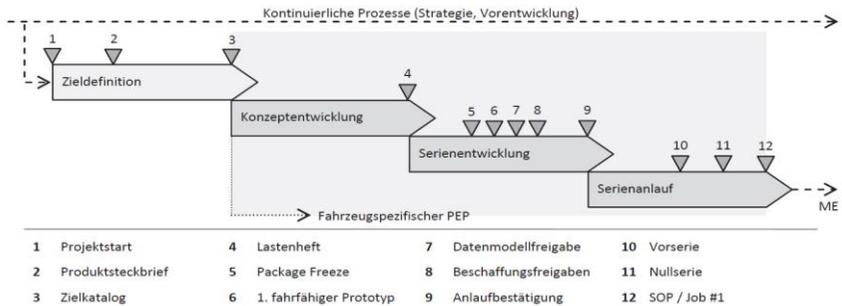


Bild 2.25: Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie nach [SCH11]

2.2.10.2 Virtuelle Produktentwicklung

Der PE-Prozess hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Als Teil des 'Produktlebenszyklus' ist darin die Abnahme fachlich-kreativer Ingenieurstätigkeiten zu beobachten [ES09]. Dem wird versucht durch zunehmenden IT-Einsatz zu begegnen um schwerpunktmäßig die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklern und die Herausforderungen durch erhöhte Produktkomplexität und individuelleren Kundenanforderungen zu bewältigen bzw. optimieren. Organisatorische Ansätze wie simultaneous und cross enterprise engineering zur Parallelisierung vormals sequentieller Prozesse bringen nur durch den heute verbreiteten IT-Einsatz Effizienzsteigerungen in der Produktentwicklung.

Im Umfeld der multidomänen und interdisziplinären Art moderner Produkte („Mechatronik“) sind in den jeweiligen Bereichen (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software und Dienstleistung) unterschiedlichste Methoden und **Werkzeuge der Produktentwicklung** beheimatet. Für ein erfolgreiches (Gesamt)Produkt sind nicht nur in der Entwicklung sondern auch in Marketing, Fertigung bis hin zum Recycling Querschnittssichten und integrierende Prozesse zur Beherrschung der Komplexitäten genauso notwendig, wie die Spezialisten in den einzelnen Domänen⁵⁹.

Die IT-Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung müssen nach [ES09] v.a. die Anforderung nach Integration über den ganzen Lebenszyklus hinweg erfüllen und interdisziplinär sein. Dann kann das Produktwissen frühzeitig erhöht werden (vgl. Bild 2.24). Wenn ein Produkt dann virtuell vorliegt ergibt sich ein mehrfacher Nutzen⁶⁰. Die räumliche Verständlichkeit kann gesteigert werden und weitere Produktdaten sind für integrierende Prozesse ableitbar (CAX-

⁵⁹ Vgl. dazu auch Kap. 6.10.3.

⁶⁰ Einordnung nach Bild 6.69

Prozessketten). Für das Engineering der Technischen Logistik werden die folgenden CAx-Prozessketten (nach [AND10]) als relevant angesehen⁶¹:

- CAD-TPD (Technische Produktdokumentation)
- CAD-FEM bzw. CAD-Berechnung
- CAD-MKS

Mit ihnen kann die Verarbeitung von Informationen verknüpft und dargestellt werden um ein Prozessziel zu erreichen.

Die Datenmengen der CAx-Prozessketten und der IT-Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung werfen Fragen nach deren **Organisation** auf. Damit beschäftigt sich im Rahmen der Produktlogik die Produktdatentechnologie mit den zugehörigen Managementsystemen (PDM/PLM, SDM, FDM⁶²).

Zu den **Strategien der PE und damit des virtual engineering** zählen:

- Simultaneous engineering
- Concurrent engineering
- Frontloading
- Cross enterprise engineering

Vor allem das **simultaneous engineering** ist ein weit verbreiteter Ansatz, um durch überlapptes/paralleles Bearbeiten Entwicklungszeiten zu verkürzen. Die entscheidende Frage für die Parallelisierung von Aufgaben lautet nach [VDI 2209]: „Wann sind die Ergebnisse der vorlaufenden Aufgabe so weit stabil, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung und die damit verbundenen Änderungskosten geringer sind als die Kosten, die durch zu spätes Weiterarbeiten verursacht werden?“ Für die erfolgreiche Parallelisierung muss ein ständiger Informationsaustausch zwischen allen Beteiligten stattfinden. Das 3D-CAD-System mit seiner allen zugänglichen und aktuellen gemeinsamen Datenbasis ist daher das wichtigste Hilfsmittel bei der parallelen Bearbeitung. Der Änderungsaufwand aus beispielsweise FEM-Erkenntnissen wird umso geringer, je integrativer Engineering betrieben wird – spricht simultaneous engineering eingeführt ist – und je leistungsfähiger das Datenmodell und die Handhabung der Daten durch unterstützende System (PDM, SDM) ist⁶³. Simultaneous engineering reduziert nicht notwendigerweise den Aufwand an man-power für ein Vorhaben, aber in jedem Fall reduziert es den Zeitbedarf der Bearbeitung [HIR11]. Für den Bereich der Technischen Logistik sind keine Zahlen der Verbreitung von Simultaneous engineering bekannt, wie für Maschinenbau, Medizintechnik, u.a.⁶⁴.

Es liegt aber die Vermutung nahe, dass aufgrund des hohen Zeitdrucks in der Branche bei den vorwiegend aus Variantenkonstruktionen bestehenden

⁶¹ Detaildarstellung in Kap. 6.10.2.1 nach der Entwurfsmethode SADT.

⁶² Details s. Kap. 6.10.2.2

⁶³ Bild 6.76 Integration von PDM- und SDM-Konzepten [RS12]

⁶⁴ s. Kap. 6.10.2.3

Projekten simultane Prozesse zwischen den folgenden Bereichen zu finden sind⁶⁵:

- Projektierung auf Layout-Ebene (Materialflussrechnung)
- Produktkonfiguration durch Variantenkonfiguration
- Einkauf
- Fertigungsplanung u- Fertigung

[BSW+09] spricht von einer Ablöse des simultaneous engineering ab dem Jahre 2005 durch das Cross enterprise engineering (CEE). Da aber wesentlich simultaneous engineering in der Praxis des Fachbereichs noch nicht gepflegt wird, ist CEE nicht als dessen Ablöse sondern Ergänzung zu sehen. Die verteilten Entwicklungsprozesse des CEE sind sicherlich in der virtuellen Produktentwicklung evident und werden bis hin zur Fertigung in der Praxis gelebt.

2.2.10.3 Integrierte Produktentwicklung

Die zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen/ Hilfsmittel wird als integrierte PE (IPE) bezeichnet. Genutzt wird sie von ganzheitlich denken-den Produktentwicklern, mit den Bereichen Mensch/Technik/Organisation/Methodik [EM13]⁶⁶.

2.2.11 Aspekte der Konstruktion*

Konstruieren bedeutet nach [VDI 2221]: Die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen – ausgehend von einer Aufgabenstellung – die zur Herstellung und Nutzung eines Produkts notwendigen Informationen erarbeitet werden und die in der Festlegung der Produktdokumentation enden. Diese Tätigkeiten schließen die vormaterielle Zusammensetzung der einzelnen Funktionen und Teile eines Produkts, den Aufbau zu einem Ganzen und das Festlegen aller Einzelheiten ein.

Methodisches Konstruieren ist nach [EM13]:

1. Planmäßiges und schrittweises Erarbeiten der Herstellungs- und Nutzungsunterlagen eines Produkts.
2. Lehre zum planmäßigen und systematischen Vorgehen beim Konstruieren.

⁶⁵ Die weiteren Strategien concurrent engineering, frontloading und cross enterprise engineering sind in Kap. 6.10.2.3 dargelegt

⁶⁶ Details s. Kap. 6.10.3 und Bild 6.80. Das **Design for X** (DFX: Kap. 2.2.11.3) kann im Falle der logistikkonformen bzw. logistikintegrierten PE [SCH11] ebenfalls als integrierendes Vorgehen betrachtet werden.

2.2.11.1 Methodisches Konstruieren – Ziele und Methoden

Technische Ziele:

- Hilfestellung bei der Entwicklung von neuartigen Produkten
- Hilfestellung bei der Entwicklung von besseren Produkten mit optimalem Kundennutzen / Kundenkosten

Organisatorische Ziele:

- Rationalisierung der Konstruktionsarbeit
- Verkürzung der Konstruktionszeit und der Produktlieferzeit
- Erleichtern von Teamarbeit
- Erleichterung des interdisziplinären Arbeitens
- Nachvollziehbar machen von Konstruktionen
- Objektivierung der Konstruktionsarbeit
- Verbesserung rechnergestützten Konstruierens
- Verkürzung der Einarbeitungszeit für Konstrukteure

Persönliche Ziele:

- Hilfestellung in neuartigen Situationen
- Steigerung der Kreativität
- Nachvollziehbar machen von Konstruktionen
- Erweiterung des Problembewusstseins
- Verbesserung der Präsentation der Konstruktion gegenüber Vorgesetzten, Kunden, ...
- Erleichtern des Überblicks über das ständig wachsende Fachgebiet
- Einarbeitung in ein neues Produktspektrum

Didaktische Ziele:

- Lehrbar machen des Konstruierens
- Rationalisierung der Lehre

Bild 2.26: Ziele des methodischen Vorgehens beim Konstruieren nach [EM13]

[EM13] identifiziert vier **Ziele des methodischen Vorgehens** beim Konstruieren mit Bild 2.26. Dazu existieren eine Vielzahl von einzelnen **Methoden und subsummierende Methodiken**, die vor allem im deutschen Hochschulwesen entwickelt wurden, die nach [LIN09] eingeteilt werden in⁶⁷:

- Elementare Handlungsabläufe
- Modelle auf Arbeitsschrittebene – operative Arbeitsschritte
- Phasen- und Arbeitsschrittmodelle

Die ersten beiden Vorgehensmodelle sind im wenig komplexen, aber detailbehafteten Bereich angesiedelt. Die meisten Phasen- und Arbeitsschrittmodelle lassen sich in einem vierstufigen Ansatz zusammenfassen (Bild 3.15). Diese Konstruktionsphasen treten nicht bei jeder Konstruktionsart auf. Aufschluss darüber gibt der folgende Abschnitt⁶⁸.

Das **Vorgehen** beim Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte nach VDI 2221 [VDI 2221] ist das am weitesten verbreitete [EM13]⁶⁹. Es gilt für die Neukonstruktion von Produkten und stellt über den Produktentwicklungsprozess hinweg Hilfsmittel und Methoden bereit. Elektronische Unterstützung des Vorgehens ist möglich, wie bspw. mit der VDI-app (Kap. 6.11.1.9)⁷⁰. Die VDI 2221 benutzt die im Folgenden kurz beschriebenen vier Methodenarten, die in MeK2 für unterschiedliche Konstruktionsarten als für das Engineering in der Technischen Logistik geeignet empfohlen werden.

⁶⁷ Bild 6.8 gibt einen Überblick über die Strukturierung von konstruktionsmethodischen Vorgehensmodellen. Methoden dazu sind in Kap. 6.11.1.3 und 6.11.1.4 sowie in Kap. 6.11.1.9 angegeben.

⁶⁸ Weiterführendes in Kap. 6.11.2.1

⁶⁹ Weiterführendes und Kritisches zu [VDI 2221] in Kap. 6.11.1

⁷⁰ Weitere IT-Werkzeuge für das methodische Konstruieren s. auch Kap. 6.11.1.9

Die folgende Kurzbeschreibung nach Tabelle 2 mit Verweisen auf weiterführende Informationen schafft Begriffsklarheit für die Entwicklung von MeK2 (Kap. 3.4.2)⁷¹.

Tabelle 2: Einzelne Methoden der methodischen Konstruktion mit Beschreibung als Basis für MeK2 (Kap. 3.4.2)

	Methoden	Beschreibung
Analyse und Zielvorgabe	MeK1	Technische Anforderungsdefinition aus und simultaneous engineering für die Logistik, s. Kap. 3.4.1
	Anforderungsliste⁷²	„Schriftlich formulierte Sammlung der Anforderungen an ein Produkt. Die Anforderungsliste wird aufgrund einer Aufgabenstellung oder eines Pflichten-(Lasten-)hefts zu Beginn des Entwicklungs- und Konstruktions- bzw. Produkterstellungsprozesses erarbeitet und während dieses Prozesses laufend auf dem neuesten Stand gehalten.“ [EM13], [VDI 2221] Eine Anforderung ist nach [LP08]: „Geforderte Eigenschaft in Bezug auf das zu entwickelnde Produkt oder den Entwicklungsprozess. Anforderungen lassen sich formal durch Merkmale und Ausprägungen ausdrücken.“ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Kap. 4.1 , Zur Anforderungsklärung weiterführend siehe [LIN05].
	Online-Surveys	Ein Online-Survey ist allgemein eine Umfrage die sich digitaler und web-basierter Struktur bedient. Online-Surveys sind weit verbreitet und werden von unterschiedlichsten Gruppen genutzt [SUR14]. Für das Erheben von Anforderungen sind sie vor allem bei verteilt arbeitenden Teams und beim Einbeziehen von Kunden, externen Partnern und Experten ein Hilfsmittel, um Anforderungen für die Anforderungslisten zu erheben. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Kap. 4.1

⁷¹ Von den papiergebundenen Sammlungen ist neben den VDI 2221ff. Regelwerken noch die Sammlung in [EM13] hervorzuheben. Sie ordnet die Methoden des Fachbereichs übergeordnet in drei Gruppen (Tabelle F71) mit folgenden Problemarten und bewertet sie nach Anwendbarkeit, Anwendungsgebiet und ordnet sie einer der vier Prozessphasen der Tätigkeit „Konstruieren“ im PEP zu, womit eine Auswahl ermöglicht wird:

Tabelle F71: Methodensammlung nach [EM13]

Methodenart	Tätigkeit	
Allgemein anwendbare Methoden	Systemmodellierung	
	Basismethoden für Prozesse	
	Analyse und Strukturierung	
	Beurteilung und Entscheidung	
	Information	
Organisatorische Methoden	Aufbauorganisation	
	Ablauforganisation	
	Rationalisierung	
Sachgebundene Methoden	Qualität	Kombination
	Vorgehen	Gestaltung
	Produktplanung	Analyse
	Aufgabenklärung	Beurteilung und Entscheidung
	Aufgabenstrukturierung	Information
	Lösungssuche	Kostengünstig Konstruieren

⁷² Anforderungsliste als einfachste Form des Managements von Anforderungen an komplexe Produkte. Anforderungsmanagement ist Teil des Systems Engineering (s. u.a. Kap. 2.2.12)

	Reverse Engineering	„In Fällen, in denen zur Herstellung von Erzeugnissen keine Computermodelle, Pläne und Produktbeschreibungen verfügbar sind, müssen diese aus dem Bestehenden „bottomup“ abgeleitet werden. Das Reverse Engineering analysiert deshalb im Gegensatz zum Forward Engineering nicht die Aufgabenstellung, sondern die Lösung. Der angelsächsische Begriff Reverse Engineering (rückwärts entwickeln) bezeichnet diesen Prozess, bei welchem ein derartig bestehendes System analysiert wird, um dessen Teile, Aufbau, Strukturen, Zustände, Verhaltensweisen und Eigenschaften möglichst für die Aufgabenstellung ausreichend exakt abzubilden. Auf diese Weise wird aus einem physikalisch vorliegenden Objekt eine abstrakte Beschreibung abgeleitet. Diese dient der Rekonstruktion des Systems oder bildet den Ausgangspunkt für Optimierung und Weiterentwicklung. Im Maschinenbau und bezogen auf produktionstechnische Güter dient das Reverse Engineering hauptsächlich der Rekonstruktion von geometrischen Flächen, ausgehend von physikalisch vorliegenden Teilen, um letztlich die Teilegestalt hinreichend genau zu beschreiben.“ [RS12]
Generieren v. Lösungsideen	MeK3	(rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien, siehe Kap. 3.4.3
	Morphologischer Kasten	„Spezielles eindimensionales Ordnungsschema zur übersichtlichen Darstellung eines Spektrums an Teillösungsideen und den daraus abgeleiteten Lösungskonzepten. Der Morphologische Kasten ordnet in einer tabellenartigen Struktur den Teilfunktionen die jeweils zugehörigen Teillösungsideen zu. Gesamtkonzepte lassen sich als Pfade darstellen, die einzelne Teillösungen miteinander verbinden (Definition von F. Zwicky).“ [LP08] <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Kap. 4.1 (auch Bild 6.108, Bild 6.110 und Bild 6.111)
	Konstruktionskatalog	„Sammlung bekannter und bewährter Lösungen auf Wirk- oder Bauebene. Konstruktionskataloge zeichnen sich vor allem durch eine systematische Ordnung der beinhalteten Einträge in einen Gliederungsteil, Hauptteil und Zugriffsteil aus.“ [LP08] nach [ROT00]. (Beispiel siehe Kap. 6.12.2.1, Bild 6.124 und Bild 6.138)
Bewertung und Entscheidungsfindung	FMEA	„Methode zur präventiven Erkennung und Bewertung von vorhandenen und potenziellen Schwachstellen im betrachteten System (Produkt oder Prozess), um daraus gezielt Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Risikominimierung abzuleiten.“ [LP08] <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Kap. 4.1
	Nutzwertanalyse	„Differenzierende Methode zur Lösungsbewertung, der Gewichteten Punktbewertung sehr ähnlich. Ein besonderes Merkmal ist die hierarchische Strukturierung der Bewertungskriterien, verbunden mit einer Kriteriengewichtung. Der Einsatz der Methode bietet sich besonders bei einer großen Zahl von Bewertungskriterien an, um dem Zielsystem eine übersichtliche Struktur zu geben [LIN09].“ [LP08] <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Kap. 4.1 (Bild 6.111)
	Paarweiser Vergleich	„Einfache Methode zur Lösungsbewertung, die auf einem direkten Vergleich von jeweils zwei Lösungsideen bezüglich eines einzigen Kriteriums beruht. Hieraus lässt sich eine Rangfolge der Lösungsalternativen nach ihrer Eignung ableiten [LIN09].“ [LP08] Durch lediglich zwei Bewertungsobjekte weitestgehende Ausschaltung von Subjektivität. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiel siehe Einsatz der Variantenanalyse-app
	Variantenanalyse-app	Details siehe „Hilfsmittel“ in Kap. 2.2.14.1 und [P3] (Kap. 6.14.1)

	technisch-wirtschaftliche Bewertung	„Diese Bewertung nach VDI 2225 [VDI 2225] ist verbreitet, da sie sehr anschaulich im „Stärke-Diagramm“ die Einordnung der Lösungsvarianten hinsichtlich eines Idealpunktes S mit der technisch-wirtschaftlichen Wertigkeit 1 zeigt.“ [EM13] Die Trennung von Technik und Wirtschaft führt zu konkreten ökonomischen Aussagen von einzelnen Varianten. „Dazu wird die bei der technischen Wertigkeit der Bezug zu einer Ideallösung und bei der wirtschaftlichen Wertigkeit der Bezug zu Vergleichskosten hergestellt.“ [LEH99] <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiele siehe [FEL13a] und [VDI 2225]
Entwicklungs-unterstützung	CAD	CAD ist als Geometriemodellierungswerkzeug etabliert und bekannt. Die Funktionalitäten sind in der Literatur ausreichend beschrieben (siehe auch Kap. 6.6.1). Im Kontext mit der Methode MeK4 – methodisches CAD wird in Kap. 6.6.1 auf Modellierungsstrategien in Bezug auf die Konstruktionsarten zur durchgängigen Änderbarkeit der CAD-Modelle und die Voraussetzungen für automatische Konstruktion (KBE und KBx – s. 0) eingegangen.
	Numerische Simulation	„Modellierung physikalisch-technischer Abhängigkeiten mittels partieller Differenzialgleichungen und Diskretisierungsmethoden; Bestimmung des Systemverhaltens ohne physischen Prototypen.“ [LP08] Mit der Methode MeB1 – Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik wird auf den Bereich Dynamiksimulation (MKS) weiter eingegangen. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beispiele siehe Kap. 4.3.3 (Theorie in Kap. 6.7 und 6.8)
	Versuch	„Verfahren zur Analyse von Produkteigenschaften anhand physischer Verifikationsmodelle wie Prototypen oder Nullserienmuster.“ [LP08] Notwendig für die Validierung von Simulationsmodellen.

2.2.11.2 Differenzierung der Konstruktion nach ihrem Einsatz - Konstruktionsarten

Wenn man eine Konstruktionsaufgabe nach ihrem Aufwand und damit dem Grad der Änderung bzw. Neuheit differenziert ergeben sich die Konstruktionsarten. [RS12] differenziert diese am detailliertesten in⁷³:

- Innovation
- Neukonstruktion
- Anpassungskonstruktion
- Variantenkonstruktion
- Wiederholkonstruktion

Die Variantenkonstruktion ist zurzeit im Allgemeinen die Häufigste (s. Bild 2.28). Für die Technische Logistik liegen diese Daten nicht vor, es kann aber angenommen werden, dass dies ebenso zutrifft und auch die Wiederholkonstruktion relevanten Anteil hat. Für die Technische Logistik können Gewerke nach der 4-Ebenen-Strukturierung (Kap. 2.2.3.3 mit Bild 2.17) differenziert werden; dann entsprechen den Größen der Gewerke die Konstruktionsarten wie in Bild 2.27 dargestellt.

⁷³ Details siehe Kap. 6.11.2. Begriffe, Funktionen und Vorgehensweisen des Produktprogramms, der Produktfamilien, des Variantenmanagements und zur Bauweisen von Produkten siehe Kap. 6.11.2.2.

Anlagen:

- Logistische Anlagen sind fast in jedem Projektierungsfall Einzellösungen. Zur Erfüllung der Funktionen werden dafür aber meist standardisierte, bewehrte Lösungsprinzipien der Funktionen eingesetzt werden. Somit handelt es sich hier um die **Anpassungskonstruktion**.

Maschinen:

- Da meist aus bestehenden Produktspektren eine Anlage assembliert wird, handelt es sich hierbei um die **Variantenkonstruktion**, wenn lediglich Baugrößen u. dgl. adaptiert werden.
- Kommen Produkte eines Portfolios unverändert zum Einsatz handelt es sich um die **Wiederholkonstruktion**.
- Wenn neuartige Lösungen die geforderten Funktionen der Maschinen erfüllen, also neue materialflusstechnische Produkte zum Einsatz kommen, sind diese Teil der **Neukonstruktion**.

Baugruppen:

- Für die Baugruppen gilt **selbiges der Maschinen** entsprechend der Größenanpassung.
- Da es sich hier oftmals um Elemente der Antriebstechnik handelt sind Baugruppen nicht nur den Größen- sondern auch den Leistungsanforderungen anzupassen. Dabei kann es je nach zu übertragender Energiedichte nötig sein, neue Lösungsprinzipien zu verwenden – **Neukonstruktion**.

Komponenten:

- Für die Komponenten gilt **selbiges der Baugruppen**.

Bild 2.27: Zuordnung der vier Größen technisch-logistischer Gewerke zu Konstruktionsarten



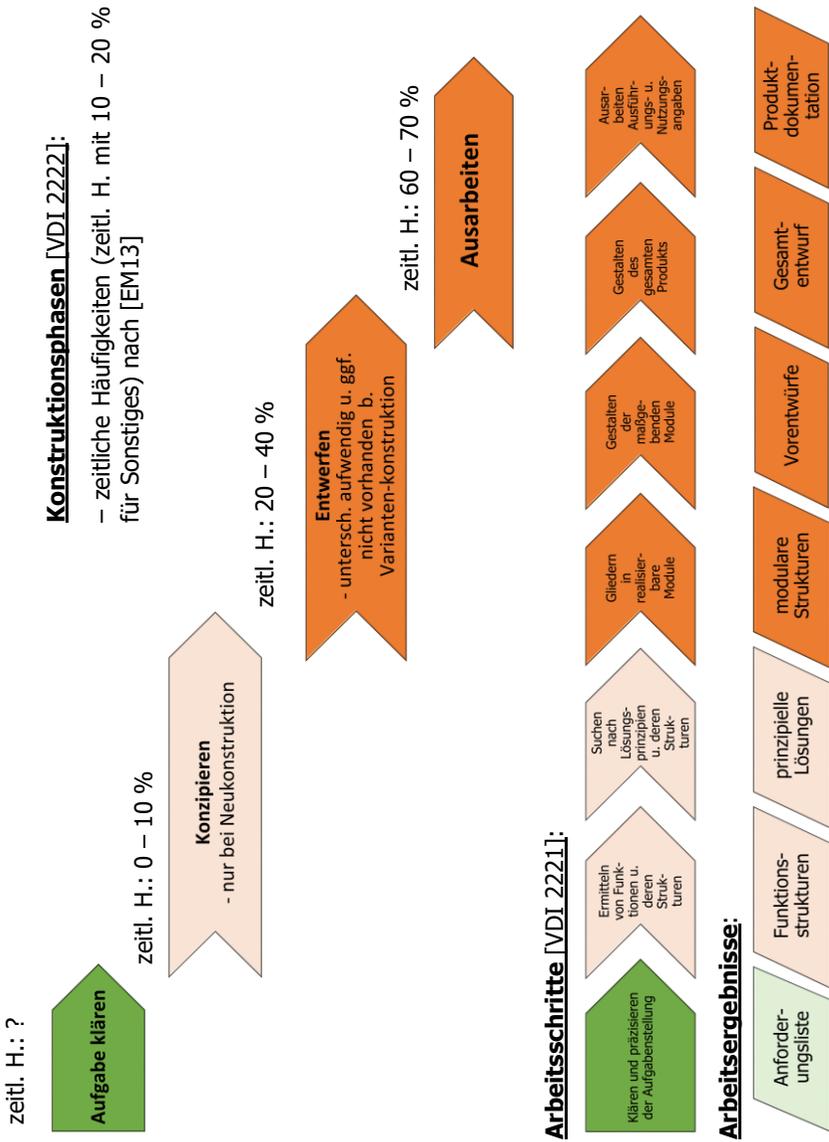


Bild 2.28: Produktentwicklungsprozess (links) und VDI-Konstruktionsmethodik VDI 2221 mit Berücksichtigung der Konstruktionsart und der zeitlichen Häufigkeit (unten)

2.2.11.3 Rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen

Während das **wissensbasierte Konstruieren** – Knowledge-based engineering (KBE) – für Anpassungs- aber eher Varianten- und Wiederholkonstruktionen geeignet ist (s. Kap. 2.2.11), existieren für die Konzeptionsphase der Neukonstruktion nur wenige bzw. keine wissensbasierten Ansätze. [KR09] sieht darin einen Bedarf. Hierzu wird als Ansatz eine Methode MeK3 „rechnergestützte Bereitstellung und Synthese“ von Lösungsprinzipien vorgestellt (s. Kap. 3.4.3)⁷⁴. Mit einfacheren, tabellenkalkulationsbasierten Lösungen, können zumindest teilweise wissensbasierte Ansätze (bspw. Ausschlusslogiken) formalisiert und umgesetzt werden⁷⁵.

2.2.11.4 Design for X (DFX)

DFX bedeutet grundsätzlich eine **forderungsgerechte Produktgestaltung**. Das „X“ kann für unterschiedlichste Forderungen stehen⁷⁶. Bei unterschiedlichen Forderungen an das zu entwickelnde Produkt kommt es zu multidisziplinären Aufgaben. [EM13] stellt dafür Methoden bereit die auch in Konstruktionsassistenzsystemen realisiert werden können [RS12].

Hervorzuheben ist im Kontext der Technischen Logistik die **logistikgerechte Konstruktion** bzw. Produktentwicklung die gegenwärtig Gegenstand von Forschungsarbeiten ist (Tabelle 3). Untenstehender Überblick fasst die Hauptrichtungen dafür zusammen. In der klassischen DFX-Definition findet sich die Forderungen „transportgerecht“ die jener von „logistikgerecht“ untergeordnet werden kann, da dies noch das „Umschlagen“ und „Lagern“ miteinschließt.

⁷⁴ Durch Verwendung von wissensgestützten und in IT-Systemen realisierten morphologischen Kästen können damit schnell und widerspruchsfrei Varianten von Prinziplösungen bei gegebenen Funktionsstrukturen erzeugt werden. Diese sind dann für Bewertungen oder weitere Detaillierungen in der Phase „Entwerfen“ verwendbar. Mit dem zugehörigen Hilfsmittel „Sylö-app“ kann am Beispiel „Stetigfördererstrecke“ mit gegebener funktionaler Struktur eine Lösungsvielfalt mit unterschiedlichen Förderprinzipien generiert werden. Dabei handelt es sich abgrenzend nicht um eine vollautomatische Konstruktionslösung wie z.B. in [IIL14], deren Verwendung für die Aufgabenvielfalt in der Technischen Logistik nicht sinnvoll erscheint.

⁷⁵ Bild 6.111

⁷⁶ Beispiele dazu sind Kap. 6.11.4 zu entnehmen

Tabelle 3: Forschungsansätze zu „logistigerechter Konstruktion“

Ein einfaches Wiki-System, realisiert in lexiCan® [LEX16], zur Erfassung und Darstellung x-gerechter **Produktmerkmale** und –ansprüche mit Schwerpunkt auf Transport, Montage und Recycling dient als Wissensspeicher für eine logistigerechte Konstruktion⁷⁷.

[PSS05] definiert **Freiheitsgrade der Produktentwicklung** zur Beeinflussung der Logistik und Lösungsansätze/Methoden mit Phasenzuordnung.

[SCH11] vollzieht eine Bewertung auf Logistigerechtigkeit zu Meilensteinen des PEP durch aggregierte, objektive, nachvollziehbare Kennzahl mit einem **Aufzeigen der Defizite** und des Verbesserungspotenzials mit einem Methodenkatalog.

[SCH11] bewegt sich im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Logistik im Umfeld Automobilindustrie und leitet Trends der Branche und Handlungsbedarfe ab. Der Autor spricht von logistikintegrierter Produktentwicklung als **Evolution der fertigungs- und montagegerechten PE** im Rahmen einer integrierten PE (IPE). „Aus der Tatsache, dass mit der Produktentwicklung die Strukturen und Prozesse der Produktions- und Logistiksysteme auf lange Sicht festgelegt werden, leitet sich das Erfordernis ab, die zukünftigen Trends, Herausforderungen und Gestaltungsoptionen der Logistiksysteme in die gegenwärtigen Produktentstehungsprozesse vorausschauend zu integrieren. Folgerichtig nimmt Schulz eine auf die Zukunft (bis in das Jahr 2025) gerichtete Dynamisierung des Referenzmodells einer Logistikintegrierten Produktentwicklung vor. ... Er demonstriert damit ein methodisches Vorgehen für die zukunftsgerichtete Dynamisierung der logistikintegrierten Produktentwicklung“ (Vorwort Prof. Göpfert in [SCH11]). Als wichtig stellt sich die enge Verbindung der logistikintegrierten Produktentwicklung mit SE und IPE dar.

2.2.12 Wissen und dessen Handhabung*

Wissens- und Komplexitätsmanagement ist **Teil des Systems Engineering**: „Systems Engineering oder auch Systemtechnik setzt sich dagegen mit komplexen Systemen aus der Perspektive des Ingenieurs auseinander. Dabei sind ebenfalls starke Überschneidungen mit betriebswirtschaftlichen Fragestellungen und gleichermaßen Herausforderungen des Projektmanagements festzustellen. Systems Engineering befasst sich also nicht nur mit der Beherrschung komplexer Systeme, sondern auch mit der zielgerichteten Bereitstellung der zugrundeliegenden Prozesse in der Produktentwicklung. Die Bedeutung der Informatik, Betriebswirtschaft und der Methoden der Produktentwicklung, etwa Funktionsmodellierung, TRIZ, QFD etc., ist bei einer Betrachtung der Handhabung von Komplexität selbstverständlich ebenso wenig zu vernachlässigen“.⁷⁸ [RS12]

⁷⁷ Beispiel s. Kap. 6.11.4, Bild 6.116

⁷⁸ Die Ausführungen zu Wissen- und Komplexitätsmanagement im Rahmen dieser Arbeit sollen einfache Einstiegsszenarien in die Thematik und probate Werkzeuge dafür aufzeigen. Deren Einsatz ist im Konstruktions- und Berechnungsprozess sinnvoll und für die Erstellung von KBx-Lösungen dringend nötig.

2.2.12.1 Wissen

Zeichen stellen die kleinsten Einheit von **Daten** dar. Unter einem Zeichen versteht man auch das „kleinste bei einer Programmausführung zugreifbare Datenelement“ [HGN92]. Daten selbst können nach [ISO 2382-1] sowohl aus mehreren einzelnen Zeichen, als auch aus einer ganzen Folge von Zeichen bestehen, die in einem sinnvollen, bekannten oder unterstelltem, Zusammenhangstehen. Sie umfassen alle in gedruckter, gespeicherter, visueller, akustischer oder sonstiger Form verwertbaren Angaben über die verschiedensten Dinge und Sachverhalte sind damit die Grundbausteine sowohl für die zukünftige Informationsgesellschaft als auch wissensbasierter Systeme.

Mit Daten alleine kann nicht viel angefangen werden, erst durch das Zutun eines Menschen können sie zu **Informationen** werden. Durch die individuelle Bearbeitung und Interpretation in einem bestimmten Kontext bekommen diese eine höhere Bedeutung und stellen eine logische in sich abgeschlossene Einheit dar. Da Informationen, im Gegensatz zu den Daten, immer nur subjektiv wahrnehmbar bzw. nur subjektiv verwertbar sind, sind Informationen auch stets empfängerorientiert [GÜL03].

Eine anschauliche und sinnvolle Definition für **Wissen**, wie es hier auch weiter verwendet werden soll, findet man in [MIL08]. Wissen ist überprüfbar, fest gegliedert und lässt sich Kategorien zuordnen [GRU02]. Es stützt sich auf Daten und Informationen und ist im Gegensatz zu diesen immer an Personen gebunden [RR03] und weist die Merkmale (nach Bild 6.120) auf:

- Wissen ist eine reichhaltige und wohldurchdacht-strukturierte Sammlung an Informationen
- Wissen ist jene Eigenschaft, derer es bedarf, wie ein Experte denken zu können
- Wissen ist, was einen Experten von einem Laien unterscheidet
- Wissen ist notwendig, um komplexe Aufgaben zu lösen

Bild 2.28: Definitionen zu Daten, Information und Wissen⁷⁹

Zur Thematik des Wissensmanagements im Ingenieurwesen existiert die VDI Richtlinie 5610 [VDI 5610-1]. [HDG+13] fasst den Forschungsstand bezüglich Wissensmanagement in der Produktentwicklung umfassend zusammen. Die Verwendung von Wissensmanagement ist in der Technischen Logistik bisher nicht dokumentiert, aus Projekterfahrungen jedoch teilweise bekannt, zumindest in den hier vorgestellten einfachen Formen des Wissensmanagements (Wiki-Systeme). Problematisch am umgangssprachlichen Gebrauch des Wortes „Wissen“ ist vor allem, dass oft nicht zwischen den drei Begriffen Daten, Informationen und dem eigentlichen Wissen unterschieden wird (s. Bild 2.28). Da die heutige Nutzung von Informations- und Kommunikationstechniken als „Datenverarbeitung“, „Informationsverarbeitung“ und oft auch als „Wissensverarbeitung“ bezeichnet wird, wird nahegelegt, Daten, Informationen und Wissen seien das gleiche [KRC05].

Nach [HDG+13] gibt es drei fundamental unterschiedliche **Arten von Wissen**:

- Faktenwissen (*know-what*) beschreibt Wissen um spezifische Fakten und Vorgänge
- Prozesswissen (*know-how*) stellt das Wissen dar, um Entwicklungsprozesse auszuführen
- Erklärungswissen (*know-why*) ist kausaler Art und kann Zusammenhänge und Kausalketten erklären.

⁷⁹ s. auch Bild 6.119

Wissen kann in verschiedenen **Wissenszuständen** existieren. Die Unterscheidung zwischen explizitem und implizitem Wissen geht Polanyi⁸⁰, der argumentierte, dass Menschen mehr wissen, als sie artikulieren können:

- Implizites Wissen (Tacit Knowledge):
Basiert auf Erfahrung und persönlichen Werten und ist den Einzelnen oft nicht bewusst. Es ist schwer zu beobachten, zu artikulieren und zu formalisieren. Der Wissensinhaber kann dieses nur mit Aufwand ausdrücken, daher ist es stark an ihn gebunden.
- Explizites Wissen:
Ist im Gegensatz dazu schematisch und liegt kodiert vor (Sprache, Formeln, Zeichnungen, ...). Es ist leichter kommunizierbar und kann organisiert werden.
- Individuelles, kollektives Wissen und Unternehmenswissen:
Individuen sind die Träger des Unternehmenswissens. Dieses entsteht durch das Teilen von Wissen der Individuen in und außerhalb von Organisationen.

Implizites und explizites Wissen sind ineinander überführbar.

Der **Wissenstransfer** ist ein Schlüsselfaktor jeder Produktentwicklung [HDG+13]. Vom Wissensinhaber wird Wissen durch Dokumentation zu Daten, die beim Wissensempfänger ähnliches Wissen erzeugen können⁸¹. Der **Dokumentation** kommt eine entscheidende Rolle zu. Die **Wissenslogistik** hat als Kernaufgabe die Verteilung des Wissens nach den logistischen Grundprinzipien. **Wissensmanagement** sorgt für diese logistische Aufgabe mit unterschiedlichsten Hilfsmitteln, die größtenteils IT-basiert sind⁸².

2.2.12.2 Wissensmanagement und Werkzeuge der Wissensrepräsentation

Aktivitäten bzw. **Aufgaben** für systematische Umgang mit Wissen und daher des Wissensmanagements sind nach [VDI 5610-1]:

- Wissen planen, identifizieren und bewerten
- Wissen erzeugen
- Wissen speichern
- Wissen verteilen
- Wissen anwenden

Das Modell des Ingenieurwissens [VDI 5610-1] bildet die Informationen sowie die Beziehungen dazwischen ab⁸³.

⁸⁰ nach [HDG+13] (dort [8]).

⁸¹ Wissensinduktion nach Sammer ([12] in [HDG+13])

⁸² Eine Herausforderung mit **automatisierten Konstruktionslösungen** (KBE und KBx s. Kap. 2.2.13) und im Arbeiten mit verteilten und fluktuierenden Teams in der Entwicklung und Konstruktion ist die Erfassung von implizitem Wissen. Dieses kann naturgemäß nur schwer artikuliert werden; und das nur, wenn der Wissensinhaber bereit zur Weitergabe ist! Explizites Wissen ist formalisierbar oder meist schon derart vorhanden.

⁸³ Die Objekte dieses Modells entsprechen den Regelklassen des KBx in Kap. 2.2.13.3

Unter Wissensmanagement/**Knowledge Management** (KM) versteht man ganz allgemein den Prozess und die dazugehörigen strategischen und operativen Tätigkeiten (s. Aufgaben oben), um vorhandenes Wissen zu verwalten. Dem Wissensmanagement liegt eine Knowledge Base, s. u., zu Grunde. Die Funktion des „Managen“ bemüht sich darum, diese Wissensbasis gezielt zu beeinflussen um das darin enthaltene Wissen zu organisieren und zu strukturieren. Die **Knowledge Base** ist jener Ort, an dem sämtliches Wissen, wo auch immer es im Unternehmen vorhanden ist, vereint wird. [RR03] schlägt vier Grundsäulen vor, wie diese Struktur prinzipiell aussieht und welche ihre Bestandteile sind:

- Begriffe: Konkrete Dinge eines Fachgebietes, wie z.B. Personen, Dokumente,
Organisationseinheiten, Aufgaben, Ideen, etc.
- Attribute: Generelle Eigenschaften der Begriffe
- Werte: Eigenschaften des einzelnen Begriffs, die es von anderen unterscheiden
- Beziehungen: Angaben, wie einzelne Begriffe miteinander zusammenhängen

Knowledge Based Systems (KBS) stellen eine spezifische Klasse von wissensbasierter Software dar. Ein wissensbasiertes System – im technischen Umfeld spricht man auch vom **Expertensystem (XPS)**– bezeichnet ein Programm, das „... Expertenwissen über ein spezielles Fachgebiet speichert, aus dem Wissen Schlussfolgerungen zieht und zu konkreten Problemen des Gebiets Lösungen anbietet, d.h. Aufgaben übernehmen kann, die bisher von Experten gelöst werden mussten. Expertensysteme können große Mengen auch diffusen, vagen und unformalisierten Wissens in problembezogener Weise darstellen, aus diesem auf logischem und/oder heuristischem Weg neues Wissen gewinnen sowie Anfragen zu präzisen und vollständigen Problemstellungen umformulieren und im Dialog mit dem Benutzer Lösungen finden und den Lösungsweg erläutern. Hierbei ist wesentlich, dass die Verlässlichkeit der Lösung überprüfbar ist.“ [BRO03].

[VDI 2209] gibt einige Beispiele für die **Wissensunterstützung der 3D-Modellierung** an⁸⁴, bezieht sich aber nicht auf das allgemeine Engineering oder das wissensbasierte Konstruieren (Knowledge-based Engineering KBE) an sich.

Im Rahmen der Arbeit wird kein neuer Ansatz des Wissensmanagements entwickelt. Auch ist keine Etablierung eines Wissensmanagement-Prozesses vorgesehen (vgl. [VDI 5610-1]). Vielmehr geht es um **Bereitstellung und Zuordnung einfacher Methoden** für erste Schritte des Wissensmanagements im Engineering, für Entwickler, die damit noch nicht vertraut sind (MeW1 in Kap. 3.6.1)⁸⁵!

⁸⁴ s. Kap. 6.12.2

⁸⁵ Die Reihe VDI 5600 mit den Blättern der VDI 5610 plant weitere Regelwerke, die sich mit den Herausforderungen und Lösungen in den verschiedenen Disziplinen des Engineerings im Kontext Wissensmanagement beschäftigen. Die Werkzeuge sind einfach für die Entwicklung und Konstruktion zur Erstellung von Knowledge Bases einzusetzen. Dafür sind keine Wissensexperten und keine große IT-Struktur nötig. Sie sind einzeln und in Teams verwend- und erweiterbar. Ihre formale Gliederung kennt in der Literatur unterschiedliche Ansätze (z.B. [REI10]). Hier soll vorwiegend nach ihrem Einsatz

Für die Entwicklung der Methoden MeW1 und MeW2 (Kap. 3.6.1f.) fasst Tabelle 4 die notwendigen Fachgrundlagen zusammen; die wissensbasierten Techniken der automatischen Konstruktion, die ebenfalls zum Speichern, Verteilen und Anwenden von Wissen dienen sind im folgenden Abschnitt 0 beschrieben.

Tabelle 4: Einzelne Methoden des Wissensmanagements mit Beschreibung als Basis für MeW1 und MeW2 im Themenkreis „wissen“

	Methoden	Beschreibung
Knowledge Bases	Konstruktionskataloge	siehe Kap. 2.2.11.1 (6.12.2.1)
	Auslegungswerkzeuge im Engineering	Sind in Form von Rechenprozessen papiergebunden und ggf. IT-basiert jedenfalls weitverbreitet. Insbesondere wenn Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen damit durchgeführt werden, ist in diesen Prozessen Wissen der Auslegung und deren Optimierung vorhanden. Dieses Wissen ist meist undokumentiert und aufgrund der Form der Auslegungswerkzeuge nicht explizit verfügbar. (Beispiel s. Kap. 6.12.2.4)
Arbeiten mit Wissen – Knowledge Bases	Semantische Netze	Ein semantisches Netz ist ein formales Modell von Begriffen und ihren Beziehungen (Relationen). Semantische Netze sind eine technologische Möglichkeit, Informationen über ein bestimmtes Wissensgebiet so anzuordnen, dass sie sowohl für einen Menschen, als auch für einen Computer interpretierbar sind. Sie sollen die Lücke zwischen natürlicher und formaler Sprache schließen. Ein semantisches Netz kann durch einen verallgemeinerten Graphen repräsentiert werden. „Die Knoten des Graphen stellen dabei die Begriffe dar. Beziehungen zwischen den Begriffen werden durch die Kanten des Graphen realisiert. Welche Beziehungen erlaubt sind, wird in unterschiedlichen Modellen sehr unterschiedlich festgelegt, den meisten Beziehungstypen wohnt jedoch ein kognitiver Aspekt inne.“ [Wik14c] „Semantische Netze verknüpfen Information. ... Sie schränken uns dabei nicht auf eine Baumstruktur und die eindeutige Einordnung eines Objekts in eine Schublade ein. So können wir Themen zusammenhalten und Objektidentität wahren.“ [REI10]
	Tagging und Clusteranalyse	Tags sind Schlagworte, mit denen beliebige Objekte attribuiert werden können. Das Grundprinzip der Cluster-Analyse ist Objekte nach ihren Eigenschaften dynamisch zu gruppieren. Beide Verfahren sind nach [REI10] mit geringem manuellen Aufwand einsetzbar, haben aber Schwächen bei der Begriffsabbildung und – abgrenzung. Sie werden für die Zuordnung in MeW1 daher nicht prinzipiell verwendet. Das Tagging findet aber im Rahmen der Aufbereitung von Normen in der xKBE-app Verwendung, die Clusteranalyse ist im Rahmen der Variantenanalyse (Kap. 2.2.14.1) verwendbar [REI10].
	Ontologien	Ontologien sind die höchste Ausbaustufe von semantischen Netzen und zählen zu den Expertensystemen [REI10]. Im Unterschied zu einer Taxonomie, die nur eine hierarchische Untergliederung bildet, stellt eine Ontologie ein Netzwerk von Informationen mit logischen Relationen dar [WIK14d]. Der Begriff „Ontologie“ wird als solches noch diskutiert und setzt dort fort, wo semantische Netze je nach Komplexität aufhören. [REI10]
	Mind-Mapping	Die Mind-Map dient zur Strukturierung von verschiedenen Themengebieten durch Visualisierungen der Beziehungen zwischen einzelnen Themen. Falls die Begriffe komplexer miteinander verbunden sind spricht man von konzeptuellen Karten, semantischen Netzen oder Ontologien [UNI99]. Sie kann auch zur Echtzeit-

unterschieden werden, Beispiele s. Kap. 6.12.3, eine Einsatzbewertung der Instrumente ist in MeW1 angegeben.

Dokumentation der Ergebnisse von Kreativitätstechniken, wie bspw. des Brainstormings, eingesetzt werden.

Taxon-omien Als Taxonomie in der Informationsverarbeitung werden Klassifikationen bezeichnet, die eine monohierarchische Struktur aufweisen. Dabei wird jeder Klasse nur eine Oberklasse zugeordnet, so dass die gesamte Klassifikation eine Baumstruktur abbildet. In dieser Struktur enthalten die der Wurzel nahestehenden Elemente allgemeine Informationen. Mit einer zunehmenden Verzweigung der Taxonomie wird das darin hinterlegte Wissen immer spezifischer. Durch diese Art der Klassifizierung von Wissensbereichen innerhalb einer Hierarchie entsteht eine einfache Semantik. In Bezug auf Dokumente bzw. Inhalte wird der Begriff Taxonomie für ein Klassifikationssystem, eine Systematik oder den Vorgang des Klassifizierens verwendet. Klassifizierungen können beispielsweise durch die Erfassung von Metadaten und/oder die Verwendung einer Ablagestruktur vorgenommen werden. [WIK14e]

Wiki-Systeme „Als wesentlicher Unterschied zu anderen Content-Management-Systemen (CMS⁸⁶) bietet Wiki-Software weniger Gestaltungsmöglichkeiten für Layout und Design der Webseiten. Primäre Funktion ist hingegen ein Bearbeitungsmodus für jede Wiki-Seite, der es auch einem Neuling erlaubt, ohne große Einarbeitung Text und Inhalt der Seite zu ändern. ... Im Unterschied zu den Content-Management-Systemen (CMS) mit ihren teils genau geregelten Arbeitsabläufen ... , setzen Wikis auf die Philosophie des offenen Zugriffs: idealerweise kann jeder Nutzer jeden Eintrag lesen und bearbeiten. Wikis gelten als gegenüber einem klassischen CMS dann im Vorteil, wenn eine hohe Anzahl an Nutzern Informationen einstellt, so dass im Medium eine kritische Masse erreicht wird und es zu einem „Selbstläufer“ wird. Es gibt aber auch Wiki-Systeme, die eine Zugriffssteuerung (etwa via Access Control List) für bestimmte Seiten und Benutzergruppen (z.B. Abteilungen eines Unternehmens) erlauben. ... Ihre Haupt- Wissensmanagementfunktionen sind:

- Inhalte werden systematisiert, indem sie bestimmten Kategorien und Tags zugeordnet werden.
- Die Suchfunktion durchsucht nach Möglichkeit nicht nur die Wiki-Seiten selbst, sondern auch im Wiki abgelegte Text- oder Tabellendokumenten.
- Diskussionsseiten dienen dem Abgleich von Wissen und dem Austausch von Meta-Wissen über einen Wiki-Eintrag bzw. -Text.
- Informationen, die im ERP-System des Unternehmens abgelegt sind, können angebunden werden.
- Zur Qualitätssicherung ist es möglicherweise notwendig, dass vor der Veröffentlichung eines Dokuments eine Freigabe desselben stattfindet (Workflow).“ [WIK14f]

Beherrschung von Produkt- und Systemkomplexität

Matrixbasierte Methoden werden eingesetzt, um die Komplexität von technischen Systemen begreifbar zu machen und überschaubar darzustellen. Die Komplexität der Systeme entsteht aufgrund der großen Anzahl von Elementen (d.h., den Bestandteilen von Systemen, wie Komponenten und Funktionen) und deren Beziehungen zueinander. Die matrixbasierten Methoden für den Umgang mit komplexen Systemen haben ihren Ursprung neben der Graphentheorie vor allem in der Entwicklung der Design Structure Matrix (vgl. [RS12] und ausführlich in Kap. 6.12.2.3).

DSM Eine **Design Structure Matrix**, abgekürzt DSM, ist eine quadratische Matrix. Sie bietet eine systematische

⁸⁶ „Content-Management (CM) ist die Zusammenfassung aller Tätigkeiten, Prozesse und Hilfsmittel, die den Lebenszyklus digitaler Informationen in Form von Unterlagen und Dokumenten unterstützen. Die digitalen Informationen ... können als Dateien vorliegen, die einzeln verarbeitet werden oder auch als zusammenhängende Dateisysteme wie Webseiten (Hypertext) oder in strukturierter Form wie in Datenbanken.“ [Wik14g]

Beziehungszuordnung zwischen den Elementen. Diese Elemente können physische Produktkomponenten, Leistungsmerkmale, Konstruktionsanforderungen oder Prozessaufgaben sein. Mehr Information über die Beziehungen ist in der numerischen DSM enthalten. Die DSM kann nur die Beziehungen von Elementen innerhalb einer Domäne abbilden. Mit Analysealgorithmen (durch IT-Unterstützung) werden strukturelle Merkmale hervorgehoben.

DMM

Mit der **Domain Mapping Matrix** können die Beziehungen zwischen zwei Domänen abgebildet und analysiert werden.

MDM

Die **Multiple Domain Matrix** besteht aus mehreren DSMs und MDMs, damit ein ganzes System modelliert werden kann. Das System beinhaltet mehrere Domänen, von denen jede mehrere Elemente enthält, die durch verschiedene Beziehungstypen miteinander verbunden sind. MDMs erlauben die Analyse einer Systemstruktur über mehrere Domänen.

CAM

Der **Cambridge Advanced Modeller** (CAM) ist ein Software-Werkzeug für die Modellierung und Analyse von Abhängigkeiten und Flüssen in komplexen Systemen. Es bietet eine Diagramm-Tool, ein Simulationswerkzeug und ein DSM-Tool [OCE14a]. Mit dem CAM kann sehr einfach und schnell eine DSM erstellt werden. Nach der Erstellung der DSM und der Bestimmung der Abhängigkeiten der einzelnen Parameter bietet er die Möglichkeit, die Parameter manuell zu gruppieren. Im CAM sind auch die Analyse-Funktionen zum automatischen Partitioning, Banding und Clustering enthalten. Für eine grafische Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Parametern kann eine Netzgrafik erzeugt werden. [STE12]

Set Visualizer

Das Programm Set Visualiser [OCE14b] dient in erster Linie der Mengen- und Schnittmengendarstellung und ist somit nicht unbedingt dem Bereich Komplexitätssoftware zuzurechnen. Es wurde entwickelt, um die Klassifizierung in eine oder mehrere Kategorien von Objekten grafisch mittels Euler-Diagrammen darzustellen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Visualisierung nicht-hierarchische Klassifikationen, in dem ein Objekt zu mehr als einer Kategorie gehören darstellen [OCE14b]. Damit erweitert es den Einsatzbereich herkömmlicher Taxonomien.

LOOME0

LOOME0 (Beschreibung nach [TES14a] und [TES14b]) hilft bei der Analyse von Systemen und der Identifikation komplexitätssteigernder System-Eigenschaften. Es schafft Transparenz bei komplexen Produktarchitekturen, entwickelt Szenarien für eine verbesserte Zusammenarbeitsstruktur und unterstützt die systematische Bewahrung und Übertragung des Wissens von Know-how-Trägern. Die grafischen Darstellungen helfen, den Anteil einzelner Elemente an dem System, seiner Architektur und seinem Verhalten zu verstehen (Auflistung der Funktionen ist Kap. 6.12.2.5 und Bild 6.136 zu entnehmen).

2.2.13 KBE und KBx*

Knowledge-based Engineering (KBE) versteht sich nach [TEC12] als Sammelbegriff für objektorientierte Software, künstliche Intelligenz und rechnergestützte Problemlösung. KBE unterstützt den virtuellen Produktentstehungsprozess durch die Bereitstellung von erfasstem formalen Wissen. [HDG+13] spricht dazu auch vom Knowledge-Based Design⁸⁷. Die entwickelte Methode MeK5 „KBx“ (Kap. 3.4.5) spezifiziert und differenziert das wissensbasierte Entwickeln und Konstruieren für die Technische Logistik.

2.2.13.1 Für und wider den Einsatz von KBE

Mannigfaltige Gründe können für und wider das KBE angeführt werden und sind in den Quellen einzusehen, diese sind in Kap. 6.13 angegeben. Viele KBE-Lösungen sind in unterschiedlichsten Detaillierungsgraden in den Unternehmen bereits im Einsatz (z.B. [GEP12]). Diese sind oft aus strategischen Gründen nicht publiziert, da KBE einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil liefern kann (beispielsweise kann der Motorenentwickler AVL aufgrund intelligenter Konstruktionssysteme Motoren unterschiedlichster Bauarten effizienter konstruieren als die OEMs selbst [GEP11]). Dieser resultiert aus den folgenden Argumenten für und wider KBE:

Argumente für KBE können aus folgenden Gruppen angeführt werden (Synthese aus eigenen Erfahrungen und [ALC14], [ALC12], [VDI 5610-1], [AMM08], [VBD+12], [GPS10]):

- Effizienzsteigerung im Konstruktionsprozess⁸⁸
 - Reduktion der Entwicklungskosten
 - Entwicklungszeitverkürzung
 - maßgeschneidertere, kundenangepasste Produkte
 - Fehlervermeidung
 - frühzeitige Kostenkontrolle
- Verbesserung der Arbeitstechnik im CAD (hinsichtlich Organisation, Dokumentation und daraus auch Effizienzsteigerung)
 - Vermeidung von Routine- und Doppeltätigkeiten – weniger Iterationen
 - Standardisierung und transparentere Prozesse
 - Freiraum für kreative Tätigkeiten durch Entlastung der Konstrukteure
- Wissenserhalt
 - Wiederverwendung, Dokumentation und Weitergabemöglichkeit von Entwicklungswissen
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit
 - Effiziente Konstruktionsänderung im CAE-Analyseprozess
 - Standardisierte Schnittstellen und Berechnungsprozesse

⁸⁷ Der Nutzen, die Vor- und Nachteile, sowie aktuelle Ansätze sind in Kap. 6.13.1 angeführt. Über die Entstehungsgeschichte von KBE gibt [P5] Einblick. Kap. 6.13 detailliert das Thema.

⁸⁸ Zahlen und Daten zur Kosten- und Zeitersparnis s. Bild 6.141 bis Bild 6.143

Dagegengehalten kann mit den **Nachteilen des KBE** werden:

- Dazu zählt allen voran die kostenintensive Implementierung und die Sensibilität des zu erfassenden Wissens (Mitarbeiter geben aus taktischen Gründen Wissen nicht immer freiwillig preis [VDI 5610-1]).
- KBE soll nicht angewendet werden, wenn der Konstruktionsprozess innovativ und stark iterativ ist und das Wissen daher nicht klar erfasst und formalisiert werden kann.
- Auch wenn die Konstruktionsaufgabe zu einfach ist, hat der Einsatz von KBE keinen Sinn.
- Wenn der Entwicklung und v.a. der Pflege des KBE-Systems nicht ausreichend Budget, außerhalb projektgetriebener Entwicklungen, zur Verfügung gestellt wird, ist KBE- Einsatz nicht sinnvoll.

In der Literatur wurde bisher der **Bezug zu den Konstruktionsarten** nicht ausreichend hergestellt; für die Technische Logistik kann dies wie folgt vorgenommen werden:

- Im Falle einer Neuentwicklung ist eine KBE-Lösung sinnvoll zu erstellen, wenn diese im Produktlebenszyklus variiert bzw. wiederholt wird. Die Aufgaben der reinen Wiederholkonstruktion sind teilweise auch durch andere Systeme wie ERP- und PPS-Systeme übernehmbar.
- Wenn vorhandene Konstruktionen zu wiederholen und zu variieren sind, ist die Erstellung einer KBE-Lösung dafür ebenfalls sinnvoll.
- Für die Anpassungskonstruktion ist KBE nur in Teilbereichen sinnvoll.

2.2.13.2 KBE: Überblick, Ansätze und Entwicklungsziele

[VBD+12] ist ein Review des **aktuellen Standes von KBE**. Die Autoren geben fünf Punkte als gefilterte Zusammenfassung an⁸⁹:

1. KBE-Entwicklung ist noch immer situationsangepasst und motiviert, anstelle Entwicklungsprozesse, -methoden und -frameworks zu verwenden. Die Lösungen scheinen improvisiert.
2. Entwicklung von Black-Box-Lösungen, mit kontextlosen Daten und Formeln als Folge von Denkdiskrepanzen zwischen den Wissensinhabern und den Knowledge Engineers
3. Ein Mangel an Wissenswiederverwendung durch die Arbeitsweisen unter 1. und 2. Dazu ein Mangel aus höherem interdisziplinärem Wissen wie bspw. Supply Chain Wissen.
4. Ein Mangel an quantitativen Kostenbewertungsansätze von KBE Entwicklungskosten und Nutzen.
5. Ein Mangel eines quantitativen Frameworks zur Identifizierung und Beurteilung des geeigneten Einsatzes von KBE.

Methodiken zur Entwicklung von full-KBE-Systemen sind in der Literatur unter den Namen MOKA, KOMPRESSA, DEE, KNOMAD, MDE, CommonKADS bekannt⁹⁰. Tabelle 5 fasst die Unterscheidungsmöglichkeiten zu KBE nach dem aktuellen Stand zusammen.

⁸⁹ Aus den gelisteten Kriterien wurde für die Methode MeK5 eine Frageliste bzgl. des sinnvollen Einsatzes von KBE erstellt.

⁹⁰ Die Quellen dazu und die Beschreibung der Systeme ist Kap. 6.13.2 zu entnehmen.

Tabelle 5: Überblick zur Differenzierung des KBE

Ansatz/ Differenzierung	Beschreibung
[P5]	<p>Zum einen gibt es die full-KBE-Lösung, die mit einer Spezialsoftware umgesetzt wird, welche vor allem in der Flugzeug- und Fahrzeugindustrie eingesetzt wird (bspw. MOKA, KOMPRESSA,... s. unten) und ggf. nur zur Visualisierung das CAD benötigt.</p> <p>Zum anderen gibt es die KBE-fähigen augmented CAD-Systeme. Hierunter fallen parametrische CAD-Baugruppen, die durch übergeordnete Berechnungstools, wie MS EXCEL, MathCad, MATLAB oder selbstständige VB-Programme generiert werden können, oder direkt im CAD generiert werden. Es muss von Spezialsoftwareprodukten der CAD-Hersteller abgegrenzt werden, wie z.B., der Hersteller CATIA mit Knowledge Ware oder NX mit Knowledge Fusion, die eine full-KBE-Lösungen darstellen.</p> <p>Im Bereich der augmented CAD-Systeme sind nur Lösungen und Erfahrungsberichte bekannt, Methodiken zu deren Entwicklung sind nicht publiziert. MeK5 soll hierzu einen Beitrag liefern.</p>
[GPS10]	<p>usage of knowledge module of the commercial CAD systems create an independent, dedicated KBE system</p>
[AND10]	<p>adoptive Ansätze generative Ansätze</p> <p><i>wenn die Regeln im oder außerhalb des CAD-Systems erstellt werden.</i></p>
[HDG+13]	<p>externe Parametersteuerung</p> <p>Start- bzw. Vorgabemodelle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Struktur- Geometrie- und Funktionsmodellvorlagen • Bibliotheksbasierte modulare Vorlagemodelle • Implementierung von mathematischen und logischen Beziehungen • Zentrale Mastermodelle für eine integrierte virtuelle Produktentwicklung

Aus der Literatur (v.a. [VBD+12]), den Funktionsweisen und –umfängen der bereits realisierten KBE-Lösungen und den eigenen Beobachtungen und Erfahrungen kann man **Entwicklungs- und Forschungsfragen für KBE** identifizieren (s. auch [P5]):

1. Methodik [VBD+12]:
 Methodiken müssen von anwendungszentrierter Entwicklung hin zu einer generellen Methodikunterstützung des KBE-Entwicklungsprozesses überarbeitet bzw. erstellt werden. Dazu ist Unterstützung mit probaten Software-Tools nötig (wo gegenwärtig eine Lücke identifizierbar ist). Diese sollen die automatische Konvertierung von informellen zu formalen Methoden übernehmen.
2. Die Werkzeuge müssen weniger softwarelastig und "ingenieurtauglicher" werden:
 Aktuelle full-KBE Ansätze (MOKA,...) sind in der Regel von Software-Entwicklern erstellt und adressieren damit nicht primär eine ingenieurliche Denkweise (wie bspw. Produktstrukturen als Stücklisten-Sicht wie in CAD anstelle von Eingabemasken für Datenbanken – bspw. xKBE-app).

3. Abkehr von Black-Box-Entwicklungen [VBD+12]:
Engineering Wissen muss vom Software-Code entkoppelt werden. Schlüsseltechnologien dazu sind Semantische Analysen für Wissenswiederverwendung aus einzelnen Anwendungen anstelle Wiederneuerstellung.
4. Engineering von Materialflusstechnik ist vielseitig unterschiedlich zu jenem von automotive und aerospace:
Hier wiederholt sich Konstruktionsarbeit oft in Adaption vorhergegangener Projekte (wenn z.B. eine Fahrzeuggeneration von der nächsten abgelöst wird, bleibt der Grundproduktaufbau erhalten). In der Materialflusstechnik sind fast alle Projekte Speziallösungen und man muss nach dem Grad sinnvoller Konstruktionsautomatisierung differenzieren (s. dazu die folgende Definition von KBx).

Für die vorliegenden eigenen Ansätze soll im Bereich augmented CAD-Systeme festgemacht werden mit dem Ziel, das erfasste Wissen außerhalb des CAD-Systems zur Verfügung zu stellen (Ziel 3 für bspw. die xKBE-app Kap. 2.2.14.2). Durch eine Differenzierung des Grades der Konstruktionsautomatisierung nach Konstruktionsart (Ziel 4) kann den unterschiedlichen Anforderungen an Produkt- und Systementwicklung in der Technischen Logistik begegnet werden.⁹¹

⁹¹ Obwohl zum letzten Redigierzeitpunkt dieser Arbeit noch im beeinspruchbaren Gründruck befindlich, soll auf die VDI-Richtlinie [VDI 5610-2] kurz eingegangen werden, da sie sich speziell mit KBE beschäftigt. Die Verfassung der Richtlinienreihe unterstreicht die Wichtigkeit des Themas „KBE“ für ein modernes Engineering. Inhaltlich beschäftigt sie sich vornehmlich mit Wissen und seinen Repräsentationsarten im Allgemeinen und liefert projektmanagementorientierte Vorgehensmodelle zur KBE-Erstellung, angelehnt an die CommonKADS Methodik (s. Kap. 6.13.2). Viel Raum wird der Thematik von Sicherheit wissensbasierter CAD-Modelle und der Testierung erstellter KBE-Lösungen eingeräumt.

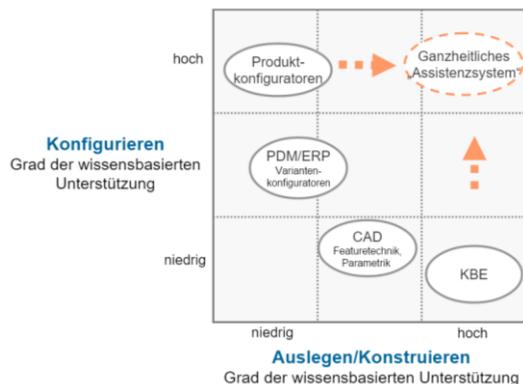


Bild F931: Grad wissensbasierter Unterstützung von Konstruktionstätigkeiten nach [VDI 5610-2]

Kritischerend kann eingewandt werden, dass [VDI 5610-2] als Chance mit dem KBE-Einsatz, im Gegenteil zu vielen weiteren Quellen, nicht den Vorteil der Konstruktionsprozessbeschleunigung angibt. In der Wissensrepräsentation erscheint die Differenzierung in Regeln, Constraints und Klassen als zielführend. Sehr ähnlich der in [P3] vorgeschlagenen Differenzierung (in Klammer) der KBE-Integration erscheint der Ansatz mit integriert

2.2.13.3 Erweiterung auf KBx

Der Grundtenor der Literatur und der dokumentierten Einsätze von KBE [VBD+12], [MIL08], [CP99] geht dahin, den Einsatz von KBE auf **abgegrenzte Entwicklungsaufgaben** zu beschränken und nur besonders variantenreiche Konstruktionen dem KBE zu unterziehen; vollautomatisch erstellte Gesamtprodukte sind nur in einigen wenigen Fällen sinnvoll.

Es bleibt die Fragestellung, ob mit KBE den Herausforderungen des Marktes adäquat begegnet werden kann, und ob dieses ein probates Mittel für die Technische Logistik ist?

Der Ansatz dazu ist die Differenzierung des KBE für die Technische Logistik in KBx (x nach Tabelle 6). Im Gegensatz zur funktionsbezogenen Sichtweise von [HDG+13] (s. auch Kap. 2.2.13.2) und der Einteilung in full-KBE und augmented CAD-KBE differenziert KBx nach Einsatzgebiet der zu erstellenden KBE-Lösung. Dazu ordnet es mögliche Funktionsumfänge den KBx-Lösungen zu und greift die Gliederung nach Konstruktionsart von Kap. 2.2.13.1 mit auf⁹².

(augmented CAD) und gekoppelt (full KBE). Leider wird dazu nicht weiter detailliert! Technische Vorgehensmodelle oder gar ein Differenzierungsansatz (wie KBx) werden ausgespart. Wertvoll zum Begriffs- und Methodenverständnis erscheint die Übersicht mit Bild F1.

Aus den in der Richtlinie angegebenen Beispielen sei jenes eines wissensbasierten Fahrstuhlsystems hervorgehoben, das dem Konfigurationssegment entnommen ist und stellvertretend für viele dem Autor firmenintern bekannte Konstruktionsautomatismen steht, die aus diversesten Gründen nicht publiziert sind. Eine Analogie zu KBL ist nahe. Für ein weiteres Beispiel darin (Treppe, Plattform und Überstieg) bieten viele CAD-Systemhersteller (wie etwa PTC.Creo) eigene „Stahlbaumodule“ an, die in der Technischen Logistik auch im Regalbau zum Einsatz kommen [STE12]. Aus der abschließenden Übersicht über die Beispiele werden exemplarisch Erkenntnisse für die KBE-Anwendung und deren Nutzen abgeleitet. Dabei ist differenziert nach benötigten Mitarbeitern, Fähigkeiten und Wissen, Lizenzen, Aufwendungen und potenziellen Nutzern. Eine Verallgemeinerung daraus oder ein Prüfprozess für den Anwender hinsichtlich eines sinnvollen KBE-Einsatzes wie mit Methode MeK5 in Kap. 3.4.5 unterbleibt allerdings.

Zur zeitlichen Abgrenzung der Richtlinieninhalte mit den eigenen Arbeiten sei auf die Erscheinungszeitpunkte der folgenden KBE-Publikationen verwiesen, die allesamt Jahre vor der Richtlinie entstanden.

- *methodische Befassung mit KBE hin zu KBx: [P3], [P4]*
- *exemplarischer KBE-Einsatz: [P5], [P6], [Pr5]*

⁹² Abgegrenzt werden muss noch zu [GPS10]. Extended KBE will dort den Bereich des KBE vergrößern mit der Unterstützung der Konzeptphase. Aufbauend auf der hierarchischen Natur von Design-Wissen wird in nicht näher spezifizierte theoretische und reale Modelle unterteilt.

Tabelle 6: Definition des KBx

KBx	Bereich, Ziel und Beschreibung	
E: Engineering KBE		klassische automatische Konstruktionslösung (Variantenkonstruktion von Teilen und Baugruppen)
	Arbeitsbereich	Konstruktion/CAD
	Hauptziel	effizientes Generieren von angepassten Produkten
SD: System Design KBSD		Bauraumdefinition, Schnittstelle zur Berechnung und Simulation (CAE) zur Funktionsspezifikation mit reduzierter Geometrie (Maschinenanpassungen, Geometriedaten-Übergabe, Geometrierohdaten für CAE von Maschinen)
	Arbeitsbereich	Berechnung/CAE
	Hauptziel	effizientes Generieren von CAD-Modellen zur Berechnung (CAE) oder Bauraumdefinition
L: Layouting KBL		* Automatisiertes layouts von Anlagen u. Spezifikation mit 3D-Geometriemodulen, wenn KBL mit MeK1 nach 4-Stufen-Planungssystematik [AF07] zur Unterstützung der planerischen Aufgaben der Logistikplanung eingesetzt wird. * Realplanung (Geräte), Konfektionieren von Anlagen (wenig detailliertes KBE auf Anlagengröße). (Bereitstellung von konstruktiven Informationen – z.B. Stücklisten auf Maschinen- und Systemebene)
	Arbeitsbereich	Materialflussplanung und Konstruktion (simultaneous engineering MeK1)
	Hauptziel	effizientes Generieren von CAD-Modellen zur Vernetzung Materialflussplanung/Konstruktion (simultaneous engineering – MeK1). Früher Überblick über Kosten, Geometrie und Material.

Generell ist **KBE** für die Technische Logistik für die Variantenkonstruktion geeignet, wie sie im branchenüblichen Projektgeschäft immer vorkommen. Bei Neukonstruktionen, wie sie methodisch durch die Entwicklungsmethodiken erfasst sind, ist wirtschaftlich zu prüfen, ob die vorgesehene Variantenvielfalt den Einsatz von KBE rechtfertigt. Ein Beispiel für KBE findet sich in [P6].

KBSD wird dann sinnvoll sein, wenn es um hochdynamische Systeme geht, deren Dynamik stets einer Neuauslegung bedürfen. Ebenso, wenn es sich um große CAD-Modelle handelt, die im Top-Down angelegt sind und von Anwendungsfall zu Anwendungsfall umkonfiguriert werden müssen. Es stellt eine Schnittstelle der Systemauslegung hin zu den Fachberechnungswerkzeugen dar und ist ein Geometriegrobauslegungswerkzeug, das automatisierten Austausch zu CAE ermöglicht, wie bspw. in [P5].

KBL⁹³ schließlich soll eine Lücke schließen, die bei der Materialflusplanlagenplanung hin zur technischen Realisierung auftritt. Wenn es

⁹³ Die unterschiedlichsten Ansätze zur Automatisierung von Planungsaufgaben der Logistik sind nicht Gegenstand des KBL (wie z.B. in [SSS14], [UNI12], [PS08] oder [ZÜL10]). Vielmehr sollen die dort generierbaren Erkenntnisse am Gesamtsystem (Materialflusstechnische Parameter und geometrische Rahmenbedingungen) Input für die konstruktive KBL-Entwurfkonstruktion einzelner Komponenten sein, wie bspw. in [PIC12].

hier gelingt, zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt aus dem Anlagenlayouting Konstruktionsrahmenbedingungen im CAD abzuleiten, kann zu einem frühen Zeitpunkt die Kostensicherheit gesteigert und durch Simultaneous Engineering die Durchlaufzeit des Gesamtprojektes verkürzt werden. Die geometrische Detailtiefe ist dabei nochmals geringer als bei KBSD. Ein Beispiel für die Wirkmächtigkeit einer umfangreichen KBL-Lösung stellt die fortna® DC Design Suite dar [FOR14], die die Materialflusslayoutingaufgaben mit Produktkonfiguration auf Maschinenebene verknüpft. Dabei handelt es sich um das automatisierte Layouten und die Spezifikation von Anlagen mit 3D-Geometriemodulen. Weiters dient KBL dem Konfektionieren von Anlagen für einen raschen Überblick über verbaute Geometrie und Materialien (Stückliste), Beispiel [P3], [PIC12].

In allen Bereichen des **KBx** konnten sowohl in der Literatur **Lösungen** identifiziert werden, als auch eigene Projekterfahrungen gesammelt werden [P3], [P5], [P8]. Die Untergliederung der Konstruktionsautomatisierungsaufgaben nach der KBx-Klassifizierung ermöglicht nicht nur die Ableitung von unterschiedlich mächtigen KBE-Lösungen, sondern soll auch helfen, das Automatisierungsziel stets vor Augen zu halten und die Systeme nicht zu überreizen, was aus den oben dargestellten Gründen und Erfahrungen rasch zum Misserfolg von KBE führen kann.

Bild 2.29 fasst die Funktionalitäten, die Einsatzbereiche sowie die Regelklassen und Wissensinhalte für die Differenzierung im KBx zusammen. Die Regelklassen⁹⁴ und deren Daten, Informationen und Wissen gelten darin vornehmlich in den angegebenen KBx-Bereichen aber nicht exklusiv, je nach Anwendungsfall.

Als entscheidend für das Gelingen der Entwicklung einer KBx-Lösung hat sich die **Wahrung der Übersicht über das eingesetzte Wissen** herausgestellt (entspricht weitestgehend auch dem Ziel 3 [VBD+12] der Entwicklungsziele für KBE, s. Kap. 2.2.13.2). Dafür wird mit Methode MeW2 und der Entwicklung der „xKBE-app“ eine eigene Lösung dargestellt (s. Kap. 2.2.14.2). Diese ist als

⁹⁴ **Regelklassen** mit deren Grundinhalten für den Wissensinsatz in KBx für die (teil)automatisierte Generierung von KBx-Objekten sind in der Technischen Logistik [P5]⁹⁴:

- Materialfluss-Grundgrößen: Kapazität und Durchsatz, Gutart
→ bestimmen die Grunddimensionen des KBx-Objekts und damit die Konstruktion
- Konstruktion: Mitarbeiter Know-how „Konstruktion“, interne Erfahrungen und best practice der Branche, Normen, interne Standards
→ bestimmt die physische Gestalt des Produkts
- Berechnung/Engineering: Mitarbeiter Know-how „Dimensionierung“, interne Erfahrungen und best practice der Branche, Normen, interne Standards, Spezifikationen von Zukaufteilen
→ beeinflusst direkt die Konstruktion.
- Kosten: Regeln des kostengünstigen Konstruierens [EKL+14], interne Erfahrungen, Erfahrungen mit Lieferanten
→ beeinflusst direkt die Konstruktion.
- Produktion: Mitarbeiter Know-how „Produktion“, Fertigungsbedingungen intern/extern, Erfahrungen mit Lieferanten, Fertigungs/Montageplanung
→ beeinflusst direkt die Konstruktion.
- Design: Mitarbeiter Know-how „Design“, Marktakzeptanz, Kundeninformationen (CRM), interne Erfahrungen und best practice der Branche
→ beeinflusst direkt die Konstruktion.

Ontologieeditor diverser Wissensklassen mit einer bidirektionalen Schnittstelle von/zu CAD in der Lage, die Entwicklung und Dokumentation automatischer Konstruktionen des KBx zu unterstützen.

KBx Knowledge-based x Ansätze			
steigende Objektgröße und sinkender Konstruktionsautomatisierungsgrad			
	KBE	KBSD	KBL
Domäne	Knowledge Based Engineering	Knowledge Based System Design	Knowledge Based Layouting
Funktionen	Komponenten, Baugruppen	automatische master- und layout-Konstruktion von Baugruppen und Maschinen, Funktionsspezifikation von Maschinen	automatisiertes layouten von Anlagen und deren Spezifikation mit 3D-Geometrimodulen (*), Konfektionieren von Anlagen (+)
Verwendung für	- Variantenkonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Produktfamilienstellung	- Variantenkonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Antriebsdimensionierung - Schrittstellendefinition - CAD typen design (Struktur)	- Anpassungskonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Bau- und Montagefrühen - Kostenrechner - Anlagentypen
CAD domain und Arbeitsbereich	Detailgeometrie	reduzierte Geometrie (für CAE)	Schraufverpackungen für Layouts und Schnittstellen
Regelklassen	Konstruktion/CAD	Konstruktion, Berechnung/Engineering, Kosten, Berechnung/CAE	Materialflussplanung u. Konstruktion
Daten, Informationen und Wissensquellen (ohne implizite Ent- wicklungs-Know-how)	- Normen, best practice, Lieferanteninformationen - Maschinendaten - Fertigungsbedingungen - Konstruktionsregeln - Maschinenbau- Grundlagen	Materialflussrechnung (Kapazität und Durchsatz) - Dimensionierungsgrundlagen - Marktquoten - Kundeninformationen (CRM)	Logistikgrundlagen
Nutzen	Fehlervermeidung, rasche Bearbeitung (Wissenswiederverwendung), autom. Dokumentation, schnelle Einarbeitung neuer Mitarbeiter, Steigerung der Variantenvielfalt, durchgängige Daten/Produktmodelle, Kostenkontrolle in frühem Entwicklungsstadium	Maschinenbau- u. Mechanikgrundlagen	Logistikgrundlagen
Beispiel	Selbrommet [P6]	Regalbediengerät; [P5]	Hochregalgeräusungung (+); [P3], [P12] DC-Design-Suite (**) [FOR14]
Umsetzung KBx mit Unterstützung der xKBE-app			
Technologien	Visualisierung: Ontologien, DSM, hierarchische Struktur, TagCloud		
Regelklassen	Datenbanken: Normen		
Beispiel- Umsetzung	Umsetzung: CAD-Schnittstellen (Vib-APP), Visual Basic GUI, mySQL-Datenbank Dimensionierung, Normen, Best practice		
	Produktontologien, CAD-Steuerung aus xKBE-app (exemplarisch), Normen-Tagging		

Bild 2.29: KBx-Definition (erweiterter Ansatz aus [P4])

2.2.14 Erstellung und Visualisierung von Beziehungen in (automatisierten) Konstruktionen*

Der Erstellungsprozess eines Knowledge-based engineering Systems ist komplex. Zur Unterstützung der Konstruktionstätigkeit im Allgemeinen existieren Ansätze mit IT-Systemen, die in der richtigen Phase das richtige Wissen bereitstellen sollen [GPS10]. Spezieller in Bezug zu KBE ist der „personal assistant“ [POK06] bekannt als Konzept, wie die KBE-Erstellung unterstützt werden kann, wenn verteilte Zusammenarbeit stattfindet. Ein Anliegen zur Verbreitung des KBx ist die Aufbereitung und Dokumentation des hinter KBx liegenden formalen bzw. formalisierten **KBx-Wissens**, das größtenteils in CAD-Systemen und übergeordneten Bedienprogrammen abgebildet ist⁹⁵.

2.2.14.1 Gleichteile und Variantenanalyse-app

„Wenn die CAD-Konstruktion nicht durch (Firmen-)Standards und Richtlinien geregelt ist, kommt es zum Phänomen „Gleichteile“. Dann ist dasselbe Bauteil (der Geometrie nach) mehrfach vorhanden und scheint in unterschiedlichen Baugruppen unter anderer Positions/Teilenummer auf, obwohl es geometrisch ident ist. Die Gründe dafür sind mannigfaltig und auch darin bedingt, dass es unaufwendiger sein kann, geometrisch einfache Bauteile neu anzulegen und zu konstruieren, als selbiges im Teilverwaltungssystem (außerhalb des oder

⁹⁵ Die Ausführungen zeigen Möglichkeiten zur Vernetzung der Welten des Knowledge-Managements mit jenen des CAD. Während die Variantenanalyse (Kap. 2.2.14.1) versucht, Überblick über eine vorhandene Gleichteilevielfalt zu erreichen stellt die xKBE-app (Kap. 2.2.14.2) ein mächtiges Werkzeug zur Entwicklung und Dokumentation von formalen Beziehungen in maschinenbaulichen Geräten dar.

verbunden mit dem CAD) zu identifizieren und wiederzuverwenden. ... Man kann dieser Problematik mit Product Lifecycle Management Systemen (PLM) begegnen.

Stellen sich nun Aufgaben der Neuorganisation von Produktstrukturen oder solche der Modularisierung und Variantenentwicklung, ist die Flut an gleichen und ähnlichen Teilen oder gar Baugruppen ein Hindernis. Auch die Koppelung zu KBx-Lösungen ist nur mit eindeutig vorhandenen Bauteilen möglich. Neben PDM und PLM werden ebenso Teile- und Enterprise-Resource-Planning(ERP)-Systeme mit dem CAD verbunden zur Teilverwaltung eingesetzt. Damit stehen wesentliche Informationen (im Gegensatz zu herkömmlichen Teilenummern) als Attribute für klärende Analysen zur Verfügung.“ [P3]

Ein vierstufiges Vorgehen konnte dafür entwickelt werden und ist in einem Software-Tool „Variantenanalyse-app“ mit den folgenden **Funktionalitäten** im Einsatz^{96,97}.

Es ermöglicht softwaregestützt eine objektive Bewertung/Vergleich/Analyse oder das Auffinden ähnlicher Teile.

1. Datenerfassung und – aufbereitung,
2. Strukturierung und ggf. Umstrukturierung in Funktionsgruppen,
3. Vergleich bzw. Analyse und Suche mit mehrdimensionalen Filtern,
4. Bewertung mit paarweisem Vergleich (für Kriterien wie Einsatzerfahrung, Lieferantenzufriedenheit, ...) und Nutzwertanalyse.

2.2.14.2 Arbeitsumgebung für KBx – die xKBE-app

Die xKBE-app⁹⁸ ist ein **Entwicklungs- und Dokumentationswerkzeug** (im Sinne des Wissensmanagement: Wissen erzeugen, speichern und anwenden) der Wissensformalisierung von Beziehungen im KBx. Da diese unterschiedlicher Art sind und vornehmlich in CAD und den steuernden Berechnungsprogrammen hinterlegt sind, können diese nicht einfach zentral verwaltet und wiederverwendet werden. Für die Funktionalität der xKBE-app existiert erst ein kleiner Umfang an darzustellendem Funktionsstand (Softwareprototyp), der an dieser Stelle anzugeben ist. Im Gegensatz zu Ontologien und deren Editoren ist der Funktionsumfang aufgrund der CAD-Schnittstelle und der intuitiven Beziehungsgenerierung durch drag&drop aber ungleich größer .Der entscheidende Mehrwert der xKBE-app ist zu sehen in (nach [P3])⁹⁹:

⁹⁶ s. Bild 6.153 und [Pr6].

⁹⁷ Im Rahmen der Entwicklung der xKBE-app (s.u.) ist vorgesehen, die Methodik der Attributerfassung (aus SAP) sowie einzelne Submodule der Software in die xKBE-app zu integrieren. Die Systematik der Analyse von Gleichteilen ist nicht Teil einer hier publizierten Methode; für nähere Details dazu s. Kap. 6.14.1 und [P3]. Die Methode Mek4 „Methodikeinsatz im CAD“ kann durch geregelte Abläufe im CAD verhindern, dass Gleichteile entstehen.

⁹⁸ Die detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der xKBE-app ist MeW2 (Kap. 3.6.2) zu entnehmen. Details zu Technologien und Regelklassen s. Bild 2.30.

⁹⁹ Die xKBE-app ist abzugrenzen vom Model based Systems Engineering (MBSE). Dabei handelt es sich nach [GRÜ15] um einen „domänenübergreifender Organisationsansatz, der ursprünglich aus der Informationstechnik stammt und dort schon seit den 70er Jahren praktiziert wird. Erweitert um die zahlreichen Aspekte des gesamten Produktlebens führt

- einer Multi-Layer-Struktur der Beziehungen für Wissen unterschiedlicher Klassen
- der mathematischen Formalisierungsmöglichkeit der Relationen
- der Schnittstelle zur Konstruktion (CAD über VB-API)
- der internen Dokumentenverwaltung.

er die Aufgaben der Produktentstehung in einem konsistenten Modell zusammen. ... Ausgehend von den Entwicklungen nationaler und internationaler Organisationen (GfSE, INCOSE) gibt es inzwischen zahlreiche Werkzeuge, mit denen Produktmodelle definiert werden können, die vom Konzept bis zu den Tests eine hohe Durchlässigkeit und Vernetzung der Teilmodelle und Parameter aufweisen. ... Dabei liegt der Focus nicht allein auf integrierten mechatronischen Erzeugnissen. Vielmehr soll die damit verbundene Planungssystematik schon im Produktentstehungsprozess sicherstellen, dass auch die mit der Einbindung in übergeordnete informationstechnische Steuerungsprozesse verbundenen Funktionen zuverlässig realisiert werden.“ MBSE fokussiert somit nicht auf der automatisierten Konstruktion und der Verwaltung des darin enthaltenen Wissens (wie mit der xKBE-app erfass- und dokumentiertbar) sondern schießt diese mit ein.

2.3 Analyse „Engineering in der Technischen Logistik“

Mit Kap. 2.2 wurde unter Berücksichtigung der Eingrenzung von Kap. 2.1 ein aktueller Stand des Wissens in Bereichen des Engineerings der Technischen Logistik selektiv ausgebreitet. Die dort angegebenen Quellen beziehen sich auf die aktuellen Lehrwerke und Publikationen folgender **Bereiche**; übergeordnet sind v.a. die diversen **Ansätze der Produktentwicklung** mit [EM13], [LIN05], [LP08] zu sehen, die – vorgehend dargestellt – dann auch die Themenkreise dieser Arbeit bilden werden (

Bild 2.30):

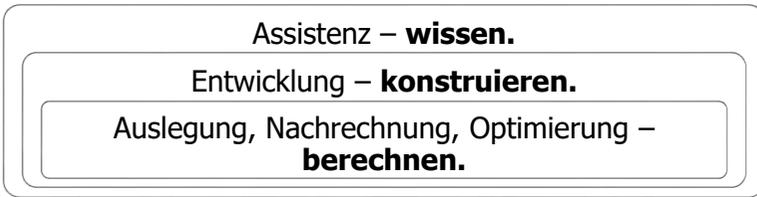


Bild 2.30: Einschließende Themenkreise wissen – konstruieren – berechnen

Für eine umfassende Analyse des Stands des **Entwicklungswissen im Bereich der Technischen Logistik** können verschiedene **Herangehensweisen** verwendet werden. Neben den weitreichenden, systematischen Analysen, die bspw. durch Befragungen, Erhebungen,... durchführbar sind wurde hier eine deduktive Vorgehensweise (Bild 2.31) gewählt¹⁰⁰.

Die der Deduktion zugrundeliegenden **Prämissen und ihre Quellen** stellen v.a. das Erfahrungswissen des Autors (ersichtlich über die sog. Schlüsselpublikationen in Kap. 5.3.1) und des gesamten Teams des Instituts für Technische Logistik (ITL) aus 15 Jahren Entwicklungsarbeit im Bereich der Technischen Logistik und des Allgemeinen Maschinenbaus dar.

¹⁰⁰ Da es nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, einen vollständigen und wissenschaftlich begründeten exakten Stand des Engineerings der Technischen Logistik aufzunehmen, sondern vielmehr innovative Ansätze dafür zu entwickeln, erscheint die Vorgehensweise als gerechtfertigt. Der Prozess der Methodenfindung für das Schließen einer Engineering-Lücke in der Technischen Logistik ist zweiteilig und mit Bild 3.32 und Bild 3.33 dargestellt. Der Prozess der Definition der Methoden und seine Begründung stellen nicht den wissenschaftlichen Kern und Schwerpunkt der Arbeit dar, obwohl er wissenschaftlich begründet ist. Vielmehr ist der Inhalt der in Kap. 3 entwickelten Methoden als solcher zu sehen.



Bild F100: Projektpartner ITL 2009 bis 2014

Hintergrund dieses Wissens sind einerseits eine große Anzahl erfolgreicher Projekte mit namhaften Produzenten von Technik der (Intra)logistik und Partnern mit logistischen Problemstellungen¹⁰¹.

Andererseits werden die Prämissen auch aus der Kenntnis der Fachliteratur des Fachbereichs gespeist, der entsprechende Aussagen zu entnehmen sind; **Schritt P-A 1**¹⁰².

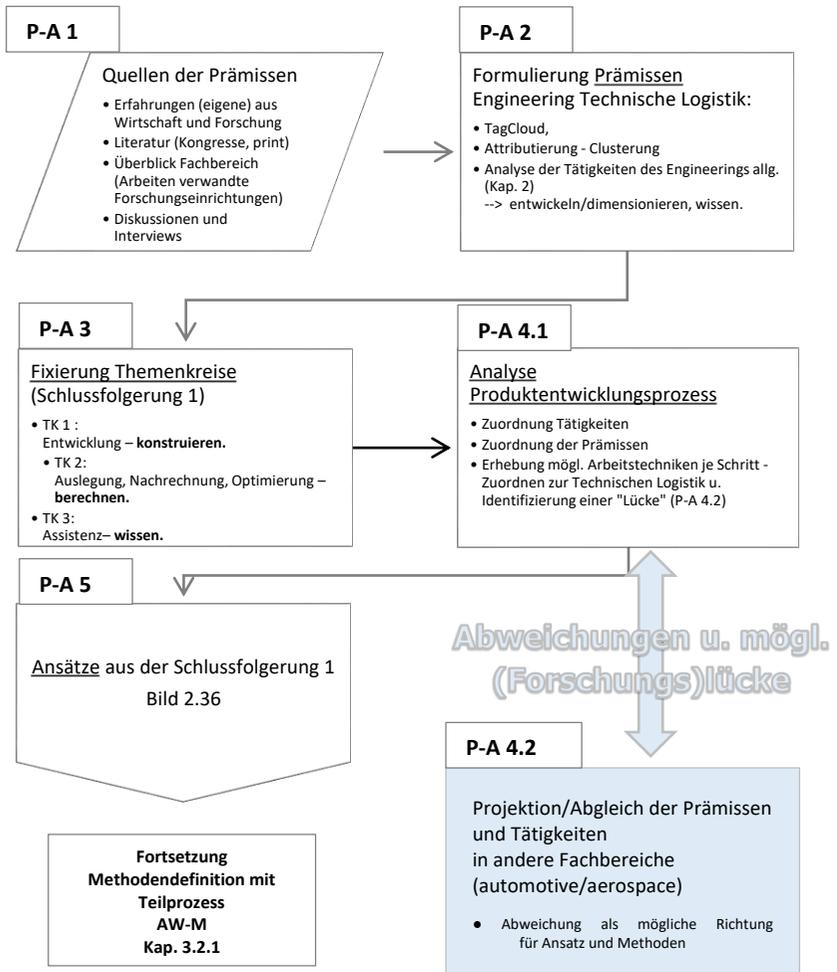


Bild 2.31: Teilprozess P-A (Methodendefinition) von der Prämisse zum Ansatz

Folgende **Prämissen** für das „Engineering in der Technischen Logistik“ können formuliert werden (Tabelle 7), zu deren Begründung s. die angegebenen Quellen

¹⁰¹ s. Bild F100 und Schlüsselpublikationen sowie –projekte in Kap. 5.3.1 und die Quellen [P1] bis [P14] und [Pr1] bis [Pr6].

¹⁰² Im Folgenden und oben wird in den Erläuterungen ohne Bildverweis auf die Prozessschritte P-A 1..5 referenziert.

bzw. P-A 1 in Bild 2.31. Eine erste Gliederung bezieht sich auf die Art der Produkte und deren Entstehung; **Schritt P-A 2**.

Tabelle 7: Besonderheiten im Engineering in der Technischen Logistik - Prämissen

Bereich	Prämissen und deren Ausprägung	
Produkte	Produkte haben lange Lebenszeiten	schnelle, präzise Angebote notwendig
	Produkte sind hochintegrative, mechatronische Komponenten mit hohem IT-Anteil	spezifische Kundenlösungen
	hoher Vernetzungsgrad einzelner Produkte	Variantenerzeugung aus Projektadaptierungen
	spezifische Angebote	Produkte sind hoch divers in Größe und Komplexität (vgl. Definition von Komponenten/Baugruppe/Maschine/Anlage in Kap. 2.2.3.3).
Entwicklung von Produkten	Generalisten statt Spezialisten in den Entwicklungsabteilungen	empirisches Detailwissen Materialflusstechnik
	hauptsächlich KMU [GH] mit folgenden Spezifika: <ul style="list-style-type: none"> • kleine Abteilungen, • wenig Akademiker, • auftragszentriertes/projektzentriertes Entwickeln • wenig F&E (nicht nur in KMUs [GW11]) • KMUs simulieren nicht (lt. [WIE14]: Angst vor fehlendem Know-how und Rechnerkapazitäten als unüberwindbare Hürden) 	mit Erfahrungswissen ohne Berechnungsunterstützung konstruieren
	Entwicklung über Prüfstandsversuche (Empirie)	Produktmanager „konstruieren“ mit Kunden
	selten Berechnungen	keine CAE-Basis für virtuelle Entwicklung
	wenig Nachweisregelwerke	noch 2D-CAD im Einsatz
	kein standardisiertes Nachweiswesen	projektzentrierte Wissensspeicherung
	wenige (veraltete) Normen	projektspezifische Entwicklung und Wissensspeicherung
	allgemein	Logistik ist eine junge Disziplin ([GH], [GW11]), auch für die Technische Logistik gilt daher: <ul style="list-style-type: none"> • erst wenig ausgeprägte Forschungsrichtungen • daher wenig Theorie-Literatur

keine spezialisierte Fachausbildung „Logistiker“ oder „Logistik-Ingenieur“ in Österreich	<i>Gerätetechnische Entwicklung sondern der IT zuzurechnen. „Andere technische Entwicklungen werden sich voraussichtlich nur in spezifischen Segmenten durchsetzen. So wird z.B. das Thema RFID ... auf einzelne Handelssegmente wie Bekleidung und Textilien beschränkt bleiben.“ Für die zukünftigen Konzepte der Handelslogistik sind die Themen Variantenvielfalt, 3D-Druck und Automatisierung jene mit dem stärksten technischen Hintergrund.</i>
wenig veröffentlichtes Detailwissen über Systeme und Komponenten der Materialflusstechnik	
keine spezifische „Produktentwicklungsliteratur der Technischen Logistik“ vorhanden (Komplexitätsmanagement, Konstruktionsmethodik)	
vorwiegend Logistikkongresse mit wenigen technischen Beiträgen	
wenige Technische Logistik – Publikationen	

Mit Vereinfachungen der Aussagen und dem Herausstellen von gewichteten Gemeinsamkeiten in den Aussagen kann man übersichtlich eine TagCloud, Bild 2.32, mit den Prämissen bilden, die Schwerpunkte der Aussagen über die Schriftgröße herausstreicht; **Subtätigkeit in Schritt P-A 2.**



Bild 2.32: TagCloud der formulierten, reduzierten Prämissen

Der Gliederung von zuvor mit Produkte, Entwicklung und Allgemein kann eine speziellere Zuordnung folgen¹⁰³. Den Prämissen werden nun die Attribute zugeordnet; dann werden gemeinsame Zugehörigkeiten der Prämissen ersichtlich. Ein Schnittmengendiagramm¹⁰⁴ gibt diese Zugehörigkeiten grafisch wieder - Bild 2.33. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass alle Prämissen mindestens einer Tätigkeit zugeordnet werden können, die meisten aber

¹⁰³ Sie bezieht sich in auf die oben angegebenen Ansätze der Produktentwicklung, wie sie auch in Kap. 2.2 dargestellt sind: konstruieren, berechnen, wissen (=Attribute) und wie sie als relevant im Engineering anzusehen sind.

¹⁰⁴ vgl. auch „13-SetV. Set Visualiser: [ENG14]“ in Methode MeW1 in Kap. 3.6.1

mindestens zwei Tätigkeiten zugehörig sind. Daraus lassen sich aus den Tätigkeiten konstruieren, berechnen und wissen, die die Attribute der Prämissen darstellen, **Themenkreise – Schlussfolgerung 1** formulieren, in denen sich Herausforderungen des Engineerings in der Technischen Logistik bewegen werden können; **Schritt P-A 3**¹⁰⁵.

Tätigkeiten der Entwicklung von Produkten des Maschinenbaus, zu dem auch die Technische Logistik zu zählen ist, sind in sog. Produktentwicklungsprozessen (PEP) oder Produktlebenszyklen (PLZ) erfasst¹⁰⁶. Den meisten PEP-Modellen ist ein vierstufiger Ansatz in der Konstruktions-/Entwicklungstätigkeit gemein¹⁰⁷. Bild 2.35 gibt dazu die Phasen, Arbeitsschritte und Ergebnisse eines der verbreitetsten Prozesse, nach [VDI 2221], wieder, der in der Folge für die Ein- und Zuordnung der entwickelten Methoden verwendet wird.

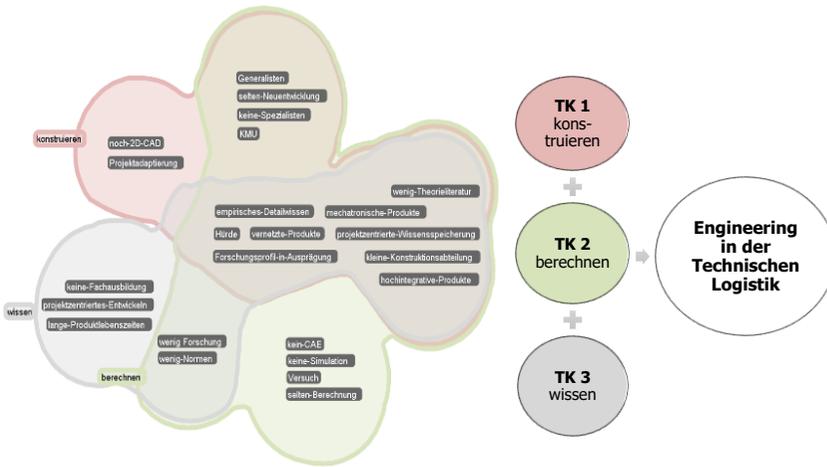


Bild 2.33: Zuordnung der Prämissen (aus der TagCloud) zu den Themenkreisen – Schnittmengendiagramm

Bild 2.34: Themenkreise und Tätigkeiten für das Engineering in der Technischen Logistik unter den formulierten Prämissen

Vorgehen nach [VDI 2221]	Phase	Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	Aufgabe klären	Konzeption			Entwurf		Ausarbeitung		Fertigung PEP: Nachfolger
	Arbeitsschritt		1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten Ausführungs- u. Nutzungsangaben		
	Ergebnis		Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktionsdokumentation		

Bild 2.35: Phasen, Arbeitsschritte und Ergebnisse im Entwicklungsprozess (konstruieren) nach VDI 2221 [VDI 2221]

¹⁰⁵ Die Einrückung der Aufzählung des Themenkreises TK 2 lässt erkennen, dass es sich beim Berechnen um eine Teiltätigkeit des Entwickelns handelt. Da gerade dieser Tätigkeit aber hohe Relevanz zuzusprechen ist, ist sie als eigener Themenkreis/Tätigkeit formuliert.

¹⁰⁶ s. dazu auch Kap. 2.2.11 und 6.11

¹⁰⁷ s. auch allgemein und mit MeK1 Bild 3.15 nach [VDI 2221]

Wenn man nun versucht, die Prämissen, die unter die Themenkreise zusammengefasst sind, den Phasen und Arbeitsschritten und deren Ergebnissen zuzuordnen, kann man aus den Prämissen **erste konkrete Arbeitstechniken** und –schritte bzw. Ansätze ableiten; **Schritt P-A 4.1.** Wenn den Prämissen die Methoden folgen sollen, mit denen Produkte effizienter entwickelt werden können, muss sich diese Zuordnung im gegebenen Rahmen der Produktentwicklung und ihres Prozesses bewegen.

Die so gefundene Zuordnung der Prämissen durch **Analyse des Produktentwicklungsprozesses** ist hier nicht dargestellt, wohl aber für die final definierten Methoden in Bild 3.6 einsehbar. Sie lässt sich dann mit anderen Branchen, die aufgrund von Kosten- und Innovationsdruck, Kundenwünschen und dgl. ebenso gefordert sind vergleichen; **Schritt P-A 4.2.** Vorliegend wurde für die drei Themenkreise die Bereiche automotive und aerospace als solche „Trendsetter“ gewählt, da v.a. hier auf viel publizierte Literatur mit Methoden und Beispielen zurückgegriffen werden kann. Ob diese Bereiche dadurch als innovativer, führender oder gar Trendsetter anzusehen sind ist nicht Gegenstand der Beurteilung hier. Auf jeden Fall zeigt die Fülle der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darin, dass gebündelte Aktivitäten notwendig sind, um im Konkurrenzdruck zu sichereren, effizienteren und günstigeren Produkten zu gelangen¹⁰⁸.

Die Gegenüberstellung der den Themenkreisen zugeordneten Prämissen aus der Technischen Logistik mit Lösungsansätzen dazu aus den Trendsetter-Bereichen identifiziert eine **Forschungslücke** (zwischen P-A 4.1 und P-A 4.2). Ein erster konkreter **Ansatz** zur Schließung dafür ist in Bild 2.36 für einige der o.a. Prämissen und der entstandenen Lücke angegeben. Die weitere Folgerung aus den Ansätzen zur Lückenschließung über die Wirkung der Ansätze hin zu den final identifizierten Methoden wird nach klärenden Definitionen zu Methoden im Allgemeinen in Kap. 3.2 mit dem Prozess AW-M fortgesetzt.

Die Darstellung der **Ansätze** zur Schließung der Forschungslücke ist mit Bild 2.36 eine vorläufige. Als finales Ergebnis des Prozesses sind unbedingt die 10 identifizierten Methoden von Kap. 3.4ff. zu sehen die v.a. auf der **Wirkung der Ansätze** aufbauen und diese formal entwickeln (s. Fortsetzung in Kap. 3.2).

¹⁰⁸ Als Quellen der Bereiche automotive/aerospace, die auch synonymisch für den aktuellen Stand des Engineerings im Allgemeinen dienen können, wurden unterschiedlichste Kanäle herangezogen. Neben der spezifizierten Literatur (bspw. die Produktentwicklungsliteratur und [HDG+13]) sind dies v. a. viele universitätsinterne Erfahrungen mit dem Bereich automotive an der TU Graz und den verbundenen Firmenpartnern. Darüberhinaus sind die Entwickler- und Anwenderkonferenzen der CAE-Werkzeuge stets vorwiegend von den Bereichen automotive/aerospace bedient; auch diese sind Quellen für den Abgleich.

Beim Vergleich der als Trendsetter identifizierten Branchen automotvie und aerospace mit der Technischen Logistik mag es sich um eine polemische und subjektive Sicht handeln, gegen die sich manches erfolgreiche Unternehmen der Logistiktechnologiebranche durchaus zu Recht wehren mag. Aber diese Abbildung stellt die Querschnittssicht des Autors aus langjähriger Projektpaxis mit Partnern unterschiedlichster Größe und auch fremden Branchen dar (s. Bild F100) und hat sich auch in den beauftragten Arbeiten als gegeben herausgestellt. Die Gültigkeit des Findungsprozesses der Methoden ist nicht von den Prämissen und der Analyse einer Lücke zu den Trendsettern abhängig. Vielmehr kann dieser Prozess mit geänderten Randbedingungen je neu durchlaufen werden, womit ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Wissenschaftlichkeit des Fachbereichs erzielt wird (siehe auch Fußnote 1).

Von den Prämissen zum Ansatz für das Engineering der Technischen Logistik (P-A 1 bis P-A 5)		
Abweichungen	Folgerung aus Lücke	Themenkreise, Ansätze, Wirkung und Methoden der Entwicklung in der Technischen Logistik
Technische Logistik - Prämissen	automotive/aerospace - Fakten	Themenkreis
spezifische Kundenlösungen	definiertes Produktspektrum	Ansatz
auch noch 2D-CAD	high-end 3D-CAD und CAD-Methodik	
lange Produktlebensdauer	kurze Produktlebensdauern	<p>Entwicklung - konstruieren.</p> <p>Analyse der logistischen Anforderungen führt zu technischen Grundfunktionen, die sich mit/aus einem Konstruktionsskatalog synthetisieren lassen. Paralleles Bearbeiten der logistischen Planung mit der konstruktiven Gestaltung --> simultaneous engineering.</p> <p>Entwicklungsmethodik und der gezielte Einsatz von "intelligent" aufgebauten CAD Modellen (CAD-Methodik) ermöglicht alternativen Lösungen (ggf. ohne "kreativen Einfall") die dann im CAD schnell umsetzbar sind.</p> <p>Bewertungsmethoden objektivieren die Auswahl von Varianten. Mit der Verwendung von Konstruktionsautomatisierung lassen sich diese Varianten effektiver erzeugen.</p>
Variantenerzeugung aus Projektdaptierungen	Konfiguration und Modularisierung	
projektspez. Entwicklung (Wissensspeicherung)	evolutionäre Entwicklung (Wissensspeicherung)	
Produktmanager „konstruieren“ mit Kunden	Funktionstrennung Vertrieb/Entwicklung	
Entwicklung über Prüfstandsversuche	CAE u. virtuelle Entwicklung (systemat.)	
wenige Nachweisregelwerke	standardisiertes, spezifisches Nachweiswesen u. -regelwerke	
empirisches Detailwissen	systematisches Detailwissen	
Materialflusstechnik	Komponente u. System	
wenige (veraltete) Normen, keine CAE Basis dafür	umfangreiche Auslegungsregeln auch auf Basis CAE	
projektorientierte Wissenssicherung	PDM, Wikis, Expertennetze	
kleine Entwicklungsabteilungen - Allrounder	vernetzte Spezialisten unterschiedlicher Domänen	<p>Auslegung, Nachrechnung, Optimierung - berechnen.</p> <p>Einsatz moderner CAE Techniken (FEM und MKS) zur Virtualisierung der Produktentwicklung, Verbesserung der Produktfunktion, Visualisierung der Teil- und Gesamtfunktion. Erleichterung des Einsatzes von CAE durch guided-simulation und templates.</p> <p>Einsatz anerkannter Auslegungsregelwerke (das allg. Maschinenbaus) und deren Neuentwicklung als/für standardisierte Nachweisverfahren. Synthese valider Submodelle zu Gesamtmodellen. Verbreiterung der Auslegungsgrundlagen durch virtuelle Sensitivitätsanalysen.</p>
spezifische Angebote	definiertes Angebot/Preis	
		<p>Assistenz - wissen</p> <p>Verwaltung von entwicklungsrelevantem Wissen unterschiedlichster Klassen, um dieses reproduzierbar und mit geringem Aufwand je nach Aufgabe einzusetzen. Eine unterstützende Software (XBE-app) gestattet diesen Einsatz bis hin zur externen Konstruktionssteuerung.</p>

Bild 2.36: Abweichungen der Prämissen Technische Logistik/Trendsetter, Forschungslücke und daraus. Themenkreise und Ansätze (Zusammenfassung Prozess P-A 1..5), vgl. [P3], Anschluss mit Bild 3.4

3 Methodiken und Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik

Methoden existieren für unterschiedlichste Anwendungsbereiche und werden vor allem intuitiv, also unbewusst, eingesetzt [EM13]. Der heutige Entwicklungsstand technischer Objekte kann zu einem Großteil als nicht methodisch entwickelt betrachtet werden [EM13]. Auch steht die Methodenanwendung seit vielen Jahren hinter dem konkreten Einsatz von Methoden zurück, obwohl diese zahlreich und für diverse Aufgaben existieren [PSO06]. Wenn, folgend nach [PSO06] und dort nach [TRE01], beispielsweise FMEA einen Bekanntheitsgrad von nahezu 100% aufweist, liegt deren Einsatzhäufigkeit unter 50%. Extremer ist die Situation bei innovativen Methoden wie Axiomatic Design¹⁰⁹ und TRIZ für die sowohl Bekanntheitsgrad als auch Einsatzhäufigkeit unter 15% liegen. „Die Gründe hierfür sind vielfältig. Zum einen fehlt das Wissen über die Existenz oder die Anwendung von Methoden. Zum anderen erlaubt der Zeitdruck der heutigen Märkte eine lange Suche nach Methoden bzw. das zeitintensive Erlernen ihrer Anwendung nicht. So werden Potenziale zur Optimierung der Produkt- und Produktionslogistik nicht ausgeschöpft, eine Tatsache, die sich heutzutage eigentlich kein Unternehmen leisten darf, das weiterhin erfolgreich am Markt bestehen möchte.“ [PSO06]

Daraus erwächst zwingend die Frage, ob und wozu Methoden überhaupt benötigt werden. Die folgenden Ausführungen geben darüber, nach allgemeinen Definitionen, in Anlehnung an [EM13] und [LIN05] v.a. in Kap. 3.1.2 Auskunft¹¹⁰.

¹⁰⁹ s. Kap. 6.14.3

¹¹⁰ Aufbauend auf dem Teilprozess P-A von erfassten Prämissen zu ersten Ansätzen sind zwischenzeitlich (Kap. 3.1) einige Definitionen erforderlich, bevor diese Ansätze mit dem Teilprozess AW-M (Kap. 3.2) schließlich zu den zehn entwickelten Methoden werden.

3.1 Allgemeines zu Methoden

3.1.1 Begriffe und Methodenarten

Mit Tabelle 8 wird die für die Methodenentwicklung nötige Begriffsklarheit geschaffen.

Tabelle 8: Begriffe im Umfeld „Methode“

Begriff	Beschreibung
Methodik¹¹¹	<p>Ganz allgemein versteht man unter Methodik: „Methodik (aus griechisch methodikḗ (technḗ) = Kunst des planmäßigen Vorgehens) ist in der Wissenschaftstheorie die Gesamtheit aller wissenschaftlichen „Hinwege“ zu einem Ziel, also die Wissenschaft von der Verfahrensweise einer Wissenschaft. Als Teildisziplin einer Wissenschaft ist Methodik auch die Lehre der in dieser Wissenschaft angewandten Lehr- und Unterrichtsmethoden. Ganz allgemein beschreibt der Begriff Methodik die festgelegte Art des Vorgehens. Methodik ist zu unterscheiden von Methodologie, der Reflexion über Methoden eines Fachgebiets. In den wichtigsten Fremdsprachen ist diese Unterscheidung jedoch nicht möglich, was Verwechslungen und Verwischungen der Begriffe auch im Deutschen zur Folge hat.“ [WIK15a]</p> <p>Im Kontext der Technik und hier vor allem der Produktentwicklung kann mit [EM13] konkretisiert werden, dass eine planmäßige Verfahrensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln eine Methodik ist.</p>
Methode¹⁰⁸	<p>Methoden sind also ein Teil der Methodik. Sie können bewusst oder unbewusst ablaufen und sind auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet, z.B. „Einhalten eines bestimmten Kostenziels“. Pläne, die eine Reihenfolge von Tätigkeiten enthalten, können also durchaus auch unbewusst ablaufen. Man braucht nur an den oft routinierten Ablauf beim Kochen zu denken.“ Ihr Ziel ist es, schrittweise und arbeitsteilig, aber auch zusammenfassend und integrierend vorzugehen. [EM13]</p>
Strategie	<p>Methoden sind konkreter als die Strategien, unter denen man eher eine flexible Leitidee versteht, wie z.B. „Das Wichtigste zuerst“, oder: „Möglichst wenig Teile.“ [EM13]</p>
Werkzeuge – tools – apps	<p>Werkzeuge sind noch konkretere Teilmethoden, sehr oft Computer-Werkzeuge, wie z.B. Simulationsmethoden FEM, BEM, MKS; Dokumentationsmethoden. Im modernen Sprachgebrauch wird auch anglizistisch tools oder moderner apps verwendet.</p>
Hilfsmittel	<p>„Unter Hilfsmitteln schließlich kann man die körperlichen Objekte zur Abwicklung der Informationsverarbeitung Entwickeln verstehen: z.B. Rechner, Zeichenbretter, Rapid Prototyping-Maschinen.“ [EM13]</p>

¹¹¹ Fortwährend wird aufgrund der Lesbarkeit, wenn im Gesamtkontext von den 10 entwickelten Methoden bzw. Methodiken gesprochen wird, oftmals von den 10 Methoden nicht differenzierend gesprochen, auch wenn es sich, wie bspw. bei MeK2, MeB1 und MeW1 strenggenommen um Methodiken handelt. Dies scheint neben der Lesbarkeit auch aus dem unscharfen Gebrauch der Differenzierung zwischen den beiden Begriffen im alltäglichen Sprachgebrauch der Anwender von Methodiken und Methoden gerechtfertigt; s. [WIK15a].

Nach [BRU14] und [WIK15b] ist Wissenschaftstheorie ein Teilgebiet der Philosophie und beschäftigt sich mit Voraussetzungen, Methoden, Zielen und der Form der Erkenntnisgewinnung. Wenn die **technischen Wissenschaften**, ein Teil naturwissenschaftlicher Realwissenschaften sind, bestehen sie ebenso aus drei wesentlichen Bestandteilen:

- Theorie,
- Empirie und
- Kommunikation.

Theorien legen den Rahmen fest, in dem empirische Untersuchungen möglich sind. Von **Wissenschaft** spricht man dann, wenn „Wissenschaft jede intersubjektiv überprüfbare Untersuchung von Tatbeständen und die auf ihr beruhende, systematische Beschreibung und - wenn möglich - Erklärung der untersuchten Tatbestände ist.“ [BRU14] Zur Erarbeitung der Theorien und der Empirie werden in allen Fachgebieten nachvollziehbare Methoden verwendet, die aufgrund der Unterschiedlichkeit der Fachgebiete äußerst divers sind. „Bei dem Versuch, sein Teilproblem zu lösen, steht dem Wissenschaftler prinzipiell die **Wahl der Methode** frei. Wesentlich ist nur, dass die Anwendung seiner Methode zu einer Theorie führt, die objektive, d. h. intersubjektive nachprüfbar und nachvollziehbare Aussagen über einen allgemeinen Sachverhalt macht und dass entsprechende Kontrollversuche durchgeführt wurden.“ [WIK15b]

Bild 3.1 ist eine **Einteilung von Methoden** mit Unterscheidungsmerkmalen. Weil noch vermutet wird ([EM13]), dass ein Großteil der heutigen Technik ohne relevanten Methodeneinsatz entstanden ist und dies noch nicht widerlegt wurde, ist die Wirkung von Methoden im Bereich der Technik nicht eindeutig beurteilbar.

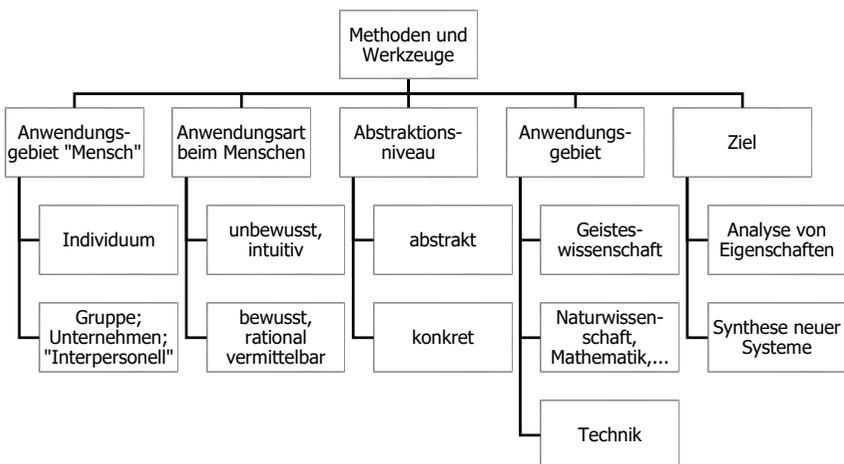


Bild 3.1: Überblick und Einteilung von Methoden nach [EM13]

Eine Einteilung von **Methoden in Kategorien**, auch innerhalb eines Fachgebietes, ist demnach schwierig und vielschichtig möglich und weiters auch immer subjektiv vom Wissen des Bearbeiters geprägt. Dennoch haben sich in der

Technik und hier speziell im interessierenden Gebiet der Entwicklung und Konstruktion einige Kategorisierungen herauskristallisiert. Erste Ansätze hierzu waren und sind papierbasierte Kataloge. Tabelle 9 gibt einen Überblick über verschieden Kategorisierungsansätze für Methoden und stellt die Kategorisierung der mit dieser Arbeit geschaffenen Methoden vor.

Tabelle 9: Einteilung und Kategorisierung von Methoden

Bereich	Quelle	Einteilung der Methoden in
Entwicklung und Konstruktion (Maschinenbau allg.)	[EM13] ¹¹²	Allgemein anwendbare Methoden
		Organisatorische Methoden
		Sachgebundene Methoden
	[VDI2221] u. [VDI2222]	Analyse- und Zielvorgabe Methoden
		Methoden zum Entwickeln von Lösungsideen
		Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren
		Bewertungsverfahren und Entscheidungstechniken
Projektmanagement	[TRE01]	Integrierte Methoden (Handlungsmodelle)
		Kreativitätsmethoden
		Analysemethoden
		Prognosemethoden
		Entscheidungsmethoden
		Kommunikationsmethoden
		Planungsmethoden
Entwicklung und Konstruktion (Technische Logistik)	diese Arbeit ¹¹³	Auswahlempfehlungen: Unterstützung der Methodenauswahl – Methodiken.
		Handlungsempfehlungen: Vorgehen
		Operative Ansätze: Vorgehen, Lösungssuche, Analyse

3.1.2 Methodeneinsatz und – auswahl und deren Nutzen

Die **Ziele der Bereiche Entwicklung und Konstruktion** leiten sich übergeordnet von den Unternehmenszielen ab. In erster Linie muss das konstruierte Produkt den Erfordernissen des Marktes entsprechen, dieser Produkterfolg ist wesentlich [EM13]. Die Ziele können kategorisiert werden in:

¹¹² Dabei handelt es sich nach [PSO06] um eine der drei relevanten Methodensammlungen neben jener von Hürlimann [HÜR81] nach [PSO06] und jener der VDI-Regelwerke 2221 und 2222 [VDI 2221], [VDI 2222].

¹¹³ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit und zur Verwendung mit MeK2 (Kap. 3.4.2) sowie der VDI-app (Kap. 6.11.1.9) wurde aus dem VDI2221/2222-Methodenkanon eine Auswahl für die Schließung der identifizierten Forschungslücke (Kap. 2.3 und 3.2) getroffen. Diese Methoden gehören nun vorwiegend der Gruppe „Sachgebundene Methoden“ nach der Gliederung [EM13] an und stellen somit eine Unterteilung darin dar. Mit sogenannten offenen W-Fragen lässt sich die Gliederung nachvollziehen bzw. bei Hinzukommen weiterer Methoden erweitern (s. Bild 3.5).

- Marktspezifische Ziele
- Herstellerspezifische Ziele
- Persönliche Ziele der Konstrukteure

Zu ihrer Erreichung sind Methoden probate Mittel, die sich unterschiedlich etabliert haben. „Methoden sind notwendig und wirksam, wenn sie individuelle und gruppenmäßige Schwächen und Grenzen des Entwickelns und überhaupt unseres natürlichen Denkens verringern. – Man kann den Konstruktionsprozess als eine zielgerichtete Abfolge von Tätigkeiten auffassen. Dann sind Methoden Hilfen, um das Ziel leichter und besser zu erreichen.“ „Der eigentliche Grund für den Methodeneinsatz ist die Begrenzung des Kurzzeitgedächtnisses, also des Arbeitsspeichers in unserem Gehirn mit 7 ± 2 chunks ... , worauf ja auch die Denkökonomie zurückzuführen ist. Es scheint aber auch eine individuelle, für bestimmte Themen nötige methodische Aktivierung des Langzeitgedächtnisses zu geben.“ [EM13]

Zum **Methodeneinsatz** zwingen demzufolge vier langfristige Trends¹¹⁴ [EM13]:

- Wissensexplosion:
zwingt zur Spezialisierung und damit als Folge zur Zusammenarbeit im Team.
- Vielfaltsexplosion:
nicht nur an Produkten, sondern auch an Informationen, Medien, Meinungen und Zielen.
- Komplexe Systeme:
entstehen v.a. durch maschinelle Informationsverarbeitung. Auch der Zuwachs an wissenschaftlicher Erkenntnis über Maschinenelemente und Maschinenarten trägt stark zur Komplexität bei. Schließlich sind alle Eigenschaften der Produkte im Verlauf ihres Lebens zu berücksichtigen wie z.B. Mensch-Maschine-Kommunikation, Service, Instandhaltung, Energie- und Stoffverbrauch, Ökologie, Recycling. Ein Einzelner kann das unmöglich beherrschen und ausgewogen einbringen!
- zunehmender Zeitdruck:
bei geringeren Kosten und mehr Flexibilität.

Mit Bild 3.2 formuliert [EM13] **Thesen für den Einsatz und die Wirkung von Methoden**. Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch den Einsatz von Methoden der entstandene Mehrwert im Allgemeinen den Mehraufwand übertrifft. Direkt daraus leitet sich die Auswahl und der richtige Einsatz von Methoden ab.

¹¹⁴ Vor dem Entstehen vieler Trends wurde aufgrund der Aufgabenkomplexität und aus Überwindung des eventuellen Mangels an Kreativität im Entwicklungsprozess Konstruktionsmethodik erarbeitet. Konstruktionsmethodik (bspw. mit [VDI 2221]) zählt somit zu den lange etablierten und auch eingesetzten Methodiken, der verwandte Methodiken bspw. der mechatronischen und softwaretechnischen Entwicklung, naturgemäß chronologisch, folgten. Konstruktionsmethodik kann als wirksam bezeichnet werden, wenn diese als subjektiv wirksam erlebt wird und wenn sie objektiv wirksam ist. [EM13]

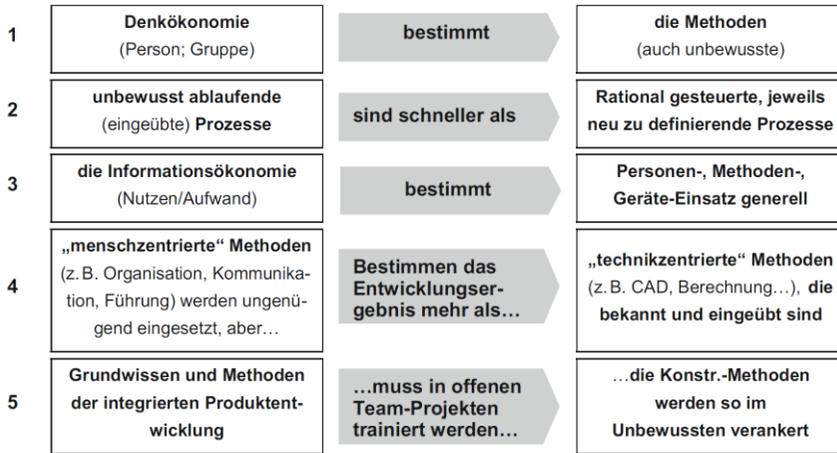


Bild 3.2: Fünf Thesen für den Einsatz und die Wirkung von Methoden [EM13]

Für gegebene Situationen und Tätigkeiten muss man je neu die **passende Methode auswählen** und bei Bedarf adaptieren. Dabei ist es entscheidend, die Randbedingungen des Methodeneinsatzes zu klären, wofür „output“ und „input“ heranzuziehen sind. [LIN05] Methoden müssen also situationsgerecht sein, allerdings gilt: „Es gibt keine Universalmethode für jede Situation. ... Immer wieder im Prozess muss die Ist- und die jeweilige Soll-Situation geklärt werden. Man braucht aber eine gewisse Produkt-, Prozess- und Methoden-Erfahrung, um dann die richtige Methode zu finden.“ [EM13]

Hilfreich bei der Auswahl und Beurteilung der richtigen Methode sind die in [EM13] eingeführten und zu beurteilenden Kriterien der Methodenauswahl:

- Leistung der Methode (Zweck, Gültigkeitsbereich)
- Anwendbarkeit
- Verfügbare Zeit, Kosten
- Betriebliche Eignung
- Persönliche Voraussetzungen
- Verfügbare Hilfsmittel

Zur konkreten Auswahl von Methoden existieren unterschiedliche **Informationsspeicher von Methoden** wie in Tabelle 10 dargestellt:

Tabelle 10: Ansätze zur Methodenbereitstellung

Dimension	Beschreibung
Papiergebundene Sammlungen	bspw. Kataloge, Monographien, etc. mit Bewertungs-/Auswahlwerkzeugen
Methodenmanagement-systeme	MEPORT-Portal [PSO06] problembasierte oder prozessbasierte Auswahl im Bereich wirtschaftlich-ökonomisch Methoden des Projektmanagements
	VDI-app [GAR14] konstruktionsphasenbegleitende Software-Entscheidungshilfe der Auswahl von Konstruktionsmethoden basierend auf den VDI 2221ff. Regelwerken
	MeK2 in Kap. 3.4.2 (teilw. papiergebunden)
Münchner Methodenmodell [LIN05]	fasst die Schritte zur Klärung des Einsatzes, zur Auswahl, zur Adaption und zur Anwendung von Methoden sowie ihren grundsätzlichen Eigenschaften zusammen. [LIN05]
technisch-logistisches Methodeneinordnungsmodell (Kap. 3.3)	stellt v.a. die Wirkung der in diesem Kontext entwickelten Methoden im Bereich der Entwicklung von Produkten der Technischen Logistik dar. Indem es die Größe des technisch-logistischen Objekts differenziert, die Tätigkeiten in die vier Konstruktionsphasen gliedert kann es die Wirkung der entwickelten und noch zu entwickelnden Methoden übersichtlich darstellen und so deren effiziente Auswahl ermöglichen.

3.2 Ein Beitrag zur Schließung der identifizierten Lücke automotive/aerospace – Technische Logistik durch 10 Methoden

Die in Kap. 2.3 dargelegte Situation des Engineerings in der Technischen Logistik führt im Vergleich zu anderen Branchen (automotive/aerospace) zu den in Bild 2.36 dargelegten Lücken bzw. Abweichungen. Aus dem mit dem Prozess P-A (Bild 2.31) über die Prämissen gefolgerten Ansätzen können nun konkrete Methoden entwickelt werden. Dies ist mit dem Prozess AW-M (Bild 3.3) definiert.

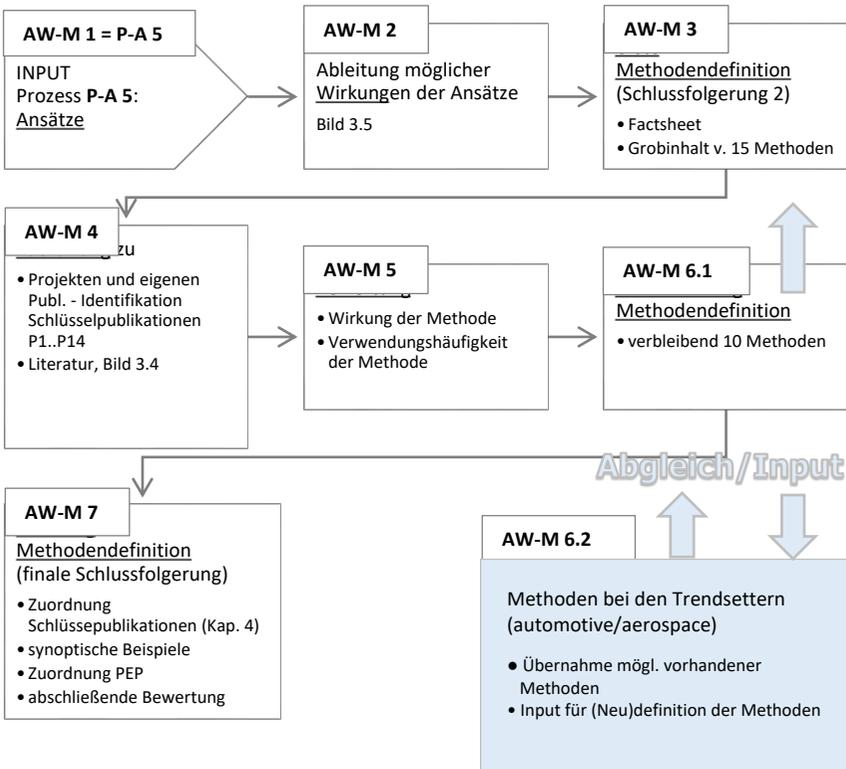


Bild 3.3: Teilprozess AW-M (Methodendefinition) vom Ansatz mit den Prämissen zu den Methoden

Aus den Ansätzen, als Ergebnis des Prozess' P-A und Input für den Prozess AW-M, folgen deren Wirkungen als Grundgerüst für den zu entwickelnden Methodeninhalt. Die **Wirkung der Ansätze** (Bild 3.4) lässt sich wie folgt kurz zusammenfassen; **Schritt AW-M 2**^{115,116}:

- Der Themenkreis konstruieren verbreitert die Lösungsmöglichkeit und damit die Produktvielfalt zu angepassteren Produkten.
 - Der Themenkreis berechnen sichert die Funktion der Produkte.
- Der Themenkreis wissen sorgt für die Speicherung und den effizienten Einsatz des Engineering-Wissens in den o.a. Themenkreisen.

Für die Wirkung der Ansätze wird iterativ die **erste Methodendefinition** entworfen¹¹⁷;

Schritt AW-M3. Für deren Darstellung dient folgend das entwickelte Methodenfactsheet, (Kap. 3.3).

Nach mehrfachen Inhaltsiterationen folgt die **Zuordnung der entworfenen Methoden** zu eigenen Arbeiten und publizierten Vorgehensweisen aus dem Kontext; **Schritt AW-M 4**¹¹⁸.

¹¹⁵ s. auch Bild 2.36

¹¹⁶ Die Wirkung der Ansätze stellt auch die Grundüberlegung und die Dimensionen bei der Methodendarstellung im „Methodeneinordnungsmodell“ (s. Kap. 3.3) dar.

¹¹⁷ Von untergeordnetem Interesse sind die in der ersten Definition verworfenen Methoden, die aber den Findungsprozess darstellen sollen und somit hier nur ergänzend dargestellt sind. Die folgende 14 Methoden stellen den ersten Entwurf im Grobinhalt dar, *ausgegraute Methoden* werden im Schritt AW-M 5 verworfen:

- Themenkreis konstruieren:
 1. frühestmögliche Ableitung technischer Anforderungsdefinition aus der Logistik
 2. Funktionenanalyse und deren Synthese aus grundlegenden Wirkprinzipien
 3. Best practice Beispielsammlung und Wirkprinzipiendatenbank
 4. Einsatz von Methodik im CAD
 5. Methodisches Entwickeln
 6. Einsatz von Kennzahlen und Bewertungsmethodik
 7. automatisierte Konstruktion (KBx)
- Themenkreis berechnen:
 1. Modellbildung CAE (MKS, FEM)
 2. CAE (MKS, FEM) best practice u. Modelldatenbank
 3. Berechnungsgrundlagen (Normen,...) vertiefen durch CAE
 4. Funktionsoptimierung durch CAE
- Themenkreis wissen:
 1. Wissensbereitstellung im Engineering
 2. Abhängigkeitsentwicklung und deren Dokumentation in Konstruktionen
 3. externe CAD-Steuerung

¹¹⁸ Dazu dient eine umfangreiche Datenbank mit vielfachen Attributen je Methode, die den einzelnen Arbeiten und Literaturquellen (Einträge) zuordenbar sind. Je Eintrag kann dann eine Haupt- und Nebenmethode der o.a. Auswahl identifiziert werden, die den jeweiligen Fortschritt ermöglicht. Weitere Zuordnungen erfolgen über die Position des Eintrags im Produktentwicklungsprozess, die Art des materialflusstechnischen Gewerks (Komponenten, Baugruppe, Maschine, Anlage) und die allgemeine Einordnung in einen der drei Themenkreise.

Aufgrund einer folgenden **Bewertung** werden einige Methoden (Fußnote) nicht weiterverfolgt; **Schritt AW-M5**¹¹⁹.

Aus der Bewertung folgend geht die **Überarbeitung der Methodendefinition** von Schritt AE-M3 hervor. Entscheidend ist hierbei der **Abgleich** der Methoden mit deren Vorhandensein bzw. Einsatz in den Trendsetter-Branchen; **Schritte AW-M 6.1 und 6.2**.

Als relevant für den Erfolg im Entwicklungsprozess bei den Trendsettern können folgende Ansätze für den Abgleich mit den Methoden genannt werden; **Schritt AW-M 6.2**:

- theoretische Aufbereitung und Einsatz von CAE für virtuelles Engineering
- theoretische Aufbereitung und v.a. Einsatz des methodischen Entwickelns
- theoretische Aufbereitung und Einsatz des Wissensmanagements
- Beherrschung von Komplexität durch Methoden daraus.

Nur jene Methoden, die auch in den Trendsetterbranchen effizient genutzt werden, bzw. jene, die aus einem Abgleich mit den Trendsetterbranchen heraus adaptiert wurden, sind in der **Fixierung der Methodendefinition** wiederzufinden; **Schritt AW-M 7**. Diese sind nun final in Tabelle 11 angegeben¹²⁰. Bild 3.4 setzt Bild 2.36 fort und ordnet die oben final dargelegten Methoden den Ansätzen und deren Wirkung zu. In den drei Themenkreisen lassen sich die Tätigkeiten, die für die Wirkung der Ansätze nötig sind noch weiter aufteilen und zuordnen, nämlich dem¹²¹:

- konstruieren ← entwerfen, konstruieren an sich und verbreiten von Konstruktionen
- berechnen ← berechnen/simulieren und absichern und verbreiten

Nach den in Kap. 2 eingeführten Grundlagen zu Methoden sind jene nach ihrer Art differenzierbar. Bild 3.5 ordnet die 10 entwickelten Methoden den Kategorien Auswahlempfehlungen, Handlungsempfehlungen und operative Ansätze zu.

¹¹⁹ Die Bewertung basiert dabei hauptsächlich auf der Beurteilung der Wirkung der Methoden in den Arbeiten und Literaturquellen der Datenbank sowie auf deren Verwendungshäufigkeit. Ist eine solche nur eingeschränkt darstellbar, wird die Methode als nicht wirksam gekennzeichnet; eine abschließend bewertete Summe stellt dann eine Reihenfolge der Methoden dar, die unwirksamsten werden verworfen.

¹²⁰ Eine abschließende Bewertung bei Schritt AW-M 7 hat als Ergebnis auch den Inhalt weiter Teile der vorliegenden Arbeit, namentlich die:

- Identifizierung von Schlüsselpublikationen, die die Wirkung der entwickelten Methoden vorrangig darstellen.
- Die Ausarbeitung von drei synoptischen Beispielen, die zusammenschauend den Einsatz der Methoden promoten (Kap. 4).

¹²¹ Diese feingranulare Gliederung wird aus Übersichtlichkeitsgründen nicht weiter aufgegriffen, da die Tätigkeiten der Methoden im Detail den Beschreibungen aus Kap. 3.4ff. zu entnehmen sind.

Tabelle 11: 10 Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik als Endergebnis des Schritts AW-M7 der Teilprozesse P-A und AW-M

Themenkreis	Methode
<u>konstruieren,</u> MeK#	1. simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik
	2. methodisches Entwickeln
	3. rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen
	4. Methodikeinsatz im CAD
	5. KBx
<u>berechnen,</u> MeB#	1. Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik – CAE
	2. Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und – gültigkeiten durch CAE
	3. template-driven Simulationslösungen
<u>wissen, MeW#:</u>	1. Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess
	2. Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen – xKBE-app

Vom Ansatz zu den Methoden für das Engineering der Technischen Logistik (AW-M 1 bis AW-M 6)					
Themenkreise, Ansätze, Wirkung und Methoden der Entwicklung in der Technischen Logistik					
Themenkreis	Ansatz	Wirkung allgemein	konkrete Methoden	Methodenarten	Tätigkeit
Entwicklung - konstruieren.	Analyse der logistischen Anforderungen führt zu technischen Grundfunktionen, die sich mit/aus einem Konstruktionskatalog synthetisieren lassen. Paralleles Bearbeiten der logistischen Planung mit der konstruktiven Gestaltung -> simultanes engineering.	Frühstmöglicher Konnex logistischer Anforderungen zur Geräteentwicklung. Konstruktive Lösungs-Datenbasis für Folgeentwicklungen.	MeK1, MeK3	Auswahl- und Handlungsempfehlungen, operative Ansätze	entwerfen
	Entwicklungsmethodik und der gezielten Einsatz von "intelligenter" aufgebauten CAD Modellen (CAD-Methodik) ermöglicht alternativen Lösungen (ggf. ohne "kreativen Einsatz") die dann im CAD schnell umsetzbar sind.	Konstruktionsvielfalt durch methodisches Entwickeln. Konstruktionsbasis für autom. Konstruktion.	MeK2, MeK4		
	Bewertungsmethoden objektivieren die Auswahl von Varianten. Mit der Verwendung von Konstruktionsautomatisierung lassen sich diese Varianten effektiver erzeugen.	Kennzahlen und Bewertungsmethoden "sichern" vor subjektiven Entscheidungen. Die Produkte werden angepasster, schneller erstellt und die Konstrukturen entlastet.	(MeK2), MeK5	berechnen/ simulieren	absichern und verbreiten
	Einsatz moderner CAE Techniken (FEM und IMS) zur Virtualisierung der Produktentwicklung, Verbesserung der Produktfunktion, Visualisierung der Teil- und Gesamtfunktion. Erleichterung des Einsatzes von CAE durch guided-simulation und templates.	Virtuelle Entwicklung ermöglicht simultaneus engineering. Virtualisierung der berechnerschen Tätigkeiten des Engineerings mit Qualitätsverbesserung, Verbreiterung der Berechnungskapazitäten, Bearbeitungszeitverkürzung gegenüber Versuchen und eher Wiederverwendung von (Teil)modellen	MeB1, MeB3		
	Einsatz anerkannter Auslegungswerke (des allg. Maschinenbaus) und deren Neuentwicklung als/für standardisierte Nachweisverfahren. Synthese valider Submodelle zu Gesamtmodellen. Verbreiterung der Auslegungsgrundlagen durch virtuelle Sensitivitätsanalysen.	Auslegungsbasis verbessern und sicherere Komponenten entwickeln. Produkthaftung absichern mit anerkannten Standards. Berechnung und Simulation einfacher und breiter anwenden.	MeB2, (MeB3)		
Assistenz - wissen	Verwaltung von entwicklungsrelevantem Wissen unterschiedlichster Klassen, um dieses reproduzierbar und mit geringem Aufwand je nach Aufgabe einzusetzen. Eine unterstützende Software (XBE-app) gestattet diesen Einsatz bis hin zur externen Konstruktionssteuerung.	Beschleunigung des Entwicklungsprozesses, angepasste Produkte. Wiederverwendung von Wissen inkl. dessen dokumentierter Einsatz. Wissensbasis für automatisierte Konstruktion.	MeW1, MeW2	Auswahl- empfehlungen, operative Ansätze	wissen

Bild 3.4: Themenkreise und Ansätze führen mit deren Wirkung zu den Methoden (Zusammenfassung Prozess: AW-M 1 bis AW-M 7); Anschluss an Bild 2.36.

Mit Methodiken, die **Auswahlempfehlungen** darstellen, soll aus einem großen Fundus verfügbarer einzelner Methoden eine Hilfestellung zur Auswahl bereitgestellt werden, die sich nicht nur auf den Inhalt und die Wirkung der Methoden sondern auch auf deren zeitlichen Einsatz im PEP bezieht¹²². Die drei zugehörigen Methodiken sind etablierte Vorgehensweisen adaptiert für die Technische Logistik. Die Auswahlempfehlungen können als Vorgänger der Handlungsempfehlungen und operativen Ansätze gesehen werden. Mit Methoden, die **Handlungsempfehlungen** darstellen, sollen Vorgehensweisen promotet werden, die sich als effizient in der Produktentwicklung herausgestellt haben. Die beiden zugehörigen Methoden sind dabei aus Literaturquellen abgeleitete Vorgehensweisen adaptiert speziell für die Technische Logistik. Die konkretesten Methoden sind jene der **operativen Ansätze**, die einen konkreten Einsatz im Produktentwicklungsprozess und somit Engineering der Technischen Logistik ermöglichen. Die zugehörigen fünf Methoden sind dabei eine Mischung aus Literaturmethoden und selbst entwickelten Ansätzen und stellen die Hauptneuheit der Arbeit dar¹²³.

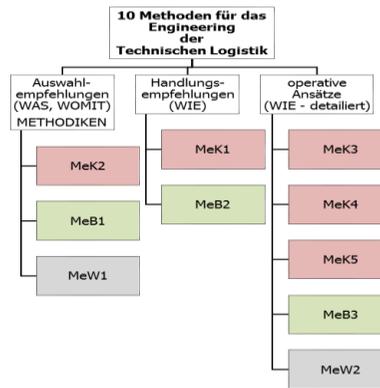


Bild 3.5: Die Arten der entwickelten Methoden

Element der finalen Fixierung der Methoden mit **Schritt AW-M 7** ist ebenfalls die Zuordnung der Methoden zu ihrem (zeitlichen) Vorkommen im Produktentwicklungsprozess. Bild 3.6 zeigt das Hauptvorkommen und den – einsatz der entwickelten 10 Methoden im definierten Produktentwicklungsprozess. Die meisten Methoden sind effizient in der frühen Entwurfsphase einzusetzen und sind somit für Neu- bzw. besser noch Anpassungskonstruktion einsetzbar. Das simultaneous engineering und frontloading mit MeK1 ragt dabei über die Phase der Entwicklung/Konstruktion hinaus in die vorbereitende Phase der Produktplanung. Ebenso ist die Wissensbereitstellung im Konstruktionsprozess nicht auf diesen beschränkt und sie ragt sowohl in die Produktplanung als auch in die Herstellung (vgl. dazu auch Bild 2.27). Beide Methoden sind damit nicht nur Element des Produktentwicklungsprozesses (PEP) sondern des gesamten Produktlebenszyklus' (PLZ).

¹²² Beispielsweise ist unter „methodisches Konstruieren“ eine derartige Fülle an einzelnen Methoden zu verstehen, dass eine sinnvolle Auswahl ohne Hilfe oft schwierig gerät.

¹²³ Weitere Ausführungen zur Neuartigkeit s. Kap. 3.4ff. und Kap. 5.

Engineering in der Technischen Logistik								
Methoden und deren Ziele								
Vorgehen nach [VDI 2221]	Phase	Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	Konzeption		Entwurf		Ausarbeitung	-> Fertigung PEP: Nachfolger
	Arbeits-schritt		Aufgabe klären	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module		
Ergebnis		Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtenwurf	Produkt-dokumentation
Konstruk-tionsart	Neukonstruktion							
	Anpassungskonstruktion							
	Variantenkonstruktion							
Wiederholkonstruktion								
konstruieren	MeK1	simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik						
	MeK2	methodisches Entwickeln						
	MeK3	rechnergestützte Bereitstellung u. Synthese v. Lösungsprinz.						
	MeK4	Methodikeinsatz im CAD						
	MeK5	autom. Konstr. (KBE, KBSD, (KBL) = KBx)						
berechnen	MeB1	Berechnungs-Auslegungs-/ Optimierungsmethoden						
	MeB2	Modellbildung und Simulation für die Technische Logistik - CAE						
	MeB3	Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und -gültigkeiten template-driven Simulationslösungen						
wissen	MeW1	Wissensmethoden						
	MeW2	Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in autom. Konstruktionen						

Bild 3.6: Ein- und Zuordnung der finalen Methodendefinitionen zum Fortschreiten im PEP (und PLZ) und Tätigkeiten (vgl. Bild 2.35)

3.3 Zur Gültigkeit und Aktualität der identifizierten Methoden: Das Methodenfactsheet und das technisch-logistische Methodeneinordnungsmodell

Die dargelegten und identifizierten 10 Methoden für das Engineering der Technischen Logistik (Kap. 3.4ff.) stellen einen Beitrag des Transfers von in Trendsetterbranchen effizient, erfolgreich und etabliert eingesetzten Methoden und Wissen hin zur Technischen Logistik dar. Die Methodenentwicklung basiert auf den formulierten Prämissen und ist daher eng an deren Entstehungs/Formulierungszeit geknüpft; ihre **Aktualität** ist dabei stets zu betrachten. Ebenso ist natürlich auch die Entwicklung bei den Trendsettern innovativ fortschreitend und es kann angenommen werden, dass stets neue Methoden dazukommen bzw. althergebrachte ersetzen. In diesem Sinne kann von einer Momentaufnahme gesprochen. Um aber darüberhinaus einen Mehrwert auch mit dieser Arbeit zu schaffen, wurde ein Rahmen geschaffen, in dem die Methoden, und auch im Laufe der Zeit weiter hinzukommende, dargestellt und ihre Wirkung hervorgehoben werden können bzw. neue entwickelt werden können. Dazu sollen dienen:

- Die beiden Prozesse zum Auffinden neuer Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik (Kap. 2.3 und Kap. 3.2):
 - P-A:
 - um eine Lücke zu fortgeschritteneren Engineering-Ansätzen zu identifizieren.
 - AW-M:
 - um aus den Ansätzen Methoden für eine variable Situation abzuleiten (die Datenbank der Zuordnung (Schritt AW-M 4) ist beliebig mit Quellen befüllbar und somit für viele Situationen angepasste Methoden entwickelbar).
- Das Methodenfactsheet.
- Das Einordnungsmodell.

Mit einer dadurch quasi standardisierten Umgebung soll es auch zukünftig gelingen, beim neuerlichen Durchlaufen der Identifikationsprozesse für die Methoden, die dadurch neu hinzukommenden Methoden einheitlich mit dem Methodenfactsheet und dem Einordnungsmodell darzustellen, insbesondere, wenn zukünftig abweichende Prämissen zum Durchlaufen der Prozesse P-A und AW-M vorliegen¹²⁴.

¹²⁴ Kritisch bleibt auch zukünftig die Annahme zu hinterfragen, ob es sich bei den identifizierten Trendsetterbranchen automotive/aerospace wirklich noch um solche handelt, oder ob dann vermeintliche Trends aus aktuellen Notlagen und Bewältigungsproblemen heraus entstehen und die identifizierte Forschungslücke in dieser Form nicht existiert. Weiters ist zukünftig auch zu hinterfragen ob nur Tools und Software-Produkte übergeordneter Hersteller eingesetzt werden, die so eigentlich die Trends diktieren. Die Überlegungen sind in der vorliegenden Momentaufnahme nicht zutreffend, wohl aber bei Entwicklung neuer Methoden heranzuziehen.

Die **Gültigkeit** und vor allem der Nutzen der entwickelten Methoden ist vornehmlich im Bereich kleiner und mittlerer Unternehmen der Technischen Logistik angesiedelt (KMUs), da große Hersteller der Technischen Logistik aufgrund größerer Konstruktions- und Entwicklungsabteilungen über ähnliche Strukturen und Methoden/Werkzeuge verfügen wie die identifizierten Trendsetter¹²⁵.

Das **Methodenfactsheet** (Bild 3.7) ist eine vereinheitlichte Darstellungsform für die entwickelten Methoden, um v.a. ihren Einsatzzweck und Nutzen übersichtlich darzulegen. Mit dem Zwang in den formalen Rahmen, wird die Verständlichkeit der Methoden besser. Die vorgegebenen Textrahmenblöcke erleichtern die Les- und Zuordenbarkeit des Texts bei mehrseitiger Darstellung zu den Überschriften.

<u>Kurzbeschreibung</u>	<u>Bewertung</u>
Problemstellung <input type="text"/>	Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile <input type="text"/>
Zielsetzung <input type="text"/>	Neuheitsgrad <input type="text"/>
Lösungsansatz/Arbeitsprinzip <input type="text"/>	<u>Beispiele</u> <input type="text"/>
<u>Durchführung</u>	<u>Quellen</u> <input type="text"/>
Ablaufplan (Bild <input type="text"/>)	
Schritte <input type="text"/>	
Hilfsmittel (Software) <input type="text"/>	
<u>Prozessphasen</u>	
Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung <input type="text"/>	
Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit <input type="text"/>	

Bild 3.7: Das Methodenfactsheet - Grundstruktur

¹²⁵ Bspw. haben Flurförderzeughersteller starke Ähnlichkeit zu Fahrzeugherstellern und setzen z.B. MKS-Simulation mit MSC.ADAMS ein – bei Jungheinrich.

Inhaltlich ist über die formale Methodenbeschreibung und den Einsatz der Methode v.a. die **Ein- und Zuordnung in den Produktentwicklungsprozess** hervorzuheben. Durch das Aufzeigen der Vernetzung zu anderen Methoden der Arbeit wird ein großes Ganzes besser sichtbar. Nützliche Ergänzungen, wie bspw. die Angabe von verfügbaren Hilfsmitteln (Software) und erläuternde Beispiele ergänzen die obligaten Inhalte¹²⁶.

Das technisch-logistische **Methodeneinordnungsmodell** (s. Bild 3.8) soll bei der Auswahl der geeigneten Methode und dabei bei der Beurteilung derer Wirksamkeit unterstützen und ist als Konstruktionsunterstützungswerkzeug zu sehen. Dazu wird die Wirkung der einzelnen Methoden grafisch dargestellt. Aus der Literatur sind dazu Methoden für Produktentwicklungsaufgaben bekannt, wie bspw. das Münchener Produktkonkretisierungsmodell¹²⁷. Daraus abgeleitet und stark adaptiert für die Technische Logistik versucht das technisch-logistische Methodeneinordnungsmodell nun den ingenieurlichen Entwicklungsprozessen Methoden zuzuordnen. In einem ersten Schritt werden im Modell die 10 entwickelten Methoden grafisch dargestellt, indem mittels Pfeilen die **Hauptwirkungen der Methoden** visualisiert werden, dies geschieht in mehreren Räumen und Dimensionen (Tabelle 12 und Tabelle 13)¹²⁸.

Das Methodeneinordnungsmodell zeigt nun auf grafische Weise, was, wann im PEP (Bild 3.9) mit welcher Methode wie erreicht werden kann. Durch die **interaktive Arbeitsweise mit dem Modell** (Bild 3.10) kann von einer zu erzeugenden Wirkung ausgegangen werden und das Modell auch „befragt“ werden. Durch die Verwendung von Layern und Filtern kann man so in einer bestimmten PEP-Phase eines logistischen Objekts nach Methoden für eine dargestellte Wirkung suchen.

¹²⁶ Vergleiche dazu auch die Darstellung von Methoden am Portal MEPORT® [MEP14a]. Das Methodenfactsheet dient darüberhinaus der aufbereiteten Sammlung der Informationen zur Methode, um diese in einem IT-System oder einer Webpage und darüberhinaus in einem Methodenmanagementsystem darzustellen bzw. einzupflegen, vgl. abermals MEPORT® [PSO06].

¹²⁷ Dabei handelt es sich um ein „Beschreibungsmodell für den Entwicklungsprozess, das sich am Konkretisierungsgrad der im Laufe des Entwicklungsprozesses erzeugten und genutzten Produktmodelle orientiert. Die beiden Hauptkomponenten des Beschreibungsmodells sind der Anforderungsraum und der Lösungsraum. Zur Orientierung für den Entwickler enthält das Modell die wesentlichen Dimensionen für das Vorgehen im Entwicklungsprozess:

- den Konkretisierungsgrad (zugehörige Aktivitäten: konkretisieren/abstrahieren),
- den Zerlegungsgrad (zugehörige Aktivitäten: zerlegen/zusammenfügen) und den
- Variationsgrad (zugehörige Aktivitäten: variieren/einschränken).

Im Lösungsraum werden drei Konkretisierungsebenen unterschieden: die Funktions-, Wirk- und Bauebene.“ [LP08]

¹²⁸ Die konkrete Ein- bzw. Zuordnung der 10 entwickelten Methoden mit dem Methodenfactsheet erfolgt in den Kapiteln 3.4, 3.5 und 3.6. Die Wirkung der Methoden mit dem Methodeneinordnungsmodell ist in Kapitel 5.1 dargestellt.

Tabelle 12: Wirkungen und Räume des Methodeneinordnungsmodells (s. Bild 3.8)

Wirkung/Raum	Beschreibung
Grafische Wirkungsdarstellung (Pfeile)	<p>→ Konkretisierung und Spezialisierung bzw. Variation und Verallgemeinerung/Verbreiterung mit den Methoden</p> <p>→ Beschleunigung von Konstruktionstätigkeiten bzw. Phasenverkürzung mit den Methoden</p>
Anforderungsraum	<p>Hier entstehen die eigentlichen Anforderungen an die Produktentwicklungsaufgabe aus den logistischen Vorgaben. Er beinhaltet die logistische Planungstätigkeit (Modelle dazu s. Kap. 3.4.1) bzw. die Produktplanungstätigkeit. Als Vorgänger des Konstruktionsraums im Entwicklungsfortschritt werden darin die Anforderungen an die Aufgabenklärung der Entwicklung/Konstruktion abgeleitet.</p>
Konstruktionsraum	<p>Der Konstruktionsraum stellt die eigentliche Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit phasen- bzw. abschnittsweise dar. Darin werden die entwickelten Methoden in ihrer Wirkung dargestellt. Diese sind in zwei Richtungen dargestellt, die den beiden Hauptdimensionen des Modells entsprechen, und zeigen die Möglichkeit der Beschleunigung des Entwicklungsvorhabens und die Lösungskonkretisierung bzw. Verallgemeinerung für Produktfamilien auf (Pfeile). Durch den Lösungsraum bewegt man sich abschnittsweise nach dem in Bild 3.9 dargestellten Prozess des Fortschreitens zwischen Vielfalt und Konkretisierung um zum Endergebnis einzelner Konstruktionen oder Baureihen zu kommen.</p> <p>Der Konstruktionsraum ist der eigentliche Ort der Wirkung aller entwickelten Methoden; im Falle von MeK1 kommt noch die Interaktion mit dem Anforderungsraum hinzu.</p>
Produktionsraum	<p>Da sich jeder Entwicklung und Konstruktion die Produktion anschließt, ist deren Umgebung als Produktionsraum der Vollständigkeit halber auf den Konstruktionsraum folgend angedeutet.</p>

Tabelle 13: Dimensionen des Methodeneinordnungsmodells

Dimension	Beschreibung
<p>4 Ebenen logistischer Objekte</p> <p>vertikale Dimension</p> <p>vgl. Definitionen in Kap. 2.2.3.3 mit Bild 2.17</p>	<p>Beschreibung</p> <p>Die Einteilung orientiert sich an der physischen Größe und dementsprechend an der Komplexität der Objekte. Anlagen sind für die Entwicklung und Konstruktion hier nicht sinnvoll feingranular darstellbar, dass die entwickelten Methoden dort greifen könnten. Sie sind vornehmlich im Themenkreise „Wissen“ vertreten.</p> <p>Zweck</p> <p>ist die gliedernde Zuordnung der einzelnen Methoden zu den Größendimensionen der logistischen Objekte.</p> <p>Tätigkeiten</p> <p>Komponente – konstruieren, Baugruppe – assemblieren, Maschine – konfektionieren.</p>

	<p>Assembling und Disassembling für entwicklungsaufgabenangepasste Sicht.</p>
<p>Beispiel</p>	<p>Vertikale Durchdringung der (System)Anforderungen aus dem Logistikkaum von der Anlage bis auf die Komponente hinunter. Am Beispiel Sortieranlage kann der Ansatz mit Anlage/Maschine/Baugruppe/Komponenten nochmals verdeutlicht werden: Element der Sortieranlage ist die einzelne „Maschine“ des Verteilförderers, welche mit der Baugruppe Kettenförderer darin Komponenten wie bspw. das Kettenrad aufweist.</p>
<p>Beschreibung</p>	<p>Entwickelnde Tätigkeiten „pendeln“ zwischen einer Lösungsvielfalt und derer Einschränkung, bis beim fertigen Produkt sich die Frage nach Vielfalt erneut stellt (s. Fortschreiten). Während möglichst viele Konzepte und Entwürfe zu einer optimalen Lösung führen, kann ein konkretes Produkt statisch gestellte Anforderungen erfüllen. Wenn sich diese aber nur minimal ändern kann darauf nicht mehr reagiert werden. Hier kommen Modul- und Baureihenkonstruktionen zum Einsatz, die auf gleichen Konzepten und Entwürfen aufbauen.</p>
<p>Zweck</p>	<p>ist die Differenzierung der Methoden, ob damit Lösungs/Produktvielfalt (bewertend) eingeschränkt wird, oder eine solche erzeugt werden kann. Ebenso Abbildung einer qualitativen Verbesserung von Produkteigenschaften im Spezialisieren bzw. Absicherung im Verallgemeinern bei Baureihen.</p>
<p>Tätigkeiten</p>	<p>bewerten, konkretisieren, Varianten entwickeln, modularisieren.</p>
<p>Beispiel</p>	<p>Mit dem knowledge-based engineering (KBE und KBx) wird Produktvielfalt erzeugbar. Lösungsvielfalt wird bspw. durch Bewertungsmethoden von MeK2 eingeschränkt. CAE verbessert die Beherrschung von Produkteigenschaften und verallgemeinert somit und sichert ab.</p>
<p>Wirkung (Pfeile)¹²⁹</p>	<p>Konkretisierung und Spezialisierung bzw. Variation und Verallgemeinerung/Verbreiterung konstruktiver Lösungsansätze.</p>
<p>Beschreibung</p>	<p>Mit konstruktionsmethodischen Vorgehensmodellen wird das Entwickeln und Konstruieren v.a. phasenweise strukturiert. (s. Kap. 2.2.11). Ein fließender Übergang zwischen den Phasen ist in der Praxis zu beobachten, was aus der Unterschiedlichkeit verbreiteter Ansätze hervorgeht (s. Kap. 6.11.1). Je nach Konstruktionsart entfallen ein oder mehrere Phasen. In der Technischen</p>

Produktvielfalt, Variationsgrad
**Tiefen-
dimension**

„spezialisieren-konkretisieren/
variiieren-verallgemeinern“:

Entwicklungs-fortschritt
**Zeitdimension „PEP
fortschreiten“**

¹²⁹ Die dargestellten Wirkungspfeile entsprechen nur dann dem Fortschreiten wenn sie über mehrere Phasen gehen und entlang der Richtungen des Fortschreitens zeigen. Sonst ist deren Wirkung in der Tiefen- bzw. Zeitdimension vorhanden.

Logistik herrscht die Variantenkonstruktion vor (Kap. 2.2.11)

Zweck ist die Differenzierung und Zuordnung der Methoden nach Konstruktionsart und – phase sowie das Aufzeigen möglicher Parallelisierung mit Planungsprozessen (MeK1: simultaneous engineering and frontloading).

Tätigkeiten Phasenweises Fortschreiten im Konstruktionsprozess.

Wirkung (Pfeile) Beschleunigung von Konstruktionstätigkeiten bzw. Phasenverkürzung durch die Methoden.

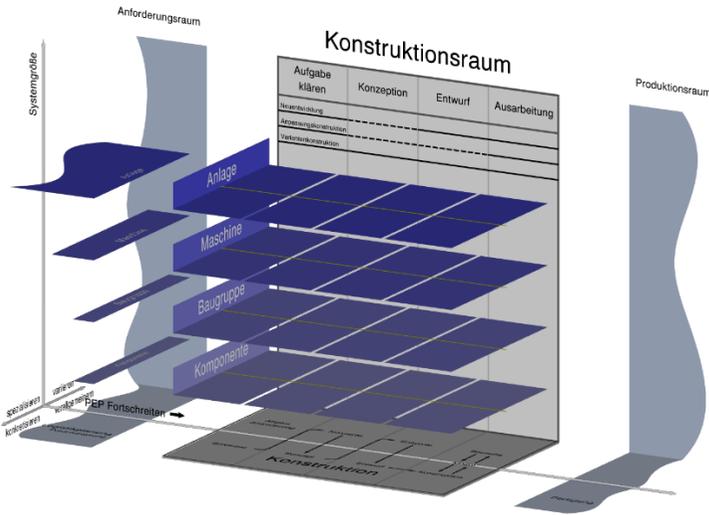


Bild 3.8: Grundaufbau des technisch-logistischen Methodeneinordnungsmodells

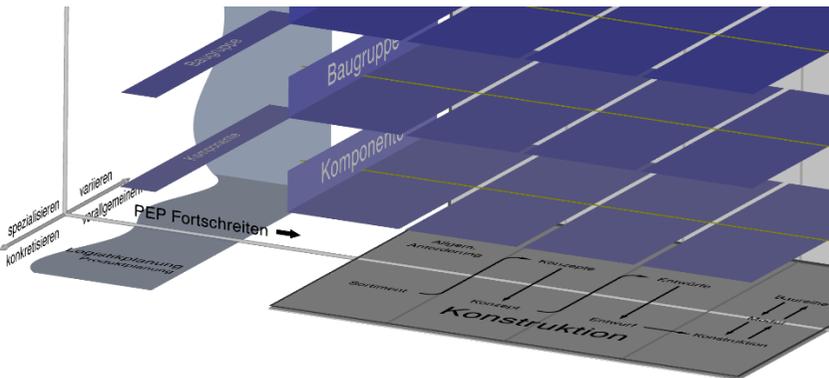


Bild 3.9: Mögliches Fortschreiten im PEP durch das Methodeneinordnungsmodell im Falle einer Neukonstruktion

Die **Umsetzung des Methodeneinordnungsmodells** erfolgt als interaktives 3D-Modell in einer Webbrowser-Lösung, die auf jedem Endgerät zu verwenden ist. Die Orientierungsmöglichkeit im Raum verschafft bessere Ansichten und Einblicke in die Methodenwirkung und durch die Verwendung eigener Filter und Layer je Methode und Dimension können selektiv Methoden kombiniert bzw. gesucht werden. Die Verwendung des Methodeneinordnungsmodells kommt somit, vor allem mit dem Hinzukommen weiterer Methoden, der Vision einer einfachen Konstruktionsunterstützung nahe. Für konstruktive Tätigkeiten an logistischen Objekten können damit in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung geeignete Methoden intuitiv erhoben und beurteilt werden, bzw. werden vom Methodeneinordnungsmodell bereitgestellt. Eine weitere Verknüpfung der im Methodeneinordnungsmodell angegebenen Methoden mit weiterführenden Dokumenten, apps und Daten ist in der Umgebung einfach umsetzbar.

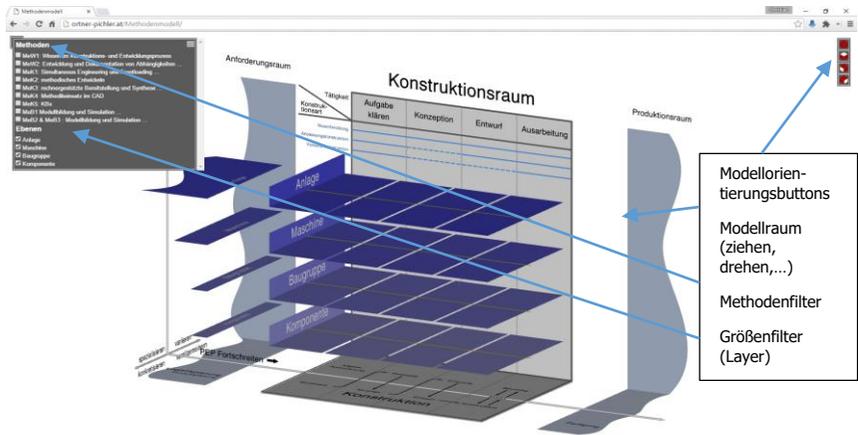


Bild 3.10: Screenshot der webbasierten Visualisierung des technologischen Methodeneinordnungsmodells [MET15]

3.4 Methodiken die die Konstruktion unterstützen

3.4.1 MeK1: simultaneous engineering and frontloading in der Technischen Logistik

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Wenn die Abstimmung zwischen materialflusstechnischer Planung und Gerätekonstruktion (sowohl als Neuentwicklung aber v.a. als Anpassungs-/Varianten-/Wiederholkonstruktion) nicht zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt erfolgt, steht für die Entwicklung und Konstruktion nicht mehr die maximale Zeit zur Verfügung. Da die Konstruktion, wie auch die Planung, iterativen Charakter hat, können die zu konstruierenden Materialflusssysteme die geforderten Leistungen und Funktionen dann optimal erfüllen, wenn die Entwicklungstätigkeiten der Planung und jene der Konstruktion parallelisiert werden. Das führt zu einem domänenübergreifenden simultaneous engineering. Für die Planung bedeutet dies ein frontloading von Konstruktionstätigkeiten in Form der vorgezogenen konstruktiven Anforderungsdefinition.

Eine Abstimmung zwischen Planung und Entwicklung/Konstruktion kann klassischerweise interaktiv zwischen den Beteiligten erfolgen¹³⁰. Dies soll möglichst nicht erst in einer Feinplanung mit Ausschreibung und Definition des Lastenhefts erfolgen. Mit der wissensbasierten KBL-Methode existiert ein planerischer Ansatz, der im Hintergrund der Planung konstruktive Tätigkeiten frühestmöglich mitpflegt.

Die für MeK1 betrachteten Planungssystematiken (s.u.) wählen lediglich bei einer Realplanung Geräte aus und berücksichtigen nicht den ggf. nötigen „Vorlauf“ einer Neuentwicklung oder Anpassungskonstruktion. Dadurch ist maximal Kapazität für die Varianten- und Wiederholkonstruktion vorhanden¹³¹.

Zielsetzung:

- Zeit für die Entwicklung/Konstruktion „gewinnen“ (v.a. bei Neukonstruktion).
- Schlüsselinformationen und Anforderungen der geplanten Anlage frühestmöglich so exakt wie möglich von der Planung an die Entwicklung/Konstruktion weiterleiten.
- Interdisziplinäres Verständnis der Planer für die Produktentwicklung und umgekehrt schaffen.
- Verhindern von easy-buy Herangehensweisen für Materialflusstechnik, insbesondere in den Anforderungsfällen nach Energieeffizienz,

¹³⁰ Im Falle von Generalunternehmern bei großen Anlagen findet Planung und Realisierung nicht in einer Hand statt. Hier ist besonderes Augenmerk auf die möglichen Abstimmungsprobleme zu legen und das simultaneous engineering zu propagieren.

¹³¹ Dies entspricht den beobachteten Szenarien, dass Geräte in Projekten variiert und angepasst werden und nur wenig projektlosgeföste F&E für Geräte existiert. Wenn dann Neuentwicklung in Projekten stattfindet, kann es zu Zeitdruck und Fehlen von Bearbeitungszeiten kommen.

Nachhaltigkeit, Höchstleistung, ... die lange Entwicklungszeiten und oft Neuentwicklungen bedürfen.

- Variantenvielfalt mit automatisierter Konstruktion erhöhen (KBL¹³²).
- Produktentwicklungs- und Planungsmethoden theoretisch zusammenschauen¹³³.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Fokus der Methode MeK1 ist die rechtzeitige Berücksichtigung und geeignete Verknüpfung materialflusstechnischer Planung mit ausschlaggebenden Größen und vor allem Anforderungen der Konstruktion in ihren Ausprägungen als Neu- Anpassungs- und Variantenkonstruktion.

MeK1 ist ein zweifacher Ansatz

- einerseits die frühestmögliche Abstimmung zwischen Planung und Konstruktion,
- andererseits KBL (s. MeK5 „KBx“ in Kap. 3.4.5) als Methoden-Werkzeug, das Planung mit Konstruktion in einer frühen Projektierungsphase zusammenbringen kann¹³⁴.

Es wird die frühestmögliche Integration und Abstimmung der Konstruktion logistischer Werke propagiert, um die o.a. Ziele zu erreichen. Dabei ist v.a. die optimale Erfüllung der logistischen Anforderungen durch die materialflusstechnischen Geräte das oberste Ziel. Deren Entwicklung und Konstruktion muss also ausreichend Zeit eingeräumt werden. Dies kann auf folgende Weise geschehen:

- Zeitlich
 - Frontloading aller technisch nötigen Anforderungen aus der Planung in die Entwicklung/ Konstruktion nach Bild 3.12 (grüne Pfeile ersetzen blaue) für simultaneous engineering.
 - Zusammenschau unterschiedlicher Planungssystematiken mit dem Produktentwicklungs-prozess (differenziert nach Konstruktionsart) und daraus Schaffung von „Freiräumen“ für die Entwicklung/Konstruktion. Dadurch simultaneous engineering zwischen Planung und Konstruktion und Zeitgewinn für Neuentwicklungen oder Verbesserungen an Varianten-

¹³² Für KBL gelten die Definitionen in Kap. 3.4.5.

¹³³ Gerade die Aufbereitung der theoretischen Darstellung dieses Ansatzes ist als Mehrwert zu sehen, da davon ausgegangen wird, dass das simultaneous engineering und frontloading in der Praxis bereits durchaus „intuitiv“ eingesetzt wird.

¹³⁴ Die Planung ist in ihrer frühen Phase noch weitgehend frei von technischen Gestaltungsdetails, um nicht zu sehr in Lösungen zu denken [AF07]. Hier besteht die Gefahr, zu lange zu planen und zu wenig Zeit zum Entwickeln einzuräumen. Dadurch ist ein übergreifendes simultaneous engineering und frontloading, wie in der Entwicklungsarbeit heute eingesetzt, bedingt möglich.

Für Planung und Konstruktion ist sehr differenzierend mit den Begriffen Neu- bzw. Variantenkonstruktion umzugehen. Wenn man die Größendefinition logistischer Objekte betrachtet (Anlagen, Maschinen, Baugruppen, Komponenten - Bild 2.17) gilt für MeK1, abseits von den Definitionen in Kap. 2.2.11.2:

- **Neukonstruktion:** Neues (Logistik)System bzw. Anlage und neue Maschinen/Baugruppen/Komponenten
- **Variantenkonstruktion:** adaptiertes (Logistik)System bzw. Anlage und maximal geometrisch geänderte Maschinen/etc. mit bewährten Wirkprinzipien.

/Wiederholkonstruktionen. Dadurch nutzen der nötigen Prozesszeiten v.a. beim Aufgabenklären der Konstruktion.

- Inhaltlich
 - Spezifikation der Transfergrößen von der Planung zur Entwicklung/Konstruktion (Bild 3.11)
 - Einsatz wissensbasiertes Planungswerkzeug KBL, das 3D-Gerätedaten aus unterschiedlichen Produktportfolios unter spezifizierten planerischen Kriterien in einer frühen Entwicklungsphase generiert und somit Variantenkonstruktionen detailliert.

Folgende entwicklungsintensive Tätigkeiten können durch MeK1 mit mehr Zeit bearbeitet werden:

- Kostenberechnung für das Gesamtsystem aus den Herstellkosten für präzise Angebote
- Dimensionierung kritischer Komponenten wie Antriebe und Steuerungen
- Kreativphase bei Neuentwicklungen (iterativ)
- Produktoptimierungen bei Anpassungs-/Varianten- u. Wiederholkonstruktion
- Beschaffungsvorgänge

Fokus zur Technischen Logistik

MeK1 ist nur für die Technische Logistik und hier vornehmlich die Intralogistik gültig, da nur diese die angegebenen Planungsmethoden verwendet¹³⁵. Die Gültigkeit MeK1 korrespondiert naturgemäß mit jener der Planungssystematiken, die Großteils für die Distributionszentrumsplanung entstanden sind [HNS07], [AF07]¹³⁶.

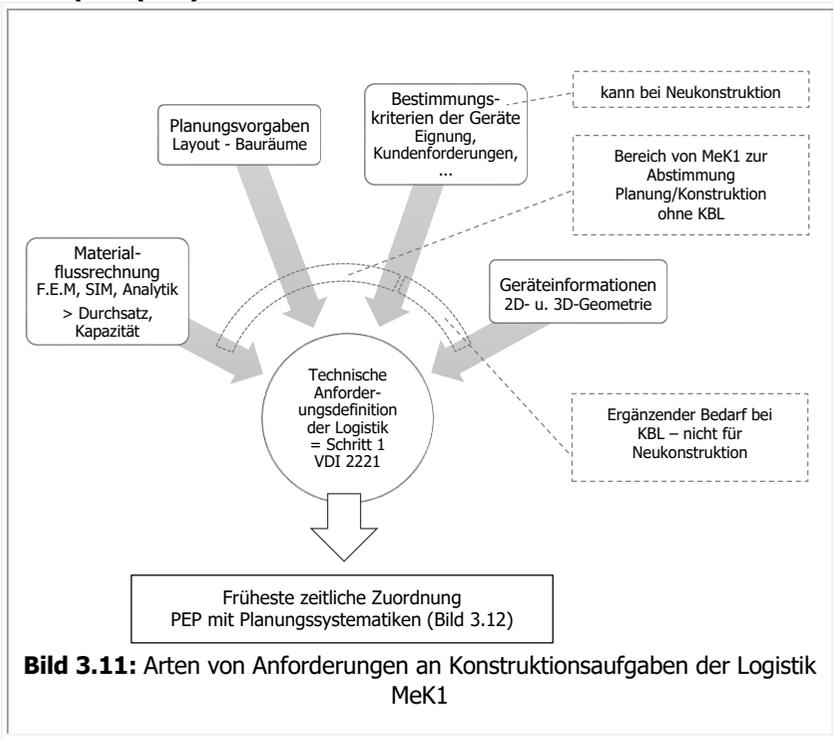
¹³⁵ Ein Überblick über unterschiedliche Planungsmethoden findet sich auch in [WEH14].

¹³⁶ Für die Planung von bspw. Produktionslogistik existieren andere Methoden, hier ist vor allem der Grundgedanke der optimalen Abstimmung Planung und Entwicklung/Konstruktion ausschlaggebend. Beispielsweise ist auch die Planung von Kommissioniersystemen noch kein standardisierter Prozess [EH12], [BHS11]. Agentenbasierten Planungsansätze sind somit v.a aufgrund ihrer Flexibilität nicht mit jenen „statischen“ (Bild 3.12) für ein simultaneous engineering mit der Technikentwicklung zusammenschaubar.

Ein Zusammenwirken der agentenbasierten Planung mit den Ansätzen der wissensbasierten Entwicklung/Konstruktion (MeK5 und MeW2) ist als Forschungsrichtung für die Zukunft begrüßenswert und bietet großes Potenzial!

Durchführung

Ablaufplan (Bild)



Schritte

Bild 3.11 visualisiert die **Arten der Anforderungen** der Planung an die Konstruktion; die Berücksichtigung der unterschiedlichen zeitlichen Prozessphasen der beiden Disziplinen ist Bild 3.12 zu entnehmen.

Materialflussrechnung: Für jede Art von Konstruktion logistischer Gewerke liefert die Materialflussrechnung deren leistungsbestimmende Grunddaten. Durch frühestmöglichsten Transfer auch noch nicht vollends bestimmter Schlüsselgrößen der materialflusstechnischen Analyse in die Konstruktion (Kapazität, Produktspektrum und Durchsatz/Wege ggf. in Form einer Materialflussmatrix) kann für die konstruktive Entwicklungsarbeit Zeit freigeräumt werden; es kommt zum simultaneous engineering nach Bild 3.12. Im Falle von Variantenvielfalt in einem Planungsfrühstadium können wissensbasierte Ansätze (KBL) die Vielfalt der Änderungen effizient abdecken.

Planungsvorgaben: Sie bilden den Übergang von den leistungsbestimmenden Größen der Materialflussrechnung zu den geometrischen Größen der Planung und Konstruktion der Geräte [VDI 2385]. Vor allem werden hier geometrische Randbedingungen gesetzt. Hier sind neue konstruktive Lösungen erst bei Vorliegen aller Planungsinformationen möglich, womit die Planungsvorgaben ebenfalls zum Objekt des simultaneous engineering und KBL werden.

Bestimmungskriterien der Geräte: Unterschiedliche materialflusstechnische Gewerke sind unterschiedlich zur Erfüllung geforderter Aufgaben geeignet. Wesentlich sind immer die materialflusstechnischen Grundgrößen die sich für logistische Gewerke errechnen bzw. ermitteln lassen¹³⁷. Die Art derer Eignung ist bekannt¹³⁸. Die Auswahl der Geräte ist keine Aufgabe von Neukonstruktionen.

Geräteinformationen in 2D- u. 3D-CAD: Wenn das Planen mit der Konstruktion durch wissensbasierte Ansätze wie bspw. KBL (s. KBx mit MeK5 in Kap. 3.4.5) verknüpft werden soll, dann sind Geräteinformationen sowohl aus planerischer Sicht (Eignung) als auch aus konstruktiver Sicht nötig. Die beiden Sichten unterscheiden sich relevant im Detaillierungsgrad der Geometrien sowie im Vorhandensein weiterführender Attribute und Parameter (Material, vereinfachte Realgeometrie, Zukaufteile, Schnittstellen). KBL kann im frühen Stadium der Aufgabenklärung bereits Lösungen aus dem Bereich Varianten- und Wiederholkonstruktion anbieten.

Zeitliche Zuordnung der Planungssystematiken zum Produktentwicklungsprozess –Transfergrößen (Bild 3.12):

Kritisch ist der Zeitpunkt des Vorliegens der Informationen aus Materialflussrechnung, Planungsvorgaben, Gerätebestimmungskriterien und Geräteinformationen (Bild 3.11). Sowohl für die Planung als auch die Entwicklung/Konstruktion existieren standardisierte Prozesse¹³⁹. Entscheidend ist nun, wann in der Planung genügend Informationen vorliegen, um Anforderungen für die Konstruktion (als Neu- und Variantenkonstruktion je unterschiedlich) abzuleiten.

Nach der 7-Stufen-Planungssystematik [HNS07] liegen am Ende von Stufe 3 die Materialflusststrukturen vor, die als input für die Geräteauswahl dienen. Die Quelle sieht hier eine Gefahr in zu frühen Wahl technischer Lösung, wodurch es zur Zementierung der Abläufe und Prozesse kommen kann und Alternativen unberücksichtigt bleiben. Eine qualitative Auswahl von Arbeitsmitteln und Zuordnung zu Materialflussoperationen erfolgt in Schritt 4. Für das simultaneous engineering und frontloading neuer Konstruktionen können schon die in Stufe 2 vorliegenden Planungsdaten erste Konstruktionsanforderungen stellen.

Beim 4-Phasen-Planungsablauf nach [HEI06] werden in der Systemplanung die Mateirafflussmittel gewählt. Für ein simultaneous engineering und frontloading kann schon nach der Planungsdatenanalyse eine Anforderungsdefinition für Neuentwicklungen geschaffen werden.

Bei der 4-Stufen-Planungssystematik [AF07] liegen Materialflusskonzepte (keine Bauweisen und technische Ausführungen im Fördertechnikbereich) schon am Ende von Stufe 1 vor und es kann im Sinne von MeK1 der PEP der Neukonstruktion beginnen. Eigentlich wird erst in Planungsstufe 3 – Realplanung -, nach Kenntnis der Ergebnisse der beiden vorangegangenen Stufen, die beste Grobplanungsvariante weiterbearbeitet und die Fördermittel gewählt. Der Zeitraum für Neuentwicklungen ist danach begrenzt.

Mit der Vorverlagerung (frontloading) des Informationstransfers aller nötigen technischen Anforderungen aus der Planung in die Entwicklung/Konstruktion kann mittels simultaneous engineering Entwicklungszeit gewonnen werden, um diese v.a. für Neukonstruktionen oder die Verbesserung von Varianten-/Wiederholkonstruktionen zu nutzen. KBL ermöglicht zusätzlich ein frontloading bei der Variantenkonstruktion, da es die frühe Variantenvielfalt durch leistungsfähiges automatisches Konstruieren unterstützt.

¹³⁷ Z.B. mit [VDI 3561-2], [VDI 3561-4], [VDI 3978].

¹³⁸ Z.B. Tabellen 4.4 bis 4.8 in [HNS07] oder entsprechend den Erfahrungen des planenden Ingenieurteams.

¹³⁹ Produktentwicklungsprozesse siehe Kap. 2.2.10, methodisches Konstruieren siehe Kap. 2.2.11.

Hilfsmittel (Software)

Für die Planung intralogistischer Anlagen stehen unterschiedliche Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Diese sind entweder intuitiv, diskursiv, Expertensysteme, analytischer Art oder Simulationen [WEH14].

Das KBL mit zugehöriger Software und Hilfsmittel ist in Kap. 3.4.5 beschrieben und stellt ein Hilfsmittel von MeK1 dar. Die Ansätze zur Automatisierung von Planungsaufgaben der Logistik sind nicht Gegenstand des KBL (wie z.B. in [SSS14], [UNI12], [PS08] oder [ZÜL10]).

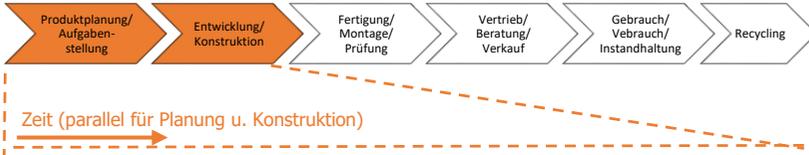
Ein Werkzeug für MeK1 sind die Anforderungslisten als Teil von MeK2, die auch elektronisch erstellbar sind¹⁴⁰.

¹⁴⁰ Der SFB-696 [TUD12] beschäftigt sich im Rahmen der forderungsgerechten Auslegung von intralogistischen Systemen mit einem Modell zur Strukturierung und Clusterung von Anforderungen an logistische Anlagen. Im Rahmen des simultaneous engineering können damit zu einem frühen Zeitpunkt umfassend die für die Entwicklung nötigen Anforderungen erhoben werden.

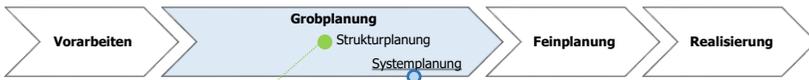
Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Ein Produktlebenszyklus kann nach [EM13] wie unten abgebildet dargestellt werden und liefert den Rahmen für das simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik. Die Phasen der Entwicklung und Konstruktion sind orange dargestellt und jene der Planung in blau.



4-Phasen-Planungsablauf nach [HEI06]:



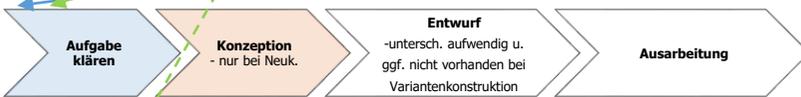
7-Stufen-Planungssystematik [HNS07]:



4-Stufen-Planungssystematik [AF07] und [VDI 2498]:



Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221]:



frühe Variantengenerierung mit KBL
Bereich der Neuentwicklung



Automatisiertes layouts von Anlagen u. Spezifikation mit 3D-Geometriemodulen, wenn KBL nach 4-Stufen-Planungssystematik [AF07] zur Unterstützung der planerischen Aufgaben der Logistikplanung eingesetzt wird – Realplanung (Geräte).
Nur Variantenkonstruktion.

Rein konstruktiver Fokus mit: Konfektionieren von Anlagen nach MeK5!

— simultaneous engineering für v.a. Neuentwicklung
 --- strichliert: Möglichkeiten mit KBL

Bild 3.12: Abstimmungszeitpunkte zwischen Planungs- und Konstruktions/Entwicklungsprozess

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeK1 ist das frontloading von Planungsdaten in die konstruktive Anforderungsdefinition für ein möglichst effizientes simultaneous engineering in der Logistik und somit mit MeK2 verbunden. Das KBL als unterstützende Maßnahme früher technischer Spezifikation aus Planungsdaten ist durch MeK5 mit MeK1 verbunden. Mit MeW1 und MeW2 kann Wissen der planerischen Dimension formalisiert werden.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Zusammenschau Planung und PEP: bei konsequentem Einsatz können die Anforderungen aus den Projektgeschäften in technischen Anforderungslisten gesammelt werden und stellen so nach und nach das Leistungsspektrum des aktuellen Bedarfs am gesamten Materialflussssektor dar! Weiters kann bei performance-kritischen Anlagen durch den rechtzeitigen Konstruktionsstart eine ggf. leistungsmäßig ungenügende Variantenkonstruktion vorteilhaft zugunsten einer Neu- oder Anpassungskonstruktion vorgelagert werden.

KBL: ist als frontloading einer Variantenkonstruktion ein simultaneous engineering mit der Planung zugunsten frühestmöglicher technischer Informationen (Kostenfestlegung) und all seinen Vorteilen! Daraus sind exaktere Preise kalkulierbar und die Produktion rechtzeitig planbar.

Der Aufwand zum frontloading und simultaneous engineering ist überschaubar und es ist anzunehmen, dass viele Projekte bereits so gehandhabt werden. Vielmehr bedarf es hier einer Bewusstseinsbildung und einer Loslösung vom Abteilungsdenken, was großen Nutzen hervorbringen kann (bewiesen im allg. Maschinenbau [EM13]) und eine Aufgabe des Managements darstellt.

Neuheitsgrad

Wie oben erwähnt ist anzunehmen, dass die Unternehmenspraxis bereits ähnlich geartete Ansätze verfolgt. Die Publikation dieser stellt für die Technische Logistik allerdings eine Neuerung dar. Die Einbeziehung von KBL ist bisher nicht domänenübergreifend (Planung – Entwicklung/Konstruktion) vollzogen und fokussiert zur Zeit auf die wissensgestützte Planung ohne Details des Konstruierens.

Beispiele

Wie oben erwähnt, werden Anlagen in der Praxis ggf. schon nach MeK1 geplant – Publikationen dazu existieren nicht. Das Tool DC-Design-Suite von fortna [FOR14] ist eine volle KBL Lösung, die die wissensgestützten Planungsansätze mit der Konstruktion/Entwicklung vereint. Dies geschieht im Bereich Automatisiertes Layouten und Spezifikation von Anlagen mit 3D-Geometriemodulen. Das HRL-Tool ist eine KBL-Lösung im Bereich Konfektionieren von Anlagen zum Gestalten von Hochregallagersystemen mit Regalbediengeräten [P4], [PIC12], s. Bild 3.25.

Quellen

Die Fachliteratur der Materialflusstechnik- und –planung liefert die Grundlagen der Planungssystematiken [HNS07], [AF07], [VDI 2385], [VDI 2498], [VDI 3561-2], [VDI 3561-4], [VDI 3978] und [HEI06].

Die Produktentwicklungsprozesse sind aus der VDI 2221 [VDI 2221] und weiterführend [EM13] entnommen.

3.4.2 MeK2: methodisches Entwickeln

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Wenn man nach Methoden für das Entwickeln und Konstruieren sucht stößt man auf eine große Anzahl unterschiedlicher Ansätze. Diese können nach [VDI 2221] (ausführlicher in [LIN05]) gegliedert werden¹⁴¹ in:

- Analyse- und Zielvorgabemethoden
- Methoden zum Generieren von Lösungsideen
- Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung
- Entwicklungsunterstützende Methoden

Ein Problem liegt nach [VDI 2221] weniger in der Anzahl der Methodiken und Methoden, als in der Unsicherheit ihrer Anwendung, welche auf die mangelnde Erfahrung der Anwender zurückgeführt werden kann. Des Weiteren ist eine Angrenzung des Methodeneinsatzes bezüglich der unterschiedlichen Konstruktionsarten nur wenig verbreitet und die meisten Entwicklungsmethodiken (wie bspw. die Methodensammlung [VDI 2221]) beziehen sich auf die Neukonstruktion. Diese ist im Maschinenbau und der Technischen Logistik allerdings nicht die häufigste (s. Kap. 2.2.11.2).

Der Einsatz von Entwicklungsmethodik ist zufolge Praxiserfahrungen [EM13] nicht durchgängig akzeptiert und auch nicht immer sinnvoll. Er kann zu einem Zwang zur Abstraktion, Einschränkung der Kreativität und zu mangelnder Flexibilität führen. Das Vorgehen ist dann zu linear und zu wenig iterativ. Oft ist dabei die Aufgabe, wie gefordert, nicht in Teilaufgaben zerlegbar, da Probleme erst am Gesamtsystem sichtbar werden.

Konstrukteure gehen meist pragmatisch vor [BEN04] weil größtenteils Routinetätigkeit vorherrscht. Denkökonomie schaltet zwischen gelegenheitsbetontem und systematischen Vorgehen hin und her und versucht mit nicht zu hohem Denkaufwand brauchbare Lösungen zu erzeugen die verbessert werden können [EM13]. Die meisten Entwicklungsmethodiken berücksichtigen kaum den heute üblichen Rechnereinsatz¹⁴².

Im Idealfall jedoch erreicht methodisches Entwickeln eine Reihe von Zielen, die technischer, organisatorischer, persönlicher und didaktischer Art sein können [EM13]. Hervorzuheben ist die Hilfestellung bei der Entwicklung neuartiger oder besserer Produkte mit optimalem Kundennutzen [EM13].

Die Vorgestellte Methode MeK2 „methodisches Entwickeln“ soll einen Beitrag zur akzeptierteren Verwendung verfügbarer Entwicklungsmethoden und –methodiken liefern.

Zielsetzung:

- Anforderungen klar definieren (gemeinsam mit MeK1)
- Lösungsvielfalt erzeugen (gemeinsam mit MeK3)

¹⁴¹ Einen Überblick über die Abläufe und den Einsatz verschiedenster Entwicklungsmethodiken gibt Kap. 6.11.1.

¹⁴² Inhalte verschiedener Vorgehensmodelle s. Kap. 6, Tabelle 29.

- Fundierte, nachvollziehbare Entscheidungen erhalten
- Folgen abschätzbar machen
- Entwicklungszeit verkürzen
- Konstruktionswissen zu speichern.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

„Ein einziges ideales Vorgehen, eine „kanonisierbare Optimalform“ für alle möglichen sich darstellenden Entwicklungsprozesse, kann es aufgrund der Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Einflussfaktoren nicht geben“ [LIN05]. [EM13] empfiehlt eine zweistufige Herangehensweise für methodisches Entwickeln, die dem menschlichen Denken angepasst erscheint und die hier ebenso empfohlen wird¹⁴³.

1. Aus Erfahrungen heraus werden in einem „Normalbetrieb“ Lösungen erzeugt und ausgewählt.
2. In einem „Rationalbetrieb“ ist sorgfältig methodisch vorzugehen, wenn man nicht weiterkommt.

Für das methodische Vorgehen stellt MeK2 aus Einsatzerfahrungen heraus ausgewählte Methoden aus dem Portfolio [VDI 2221] und darüberhinaus situationsgerecht bereit¹⁴⁴. MeK2 stellt dazu (auch mit einem Software-Hilfsmittel) für die Technische Logistik folgende taugliche Methoden aus jeweiligen Kategorien vor:

- Analyse- und Zielvorgabemethoden: Anforderungsliste, Online-Surveys, MeK1, Reverse Engineering.
- Methoden zum Generieren von Lösungsideen: morphologischer Kasten, MeK3 (Konstruktionskatalog).
- Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung: FMEA, Nutzwertanalyse, paarweiser Vergleich, Variantenanalyse-app, technisch-wirtschaftliche Bewertung.
- Entwicklungsunterstützende Methoden: CAD, numerische Simulation (entspricht hier MeB1), Versuch.

Fokus zur Technischen Logistik

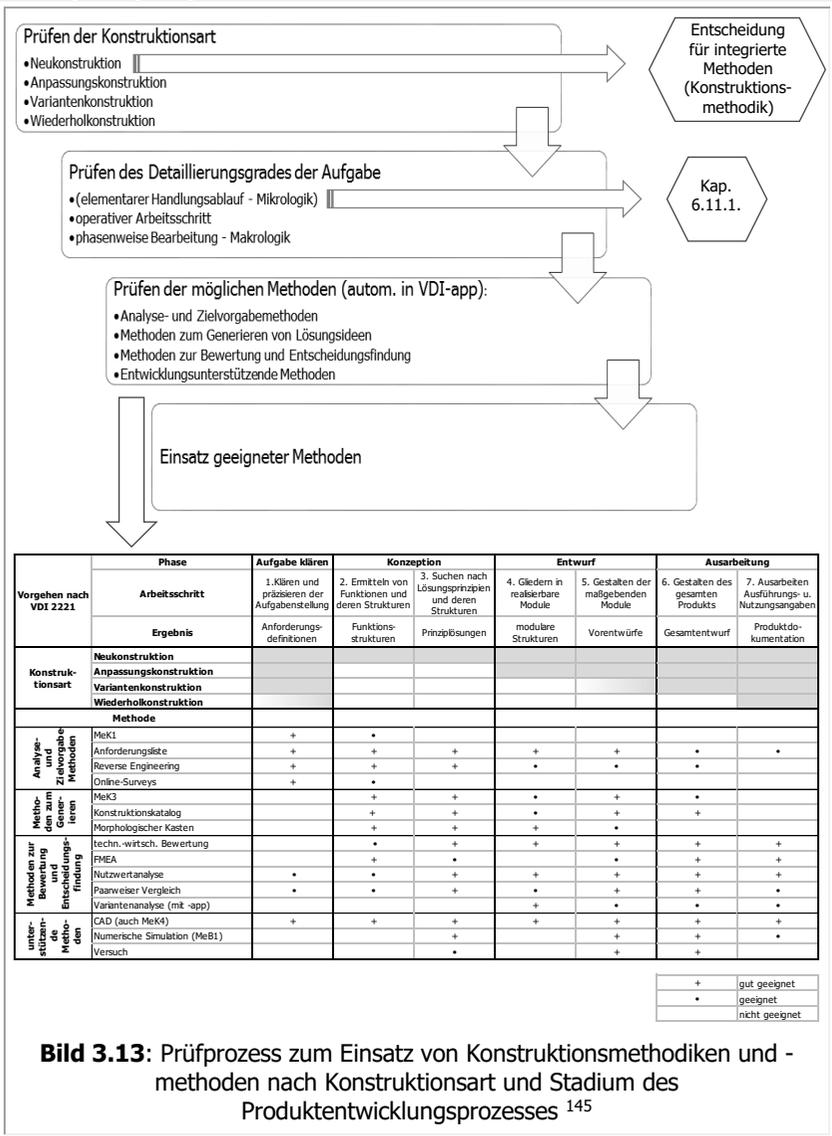
Da Neukonstruktionen im Allgemeinen und in der Technischen Logistik im Speziellen nicht den Hauptentwicklungsfall darstellen sind die klassischen Entwicklungsmethodiken als Ganzes hier selten sinnvoll einsetzbar. Für Teilschritte der Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion kann durch den Einsatz der einzelnen Methoden von MeK2 eine Fülle von Nutzen erreicht werden (s.u.).

¹⁴³ In jeder Phase der Entwicklung sind Entscheidungen nach elementaren Handlungsabläufen zu treffen. Hier kann beispielsweise mit einer Mikro-Logik vorgegangen werden und ein Problemlösungszyklus durchlaufen werden (z.B. nach [HWF+12], oder das TOTE-Modell [FEL13a] eingesetzt werden). Mit sinkendem Detaillierungs-/Auflösungsgrad der Aufgabe kommen operative Arbeitsschrittmodelle zum Einsatz. Erst mit noch geringerem Detaillierungsgrad spricht man von den Phasen- und Arbeitsschrittmodellen, denen die bekannten Entwicklungsmethodiken zuzurechnen sind (s. Bild 6.89) [LIN09]. Diese greifen dann wieder auf die operativen Arbeitsschrittmodelle und elementaren Handlungsabläufe zurück.

¹⁴⁴ Speziell für das methodischen Neuentwickeln existieren noch alternative Vorgehensweisen zu [VDI 2221]. In Kap. 6.11.1 sind die Vorteile, Unterschiede und Einsatzszenarien dieser Methoden mit einer zusammenschauenden Bewertung angegeben.

Durchführung

Ablaufplan (Bild)



Vorgehen nach VDI 2221	Phase	Aufgabe klären		Konzeption		Entwurf		Ausarbeitung	
	Arbeitsschritt	1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten Ausführungs- u. Nutzungsangaben	
	Ergebnis	Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktdokumentation	
Konstruktionsart	Neukonstruktion								
	Anpassungskonstruktion								
	Variantenkonstruktion								
	Wiederholkonstruktion								
Methode									
Analyse- und Zielvorgabemethoden	MeK1	+	•						
	Anforderungsliste		+	+	+	+	•	•	
	Reverse Engineering	+	+	+	•	•	•		
	Online-Surveys	+	•						
Methoden zum Generieren von Lösungsideen	MeK3		+	+	•	+	•		
	Konstruktionskatalog		+	+	•	+	+		
	Morphologischer Kasten		+	+	•	•			
Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung	techn.-wirtsch. Bewertung		•	+	+	+	+	+	+
	FMEA		+	•		•	+	+	+
	Nutzwertanalyse	•	+	+	+	+	+	+	+
	Paarweiser Vergleich	•	•	+		•	•	•	•
Unterstützende Methoden	Variantenanalyse (mit -app)				+	•	•	•	•
	CAD (auch MeK4)	+	+	+	+	+	+	+	+
	Numerische Simulation (MeB1)			+		+	+	+	•
	Versuch			•		+	+	+	

+	gut geeignet
•	geeignet
	nicht geeignet

Bild 3.13: Prüfprozess zum Einsatz von Konstruktionsmethodiken und -methoden nach Konstruktionsart und Stadium des Produktentwicklungsprozesses ¹⁴⁵

¹⁴⁵ Definition Konstruktionsart im Detail in Kap. 2.2.11.2. Begriffe und Definitionen der Methoden, wenn nicht anders angegeben oder die eigenen Methoden „Me...“, nach [VDI 2221], Details dazu siehe Kap. 2.2.11.1 – Tabelle 2 und Anhang A.1 in [GAR14].

Schritte

Prüfen der Konstruktionsart: Mit den Ausführungen in Kap. 2.2.11.2 lässt sich für jede konstruktive Aufgabe bestimmen, ob es sich um eine Neu- Anpassungs- Varianten- oder Wiederholkonstruktion handelt^{146,147}. Es folgt:

Prüfen des Detaillierungsgrades der Aufgabe: Je nach Komplexität und Detailtiefe der geforderten Konstruktionsaufgabe kann diese mit elementaren Handlungsabläufen und operativen Arbeitsschritten bzw. phasenweiser Bearbeitung behandelt werden. Bei wenig komplexen aber sehr detaillierten Aufgaben wird man mit den elementaren Handlungsabläufen oder operativen Arbeitsschritten fortfahren¹⁴⁸. Andernfalls sind Methoden der Entwicklungsmethodik (methodisches Entwickeln) einzusetzen.

Prüfen der möglichen Methoden (automatisiert in VDI-app): Die einzelnen Methoden der methodischen Produktentwicklung sind in die angegebenen vier Gruppen gliederbar [VDI 2221]. Diese sind je nach Aufgabe im Produktentwicklungsprozess und Konstruktionsart auszuwählen. Es wird unterschieden zwischen Analyse- und Zielvorgabemethoden, Methoden zum Generieren von Lösungsideen, Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung und Entwicklungsunterstützende Methoden. Mit der Tabelle in Bild 3.13 kann geprüft werden, welche von den hier speziell ausgewählten Methoden zu welchem Entwicklungszeitpunkt (und daher Konstruktionsart) gut geeignet, geeignet oder nicht empfehlenswert ist.

Einsatz geeigneter Methoden: Auswahl geeigneter Methoden nach Matrix. Mit Hilfe der unter „Hilfsmittel“ beschriebenen Quellen und Software-Produkte können die ausgewählten Methoden erarbeitet und eingesetzt werden. Einzelne Software-Werkzeuge stellen dafür Vorlagen zur Verfügung, die einen schnellen Einstieg ermöglichen.

Hilfsmittel (Software)

Das Portal MEPORT.net [MEP14a] bietet mit der entsprechenden Unterstruktur der Seite zu den folgenden Methoden ausführliche Beschreibung sowie Vorlagen an: Morphologischer Kasten, FMEA, paarweiser Vergleich und Nutzwertanalyse.

Die entwickelte VDI 2221-app¹⁴⁹ [GAR14] (Bild 3.14) leitet durch den methodischen Entwicklungsprozess und differenziert nach Konstruktionsart. Sie stellt Methoden und vorgefertigte digitale Unterlagen bereit und soll als „dritter Bildschirm“ den Konstrukteur intuitiv und interaktiv durch die methodische Entwicklung leiten und so die Hemmschwelle des Einsatzes von Methodik verringern!

Die entwickelte Variantenanalyse-app¹⁵⁰ ist für die Anpassungskonstruktion geeignet und vereint die Analyse und Bewertung (Nutzwertanalyse) von vorhandenen Teilen und Baugruppen hinsichtlich beliebiger geometrischer und allgemeiner Merkmale. Damit kann dem Phänomen Gleichteile begegnet und Produkte neu strukturiert werden.

¹⁴⁶ Für MeK2 gemeinsam mit MeK1 siehe auch Fußnote 134.

¹⁴⁷ Für die Neukonstruktion werden Literatur-Methoden in Kap. 2.2.11.1f. (und 6.11.1f.) vorgestellt (Bild 6.104)

¹⁴⁸ Kap. 6.11.1.3f.

¹⁴⁹ Details s. Kap. 6.11.1.9.

¹⁵⁰ S. Kap. 6.13.1, Bild 6.153.

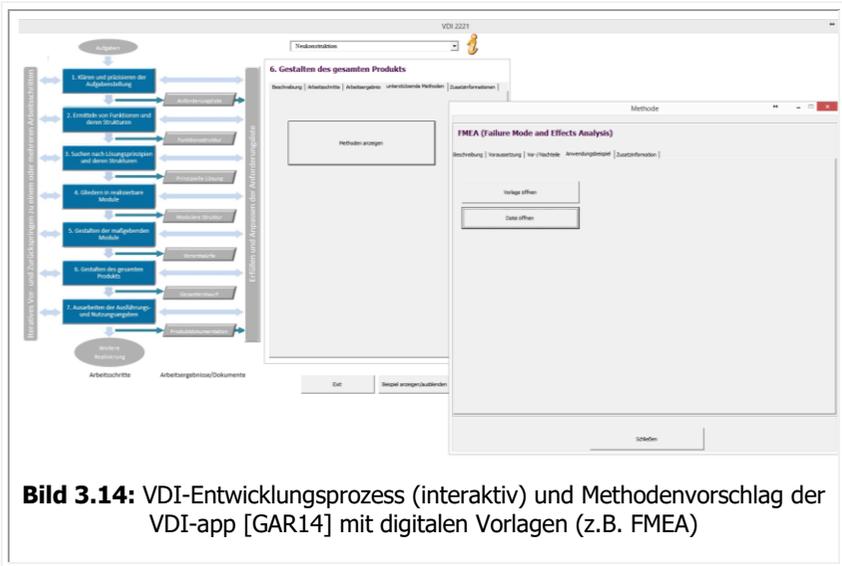


Bild 3.14: VDI-Entwicklungsprozess (interaktiv) und Methodenvorschlag der VDI-app [GAR14] mit digitalen Vorlagen (z.B. FMEA)

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Methodisches Entwickeln ist dem ganzen Konstruktionsprozess zugehörig und steht im Produktlebenszyklus überlappend mit der Produktplanung und Aufgabenstellung vor der Produktion mit Fertigung/Montage/Prüfung (s. Bild 2.28). Die meisten Phasen- und Arbeitsschrittmodelle können mit einem vierstufigen Ansatz zusammenschaut werden. Nach VDI 2221 [VDI 2221] und 2222 [VDI 2222] sind diese Phasen: Aufgabe klären, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung (Bild 3.15).

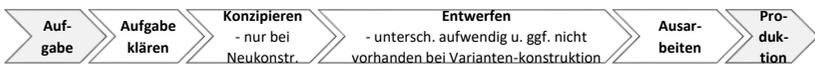


Bild 3.15: VDI-Konstruktionsphasen für MeK2

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeK2 ist die Auswahl- und Entscheidungsmethode zum Einsatz von Entwicklungsmethodik oder derer Methoden und ist somit eine Methodik und Methode zugleich. Bezug besteht zu

- MeK1 als Vorgängerin von MeK2, da MeK1 Anforderungen erhebt, die für das methodische Entwickeln nötig sind. Im Sinne des dort propagierten simultaneous engineering ist MeK1 aber eigenständig.
- MeK3, da diese nicht nur Methoden zum Generieren von Lösungsprinzipien (aus der Entwicklungsmethodik) sondern auch Methoden zum Wissensspeichern benutzt.

- MeK4, da diese (CAD im Allgemeinen) ebenfalls eine Methode der Entwicklungsmethodik ist. Weiters dadurch, dass CAD eine geordnete Produktstruktur benötigt, die durch methodisches Entwickeln erreicht wird.
- MeW2, da die elektronische Wissensaufbereitung der Beziehungen in Konstruktionen ebenso eine geordnete Struktur benötigt, die durch methodisches Entwickeln erreicht wird.
- MeW1 überschneidet sich insofern mit MeK2, als man beim Entwickeln und Konstruieren mit MeK2 auch von der Anwendung von Wissen sprechen kann.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Einsatz von Methodik beim Entwickeln bedarf subjektiv eines Mehraufwandes im Gegensatz zum Generieren der pragmatischsten Lösung. Durch methodisches Konstruieren wird erst eine „wirksame Rationalisierung des Konstruktions- und Fertigungsprozesses möglich.“ [RS12] Die Herausforderung der Wissenswiederverwendung in interdisziplinären und fluktuierenden Teamkonstellationen rechtfertigt neben den Vorteilen unten ebenso den Entwicklungsmethodik-Einsatz.

Für Neukonstruktionen Einsatz absolut **sinnvoll**.

Für Anpassungs- Varianten- und Wiederholkonstruktionen **Teileinsatz sinnvoll**.

Mit dem dargelegten teilweisen Einsatz einzelner Methoden wird versucht, der oben angesprochenen Hürde im Entwicklungsmethodikeinsatz beizukommen. Die Beschränkung auf einige, wenige und gut verbreitete Methoden der verschiedenen Abschnitte ermöglicht einen ersten Einstieg in die Thematik methodischen Entwickelns und führt damit schrittweise zu den genannten Vorteilen. Das entwickelte Tool VDI-app hilft dem IT-vertrauten Ingenieur Hilfestellung beim schnellen Erfassen der Vorgehensweise nach VDI^{151,152}.

Vorteile Entwicklungsmethodik:

- Erfindungs- und erkenntnisfördernd
- Macht problemorientiertes Vorgehen möglich
- Leistungsfähigkeit und Erfindungsfähigkeit kann gesteigert werden
- Ideale Lösungen systematisch findbar, Lösungen werden nicht nur zufällig erzeugt
- Kreativität wird nur sofern eingeschränkt, dass ideale Lösung möglichst effektiv gefunden wird. – lenkt den Konstrukteur
- Macht Entwicklung und Konstruktion planbar. Planung und Steuerung von Teams in einem integrierten Produktentstehungsprozess wird erleichtert
- Eignung für den Rechnereinsatz
- Wiederverwendbare und übertragbare Lösungen und Lösungsdokumente
- Steigerung der Leistungs- und Erfindungsfähigkeit [RS12]

¹⁵¹ Kap. 6.10.2.2 listet weitere Argumente.

¹⁵² Die Ausführungen beziehen sich auf die Wirkung der von MeK2 empfohlenen Methoden. MeK2 an sich bietet den Vorteil, für die Technische Logistik geeignete Entwicklungsmethoden schnell aufzufinden und einfach einzusetzen.

- Einsicht in das Konstruieren erlangen [RS12]
- Schrittweises Finden von Lösungsprinzipien ermöglicht frühzeitige Auswahl und Optimierung mit geringem Aufwand [RS12]

Nachteile

- Einarbeiten in Methodiken ist zeitaufwendig
- Geringe Akzeptanz [EM13]
- Nötige Abstraktion oft schwierig
- Nutzen nicht vordergründig erkennbar – bedingt wie der Einsatz von Wissensmanagement vom Management nach unten durchgängig getragene Akzeptanz (vgl. [VDI 5610-1])

Neuheitsgrad

Die Neuheit des Einsatzes von MeK2 besteht in¹⁵³:

- Gezielte Auswahl einzelner Methoden und Adaptierung für die Technische Logistik.
- Erstellung der VDI-app.
- Erstellung der Variantenanalyse-app.
- Die Zusammenschau der zugehörigen Methoden MeK3, MeK4 und MeK1 mit MeK2.

Beispiele

Methodisches Entwickeln ist anhand einiger Vorhaben bzw. Projekte in der Technischen Logistik teilweise und größtenteils nicht durchgängig umgesetzt (z.B. komplette Neuentwicklung). Innovative Entwicklungen, die durch den teilweisen Einsatz methodischer Entwicklung (wie MeK2) umgesetzt wurden, können jedoch angegeben werden:

- [HOM14]: Beschreibt den Einsatz und Teile der Entwicklung des „RackRacer“ mit methodisch-diskursiver Lösungssuche.
- [OVF+10]: Beschreibt die Entwicklung kleinskaliger, multidirektionaler Transportmodule in der Intralogistik mit systematischer Anforderungsdefinition, Gliedern in Module, Aufbereitung existierender Lösungsansätze in einem „Lösungskatalog“, Entwicklung neuer Lösungsansätze.
- [WIE11]: Entwickelt und beschreibt ein Auslegungstool für Rollenförderermodule mit mathematischen Modellen die das Systemverhalten des Förderprozesses und die Belastung des Fördermoduls quantitativ beschreiben (Stadium Prinziplösungen).
- [P10] und Kap. 4.1 beschreibt die Entwicklung eines modularen Ladehilfsmittels mit methodischer Suche nach prinzipiellen Lösungen.

¹⁵³ MeK2 ist noch keine integrierte Produktentwicklung (IPE, s. Kap. 6.10.3).

Quellen

Das Spektrum entwicklungsmethodischer Literatur ist weit. Hier werden deshalb nicht Einzelarbeiten sondern Lehrwerke und summarische Arbeiten mit Praxisbezug angegeben. Dazu gehören [VDI 2221], [VDI 2222], [VDI 2223] als die normativen Standards. [FEL13a] ist das verbreitete konstruktionsmethodische Lehrwerk und [EM13] jenes am Segment der Produktentwicklung. [RS12] erweitert auf neuartige Verfahren über die Entwicklungsmethodik hinaus hin zur Produktstrukturierung.

3.4.3 MeK3: rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

In Entwicklungsabteilungen kann aufgrund von internen Karrieremodellen aber auch aufgrund von äußeren Rahmenbedingungen eine starke Fluktuation der Entwicklungsteams herrschen. Dann ist der Erhalt von Konstruktionswissen eine Herausforderung. Da Neuentwicklungen nicht die Hauptkonstruktionsart darstellen¹⁵⁴ kann dafür erarbeitetes Wissen, da personengebunden, rasch nicht mehr greifbar sein.

„Bei Neuentwicklungen entstehen durch geordnetes und schrittweises Vorgehen, auch auf teilweise abstrakter Ebene, wiederverwendbare Lösungsdokumente.“ [FEL13a] In der Konzeptionsphase werden diese beispielsweise als morphologischer Kasten oder Konstruktionskatalog für prinzipielle Lösungen gegebener funktionaler Strukturen erstellt und sind damit papiergebunden. Dadurch ist ihre Abfragemöglichkeit eindimensional bzw. beschränkt. Mögliche widersprüchliche Lösungskombinationen müssen stets neu beurteilt werden; diese wiederholend auszuführenden Tätigkeiten sind aufwändig aber automatisierbar. Wenn die Abhängigkeiten in den Prinziplösungen mehrdimensional sind, genügt das klassische Prinzip der papiergebundenen Lösungskataloge nicht mehr. Weiters mag die Attraktivität und der Wiederverwendungswert dieser papiergebundenen sog. „Lösungskataloge“¹⁵⁵ im IT-unterstützten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nicht mehr attraktiv anmuten und die Verwendbarkeit daher einschränken. Nach [KR09] kommt dem Erkennen und Verstehen von Abhängigkeiten in einer frühen Konstruktionsphase aber zentrale Bedeutung zu. Ingenieurgerechte und unterstützende Lösungen sind dazu aber nicht vorhanden.

Automatisierungsschritte in der Prinziplösungserstellung stellen die Methode MeK3 „rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen“ dar. Hierbei wird die bekannte Methode morphologischer Kasten durch zusätzlichen Wissensinsatz automatisiert. Erreicht werden soll eine größtmögliche (sinnvolle) Lösungsvielfalt die wiederholt mit unterschiedlichen Anforderungen erzeugbar sein soll¹⁵⁶.

Zielsetzung:

Ziel der rechnergestützten Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien ist die anforderungsspezifische, automatisierte Bereitstellung von Lösungsprinzipien und Teillösungen geforderter Funktionen und derer Strukturen¹⁵⁷.

¹⁵⁴ s. Kap. 2.2.11.2

¹⁵⁵ Auch als morphologischer Kasten oder Konstruktionskatalog begrifflich verbreitet.

¹⁵⁶ Dabei handelt es sich nicht um Ansätze vollautomatisierter Konstruktionssysteme, wie beispielsweise den Designcompiler 43 [IIL14] oder wissenschaftliche Hintergründe der Konstruktion [LOS06]. Vielmehr soll ein einfaches Software-Tool die Konzeptphase unterstützen und den o.a. Herausforderungen begegnen.

¹⁵⁷ Es handelt sich dabei um eine strukturierte, systematisch-analytische und wissensunterstützte Lösungsauswahl. Die Objekte der MeK3 sind im Erstausbau:

- Baugruppen: Antriebslösungen, Fahrwerkskonzepte

Mit einfachen softwaretechnischen Hilfsmitteln, erstellbar durch MeK3, sollen folgende Ziele erreicht werden:

- systematisierte und teilautomatisierte Lösungsgenerierung und dadurch Strukturierung konstruktiver Arbeiten
- Wissensspeicherung
- Unterstützung von KBE und KBSD
- Unterstützung methodisches Entwickeln durch Bereitstellung von Information und Wissen
- Lösungsvielfalt verbreitern und Überblick über Varianten für nachfolgende Bewertung erhalten.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Methodisch baut die (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien auf dem methodischen Entwickeln und der Verwendung von Wissensspeichern auf. Dabei wird dem Schritt 3 „Lösungsprinzipien der Funktionen“ ([VDI 2221]) Information und Wissen anforderungsspezifisch und widerspruchsfrei bereitgestellt¹⁵⁸. Durch Zugriffsmerkmale, systematische Gliederung und Aufbereitung in Datenbankstrukturen wird das Wissensspeicherprinzip „Konstruktionskatalog“ und „morphologischer Kasten“ zusammengefasst. Mit multikriteriellen Analysemöglichkeiten umfassend erweitert, ist das Prinzip dann elektronisch verarbeitbar.

Ergebnis davon ist eine automatisiert bereitgestellte prinzipielle Gesamtlösung als Kombination von Teillösungen (Einzellösungen) für eine gegebene Funktionsstruktur – entsprechend den Ergebnissen eines morphologischen Kastens.

Fokus zur Technischen Logistik

Aufgrund langer Produktlebensdauern von Gewerken der Intralogistik ist die Neukonstruktion hier selten. Erarbeitetes Wissen dafür ist, wenn nicht in einem Wissensmanagement-Ansatz aufbereitet, größtenteils personen- und projektgebunden und aufgrund der langer Produktlebensdauern oft nicht mehr greifbar. Hier setzt MeK3 an, um die prinzipiellen Lösungen für geforderte funktionale Strukturen nachhaltig verwendbar zu halten und um eine Lösungsvielfalt zu erzeugen. Beispielsweise sind im Bereich der Stetigfördertechnik oft idente funktionale Forderungen (transportieren) für unterschiedlichste Anforderungen (Güter, Geometrie, Umweltbedingungen) zu erfüllen. Mit einem nach MeK3 entwickelten Vorgehen können dafür einzelne Lösungen anforderungsgerecht generiert und mit weiteren Varianten verbunden (synthetisiert) bzw. verglichen und bewertet werden. Mit der Methode können objektiv Lösungen aus

-
- Maschinen:
 - Mechanische Förderer (mit umlaufenden Zugmittel) nach [VDI 4440-1] – [VDI 4440-6]: Gurtförderer, Rollenbahn angetrieben (Rollenförderer), Tragkettenförderer, Kreisförderer (Hängeförderer)
 - Verkettung einzelner Förderer zu Förderstrecken, wenn unterschiedliche Förderprinzipien bzw. -typen zu kombinieren sind.

¹⁵⁸ Schritt 4 der VDI 2221 (Gliedern in Module) wird hierbei nicht mehr betrachtet. Das Software-System der Realisierung kann vom Tabellenkalkulationsblatt für morphologische Kästen und wenig hinterlegter Logik bis hin zum GUI-gesteuerten Programm reichen und ist der Verwendungshäufigkeit anzupassen.

Teillösungen generiert werden¹⁵⁹. Die einzelnen (Teil)lösungen können dann merkmalsbasiert miteinander verbunden werden.

Durchführung

Schritte zur Erstellung eines Software-Systems zur rechnergestützten Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien

Folgende Teilaufgaben sind zur Erstellung eines Systems der automatisierten Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien erforderlich¹⁶⁰. Dies hat für jede Funktionsstruktur je neu zu erfolgen:

- Prüfen der Rahmenbedingungen:
 - Entschluss zum methodischen Entwickeln ist vorhanden und Neukonstruktion liegt vor
 - Wissen im Lösungsentwurf soll für weitere Entwicklungen zur Verfügung stehen
 - Lösungsvielfalt soll wiederholt erzeugt werden
 - Wissen ist in einem fluktuierenden Team weiterzugeben bzw. zu bewahren (Entschluss zum abschnittswisen methodischen Entwickeln: MeK2)
- Abstraktion der Funktionen der Aufgabenstellung nach [VDI 2222]. Erstellung der Funktionsstruktur¹⁶¹
- Quantitative Spezifikation der Anforderungen (Parameter). Daraus Berechnung mechanischer Grunddimensionen zur Weitergabe an die prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten¹⁶²
- Erarbeitung aller prinzipiell geeigneten Lösungsmöglichkeiten für die Funktionsstruktur mit intuitiven, konventionellen oder systematisch-analytischen Methoden¹⁶³
- **Entscheid über die elektronische Realisierung, sonst Erstellung eines papiergebundenen morphologischen Kastens oder eines Konstruktionskataloges**
- Bestimmung von relevanten Merkmalen der Lösungsmöglichkeiten, die elektronisch erfassbar sind - gegliedert in Gliederungs- Haupt- und Zugriffsteil¹⁶⁴
- Weitere Differenzierung der Merkmale im Zugriffsteil in:
 - Anforderungsgesteuerte Merkmale¹⁶⁵

¹⁵⁹ Im Falle des „Vereinzelns - Abfordern“ dargelegt unten bei Hilfsmittel und Bild 6.111.

¹⁶⁰ Details zur Umsetzung der Vorgehensweise in Kap. 6.11.3 und [PER14].

¹⁶¹ Bspw. Bild 6.106, Bild 6.107.

¹⁶² Beispielsweise Energiedichte eines Antriebes zur Auswahl des Antriebsprinzips.

¹⁶³ Beispielsweise mit Brainstorming, Analyse bekannter technischer Systeme oder Konstruktionskatalogen). Methoden dazu in VDI 2222 [VDI 2222].

¹⁶⁴ S. auch [PER14].

¹⁶⁵ Bestimmen nicht zu verwendende Lösungsmöglichkeiten.

- Beziehungsmerkmale
 - schließen nachfolgend Teillösungsprinzipien aus, die sich aus physikalischen oder den Anforderungen nicht kombinieren lassen
 - übergeben Parameter, die aus den Anforderungen innerhalb einer Teillösung errechnet wurden, an nachfolgende Teillösungsprinzipien und dimensionieren diese zufolge der Anforderungen.
- Identifikation der Darstellungsweise der Lösungskombination
- Definition von Schnittstellen des Systems nach außen:
 - nach CAD¹⁶⁶
 - zu einem Bewertungsinstrument der Lösungen
- Realisierung in einer Software-Umgebung

Schritte

Die oben dargelegte Vorgehensweise fasst die Hauptschritte zur Erstellung eines Softwaresystems, ähnlich der Sylö-app (s. unten) zusammen. Sie dient als Orientierung für die Details der Umsetzung (s. [PER14]) eines Prinziplösungsgenerators¹⁶⁷.

Hilfsmittel (Software)

Für das wissenschaftsbasierte Generieren von Prinziplösungen existieren einige theoretische und praktische Ansätze¹⁶⁸. Für den Rahmen der Technischen Logistik wurden bisher folgende beispielhaft zwei Ansätze umgesetzt:

„Sylö-app“ [PER14]:

Die Lösung dient der prinzipiellen Gestaltung einer segmentweisen Förderstrecke bis hin zur Leistungsberechnung. Von einer gegebenen funktionalen Struktur (transportieren) ausgehend können über zentral erfasste Anforderungen (Durchsatz, Gutart) nach prinzipiellen Unterschieden Lösungen für einzelne Segmente der Strecke generiert werden. Grundlegende Berechnungen zur Antriebsdimensionierung, die gewisse Antriebsprinzipien aufgrund der nötigen Energiedichten ein- oder ausschließen, erfolgen im Hintergrund und werden von den einzelnen Segmenten ebenfalls zentral verwendet. Die einzelnen Förderprinzipien und deren Realisierungen sind logisch so erfasst, dass übergeordnete Anforderungen (z. B: stetig/unstetig) unterliegende Lösungsprinzipien und deren konstruktive Ausprägung ein- oder ausschließen. Als prinzipielle Lösungen sind jene des aktuellen Stands der Technik hinterlegt.

¹⁶⁶ Beispielsweise automatisierte Modellgenerierung mit den Parametern der Anforderung – vgl. KBSD als Zweig des Knowledge-based engineering (Kap. 2.2.13.3 und MeK5).

¹⁶⁷ Abgeleitet aus einem Prinziplösungsgenerator für Stetigfördertechnik sind die Schritte hier soweit verallgemeinert, dass Prinziplösungen weiterer Komponenten, Baugruppen und Maschinen der Technischen Logistik (s. Kap. 2.2.3.3) damit erzeugbar sind.

¹⁶⁸ Krappe [KR09] gibt mit seiner Arbeit und dem Konzept für die immersive Verwendung von Funktionsmodellen einen Überblick darüber.

Bild 3.16 zeigt die Eingabemaske und das ERM der SyLö-app am Beispiel der Generierung eines Rollenförderers¹⁶⁹.

Stückstrom [Stk/s]	5,00	Fördergeschwindigkeit [m/s]	1,00
AbstandFörderelemente [m]	0,20	MassenbelegungFördergut [kg]	30
Breite [m]		Hubwiderstand [N]	0,00
Heff [m]	0,00	HorizontalerFörderwiderstand [N]	1.530,36
Leff [m]	10,00	Antriebsleistung [W]	1.610,91
Eigenmasse [kg/m]			
Fu [N]	1.530,36		
SpezBewegungswiderstand	0,30		
WirkungsgradAntrieb	0,95		

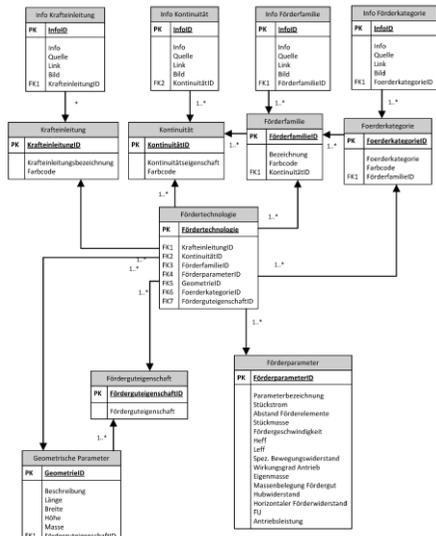


Bild 3.16: SyLö-app zur Generierung prinzipieller Lösungen einer Förderstrecke mit ERM

Automatisierter Morphologischer Kasten:

Am Beispiel der Lösungsvariation eines Vereinzelungsvorganges eines 3D-Paketstromes wurden mehrere morphologische Kästen mit einer anschließenden automatisierten Nutzwertanalyse verbunden¹⁷⁰. Auf Basis der dreiteiligen Funktionsstruktur (entsprechend zeitlicher Phasen der Bearbeitung) Zuförderung-Anordnung-Abförderung können für die einzelnen Phasen der Vereinzelung prinzipielle Lösungen generiert werden. Anforderungen werden hier nicht automatisiert übernommen, jedoch

¹⁶⁹ BilderBild 6.114 und Bild 6.115 zeigen weitere Konfigurationsdetails, die teilweise schon in das „Entwerfen“ des Rollenförderers reichen, sowie einen vergleichenden Bericht am Beispiel Bandförderer.

¹⁷⁰ S. auch Kap. 6.11.3.4: Einsatzbeispiele von MeK3 in der Technischen Logistik am autonomen Fahrzeug und am Sortiersystem.

ist eine Ausschlusslogik für nachfolgend physikalisch nicht kompatible Prinzipien hinterlegt.

Bild 3.17 zeigt die Realisierung des Morphologischen Kastens in Microsoft EXCEL®. Als prinzipielle Lösungen sind des aktuellen Stands der Technik hinterlegt.

	Vorteilhaft	Neutral	Nachteilig	Abstoßend
mechanisch	Verpackung des Pakets ohne Kontakt mit anderen Paketen Kugelfeder Rollenfeder Elastische Feder Torsionsfeder Antriebsmechanismus	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Übermäßige Reibungsverluste bei Funktionsverlust Angebot für Funktionsverlust
	Reibverschluss			
	Maß Antriebsmechanismus Zurückbleiben, korrektes Einlegen in Funktionsverlust Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Angebot für Funktionsverlust Angebot für Funktionsverlust
	Formschluss			
	Schwerkraft Freier Fall Reibverschluss Elastische Feder Torsionsfeder	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Keine Kontaktfläche mit anderen Paketen Energieaufnahme Funktionsverlust Funktionsverlust	Angebot für Funktionsverlust Angebot für Funktionsverlust
Fliehkraft				
Pneumatisch	Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus	Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus	Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus	Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus Antriebsmechanismus

Bild 3.17: Morphologischer Kasten (Phase 3: Abförderung) der Vereinzelung eines 3D-Paketstromes

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Die rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen ist der Phase **Konzipieren** [VDI 2221] zugeordnet (Bild 3.18). Aus der Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen erwächst das „Ergebnis prinzipielle Lösungen“. Außer bei Neukonstruktion werden bei keiner Konstruktionsart neue prinzipielle Lösungen herangezogen.

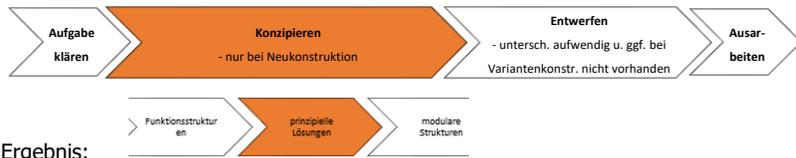


Bild 3.18: VDI-Konstruktionsphasen für MeK3

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeK3 ist als Methode zur Erstellung einer wissenschaftlichen Vorgehensweise zur Generierung prinzipieller Lösungen bei Neukonstruktionen vernetzt mit:

- MeK2 dient als Methodik von MeK3, da der eingesetzte automatisierte morphologische Kasten eine Methode des methodischen Entwickelns ist.
- MeK1, als ein Vorgänger von MeK2, erhebt die für das methodische Entwickeln nötigen Anforderungen simultan mit der Planung und frühestmöglich und bildet so die Eingangsbedingungen in MeK3 bilden.
- MeW1 als elektronische Wissensaufbereitung der Prinziplösungen (Wissenspeicher).

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Einsatz von Methodik beim Entwickeln von prinzipiellen Lösungen bedarf subjektiv eines Mehraufwandes gegenüber dem Generieren der pragmatischsten Lösung. Die Herausforderung der Wissenswiederverwendung und die Möglichkeit und Notwendigkeit des Auffindens neuartiger Lösungskombinationen rechtfertigt neben den Vorteilen unten den Einsatz.

Für Neukonstruktionen absolut **sinnvoll**.

Für Anpassungs- Varianten- und Wiederholkonstruktionen Teileinsatz **nicht möglich**.

Der Aufwand zur Erstellung eines Systems der rechnergestützten Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen ist je Entwicklungsfall sorgfältig abzuwägen. Als Empfehlung kann gelten, dass ein vollautomatisiertes System, wie die Sylö-app, nur bei wiederholtem Einsatz effizient eingesetzt werden kann¹⁷¹.

Vorteile Prinziplösungs-generierung:

- Erfindungs- und erkenntnisfördernd durch Generieren aller physikalisch möglichen Lösungen
- Wiederverwendbare und übertragbare Lösungen und Lösungsdokumente und damit Wissensspeicherung
- Dokumentation der Lösungsentwicklung durch Versionierung der Ergebnisse im IT-System
- Variantenvielfalt unaufwendig erzeugbar
- Schnittstellen zu weiteren Schritten (Bewertung, CAD-entwerfen bis Arbeitsergebnis Vorentwürfe) vorhanden/möglich

Nachteile:

- Einarbeiten in Entwicklungsmethodik ist zeitaufwendig
- Erstellen des Systems aufwendig (je nach Automatisierungsgrad)
- Nötige Abstraktion der Funktionsstruktur und derer prinzipiellen Lösungen ist oftmals schwierig
- Funktionsstruktur ist starr und bei Änderung ist das System nur aufwendig nachpflegbar
- Suche nach möglichst vielen Lösungsprinzipien ist der Schlüssel zum Gelingen von MeK3. Wenn diese nur pragmatisch, schnell von bestehenden Lösungen übernommen werden, sind neue Lösungen aus Kombinationen daraus unwahrscheinlich.
- Geringe Akzeptanz¹⁷² als Teil der Entwicklungsmethodik.
- Nutzen nicht vordergründig erkennbar – bedingt wie der Einsatz von Wissensmanagement und MeK2 vom Management nach unten durchgängig getragene Akzeptanz (vgl. in [VDI 5610-1]).

¹⁷¹ Dies ist beispielsweise auch dann der Fall, wenn nicht nur einzelne Segmente einer Förderstrecke neu zu entwickeln sind, sondern auch die Kombination dieser Segmente eine Neuentwicklung darstellt. Ein automatisierter morphologischer Kasten ist mit geringerem Aufwand erstellbar und bietet durch den Einsatz von Schlusslogiken einen beträchtlichen Bedienvorteil gegenüber der papiergebundenen Variante.

¹⁷² Nach [RS12] ist diese für den Morphologischen Kasten aber noch am höchsten.

Neuheitsgrad

Bei der rechnergestützten Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen handelt es sich durch die Automatisierung des bewährten Prinzips „Morphologischer Kasten“ und im Falle der Sylö-app um eine Neuheit für die Technische Logistik.

Im allgemeinen Maschinenbau existieren Ansätze zur Erfassung des Prozesses „Konstruieren“ die in automatisierten Lösungen umgesetzt werden. Die Quellen [LOS06] und [KR09] geben darüber Auskunft und beziehen sich auch auf die frühen Phasen des Konstruierens, im Gegensatz zu den Ansätzen des Knowledge-based engineering. Nach [LOS06] gestaltet sich die Aufgabe der Entwicklung rechnerunterstützter Systeme für den Konstruktionsprozess als schwierig. MeK3 versucht hier eine kleine Lücke für die Technische Logistik zu bedienen.

Beispiele

- Papiergebundene Morphologien aus der Technischen Logistik (mit MeK3 automatisierbar):
 - Für autonome, zellulare Fördermittel:
 - Prinziplösungen¹⁷³
 - Gesamtfahrzeug [OVF+10]
 - Für Ladehilfsmittel: Kap. 4.1 mit dem Ziel der Weiterverwendung der Lösungsprinzipien für weitere Neuentwicklungen [P10].
- Automatisierte Ansätze¹⁷⁴:
 - Beispiel Förderstrecke mit der Sylö-app¹⁷⁵
 - Vereinzelungsvorgang Stückgut¹⁷⁶

Quellen

Beispiele für MeK3 sind im Text oben mit Quellen angegeben.

Weiterführende Theorie zur Formulierung der logischen Schlüsse in MeK3 sind enthalten in [ROT00], [PER14] und [LOS06].

¹⁷³ Bilder Bild 6.108 bis Bild 6.110

¹⁷⁴ Bei Planungsprozessen werden prinzipielle Lösungen in der Phase der Grobplanung erstellt. Morphologische Kästen u.ä. kommen dabei nicht zum Einsatz, vielmehr werden wissensbasierte, selbstprogrammierte Systeme vorgestellt. Die zeitliche Frühphase ist vergleichbar zum Entwicklungsprozess:

- [EH12] für die Grobplanung eines Kommissioniersystems (aus bestehenden Lösungen). Grobkonzepte benötigen technische Ausprägung – repräsentiert durch Agenten die die Dimensionierung erledigen – kein CAD- u. Konstruktionsfokus beschrieben.
- [JT12] gibt einen Überblick über wissensbasierte Methoden zur Planung.

¹⁷⁵ Bilder Bild 6.114 und Bild 6.115

¹⁷⁶ Bild 6.111. [FWJ13] avisiert dazu die systematische Weiterentwicklung der physischen Lösung des Vereinzelungsvorganges unter Verwendung von Entwicklungsmethodik.

3.4.4 MeK4: Methodikeinsatz im CAD

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

CAD-Konstrukteure werden zweifelsohne bei Fehlen von Vorgaben zur Arbeitsweise in ihrem CAD-System zum „Weg des geringsten Widerstandes“ tendieren. Dies ist in manchen Situationen, für schnelle, einfache, Ersatzlösungen praktikabel, für die Neuentwicklung von CAD-Modellen darf diese Entscheidung aber nicht dem einzelnen Konstrukteur überlassen werden, insbesondere nicht, wenn es sich um modulare Produkte handelt. Es muss eine Strategie vom Konstruktionsmanagement vorgegeben werden. Das Vorhandensein eines ebensolchen ist aber nur in größeren Unternehmen vorauszusetzen.

Laut [FEL13a] ist eine Methodik im CAD für jede Art von zu variierender Konstruktion nötig. [FEL13a] verweist auch direkt auf die Konstruktionsmethodiken, die für eine durchgängige Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses unabdingbar sind. [RS12] fordert eine sorgfältige Überlegung der Nutzung und des Aufbaus von 3D-CAD-Modellen und verweist auf [VDI 2209], die als maßgebendes Werk zur strategischen Planung des Arbeitens mit CAD gesehen werden.

Für modulare Produkte, erzeugnisorientierte CAD-Modelle und die Strategien der Produktentwicklung, wie bspw. concurrent engineering sind methodische, nachvollziehbare und änderbare CAD-Modelle also ein Muss. Diese methodischen Ansätze betreffen dabei die Produktstruktur genauso wie die Erzeugung der CAD-Einzelteile. MeK4 bietet eine Zusammenschau der Erkenntnisse aus [VDI 2209] mit eigenen Ansätzen und soll helfen, breite Aspekte des Einsatzes von CAD zu beleuchten. Es werden die klassischen Vorgehensweisen top-down und bottom-up vergleichend und situationsabhängig bewertet¹⁷⁷.

Zielsetzung:

- Überblick über existierende Vorgehensweise (Methoden und Methodiken) des CAD, über den Umfang der üblichen Fachliteratur hinaus¹⁷⁸.
- Vermeidung von un- oder nur schwer änderbaren CAD-Modellen
- Effizientere Varianten- und Anpassungs-CAD-Modelle
- Verbesserung der Zusammenarbeitsmöglichkeiten
- Beherrschen großer Produktstrukturen
- Basis für die automatische Konstruktion (KBE)¹⁷⁹
- Effiziente Neuentwicklung von Produkten in CAD für eine Wiederverwendung

¹⁷⁷ Die Ansätze der direkten und flexiblen Modellierung werden im Kontext von MeK4 als nachgeordnete Änderungs- und Reparaturmechanismen gesehen und sind inhaltlich hier nicht Teil.

¹⁷⁸ S. Abschnitt „Literatur“ von MeK4: diese bezieht sich größtenteils auf die richtige Bedienung der Software-Werkzeuge.

¹⁷⁹ S. MeK5 und Kap. 3.4.5.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Zur methodischen Arbeitsweise mit CAD zählen¹⁸⁰:

- Top-down bzw. ergebnisorientierte Modellierung und Bottom-up bzw. bauteilorientierte Modellierung
- Schnittstellendefinitionen (wenn die CAD-Systeme keine Techniken für Top-down anbieten)
- Parametrische Modellierung
- Featurebasierte Modellierung¹⁸¹
- Skeletttechnik¹⁸²
- Wissensbasiertes Modellieren und Konstruieren (KBE)
- Strategien der Referenzierung von Bauteilen und Baugruppen untereinander
- Integration von Teilkatalogen
- Verbale, prozessorientierte Vorgabe von Handlungsweisen.

Fokus zur Technischen Logistik

Die Gewerke der Technischen Logistik sind im Falle der Intralogistik stark kundenwunschgeprägt und stellen somit eine klare Varianten- bzw. ggf. eine Wiederholkonstruktion dar (siehe auch Kap. 2.2.11.2). Einzelne Produktlebensdauern sind üblicherweise im Bereich von zehn und mehr Jahren zu sehen, wobei die Ausführung der Produkte durchaus modular, allenfalls aber spezifisch ist.

Daraus bietet sich der propagierte Ansatz „Methodikeinsatz im CAD“ quasi dringlich an, um mit all seinen Vorteilen die Produktentwicklung effizienter zu machen und sogar eine Basis für automatische Konstruktion (KBE mit MeK5) zu schaffen. Problematisch im Fachbereich ist allerdings die noch nicht vollständige Durchdringung mit 3D-CAD und die alleinige bzw. parallele Verwendung von 2D-CAD, das die hier vorgestellten Methoden in keiner Weise unterstützt¹⁸³. Entsprechend dem Durchdringungsgrad von 79% 3D-CAD im allgemeinen Maschinenbau [VDI 2209] ist 3D-CAD in der Technischen Logistik erfahrungsgemäß geringer verbreitet, wobei allerdings keine Daten vorliegen. Auf jeden Fall existiert auch ein starkes Nebeneinander von 3D und 2D vor allem auch daher, dass die Layout-Planungen logistischer Anlagen naturgemäß zweidimensionaler Art sind und hierbei verbreitet 2D-CAD eingesetzt wird. Die Schnittstellenlücke zu einer etwaigen 3D-Konstruktion ist noch nicht ausreichend bearbeitet und bietet Potenzial zur Übernahme von Planungsdaten zu Konstruktionsvorgaben¹⁸⁴.

Die hier dargelegten Einzelmethoden sind aufgrund der Erzeugnisorientiertheit und Komplexität logistischer Gewerke und Produkte gegenüber der Einzelteilorientiertheit (Bottom-up Methode) als für die Technische Logistik geeignet zu empfehlen.

¹⁸⁰ Begriffsdefinitionen in Übereinstimmung mit [VDI 2209], [VWB+09] wenn nicht anders angegeben.

¹⁸¹ Details [VDI 2218].

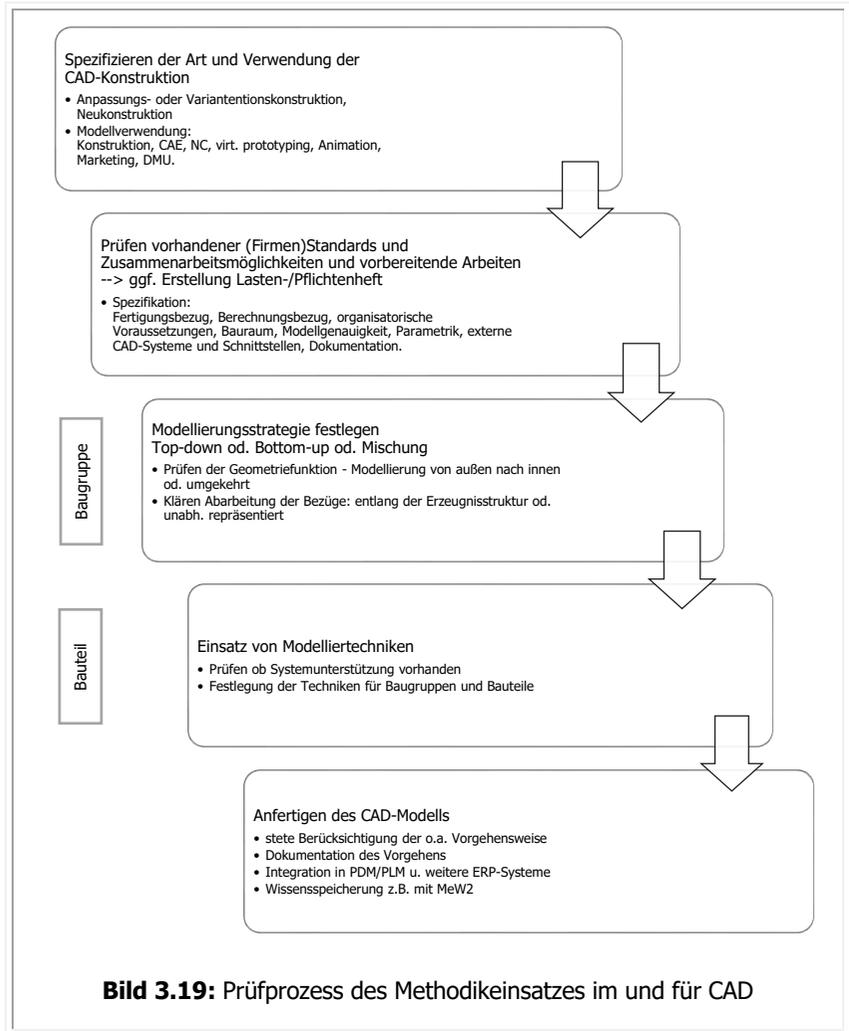
¹⁸² In [VDI 2209] auch als „Gerüst“ bezeichnet.

¹⁸³ Dass 3D-CAD noch lange nicht überall Standard ist und mit 2D auch erfolgreiche Produktprogramme vermarktet (aber wohl nicht neuentwickelt (sic!)) werden ist ein Charakteristikum der Branche im Hinblick auf diese Methode [GEP12].

¹⁸⁴ Siehe dazu auch Abschnitt 3.4.1 sowie KBL als eine Variante des KBx – MeK5.

Durchführung

Methodikeinsatz im und für CAD



Schritte

Spezifizieren der Art und Verwendung der CAD-Konstruktion: Es muss klar analysiert werden, wie die neu zu erstellende CAD-Konstruktion über ihren Lebenszyklus hinweg verwendet wird¹⁸⁵. Dazu unbedingtes Klären der Randbedingungen, Schnittstellen¹⁸⁶ und Anforderungen des Zielsystems des CAD-Modells (Modellverwendung).

¹⁸⁵ S. dazu [VDI 2209] und Kap. 2.2.11.2.

¹⁸⁶ Eine Übersicht zum Funktionsumfang systemneutraler Schnittstellen bietet [VDI 2209] in Tab. 3.

- **Neukonstruktion:**
komplexestes CAD-Vorgehen schon für Anpassung und Varianten planen. Gute Strukturierung nach Erzeugnis oder/und Bauteil nötig (s. Schritt 3). Beachtung und Planung von austauschbaren Baugruppen und Teilen sowie Schnittstellen und deren Datenformate. Planung der CAD-Verwendung für die Dokumentation.
- **Anpassungskonstruktion:**
Ändern der Geometrie und Chronologie des Bauteils. Änderungen an der Parametrik. Variantenkonstruktion mit dem Ergebnis einer neuen Variante des Teilbereichs. Neukonstruktion des Teilbereichs.
- **Variantenkonstruktion:**
Topologie bleibt unverändert auf Basis der Neu- bzw. Anpassungskonstruktion, Teilefamilien erzeugbar.

Prüfen vorhandener (Firmen)Standards und Zusammenarbeitsmöglichkeiten und vorbereitende Arbeiten --> ggf. Erstellung Lasten-/Pflichtenheft¹⁸⁷: Die Kenntnis von firmeninternen Standards wird bei den Verantwortlichen vorausgesetzt. Ebenso nötig ist klare Information über die Zusammenarbeit im Team und die dazu nötigen Prozesse und Hilfsmittel sowie jene nach externen (Zu)arbeiten im Bereich CAD. Diese Spezifikation betrifft die Bereiche und Bezüge zu Fertigung, Berechnung, Organisation (PDM/PLM, ERP). Festzulegen sind der Bauraum, Modellgenauigkeit, Art der Parametrik und Bezüge (s. Schritt 3).

Top-down od. Bottom-up od. Mischung: Aus den Vorüberlegungen heraus muss klar entschieden werden, welche CAD-Teile mit welcher Technik erstellt werden¹⁸⁸. Die Geometrie kann von „innen nach außen“ oder von „außen nach innen“ erstellt werden und weist immer neben dem geometrischen Aspekt auch einen funktionalen auf; Detaillierung nach Tabelle 14.

Tabelle 14: Beispiele für CAD-Modellierungsstrategien und Ansätze [VDI 2209]

	Erzeugnisorientierte Modellierung (Top-Down)	Einzelteilorientierte Modellierung (Bottom-up)
Modellierung „von außen nach innen“	komplexe Gesamtprodukte, Neukonstruktion z.B. Gesamtfahrzeug	Bauteile mit besonderen Anforderungen an Design, Fertigung, etc., ... z.B. Verkleidungsteile, (Guss-)Gehäuse, Blechteile Erstellung von Baukästen z.B. Maschinen- und Anlagenbau
Modellierung „von innen nach außen“	Funktionsbaugruppen, Neukonstruktion, z.B. Verbrennungsmotor, Getriebe Anwendung vorhandener Baukästen, z.B. Maschinen- und Anlagenbau	Funktionsbauteile mit besonderen physikalischen Anforderungen, z.B. strömungstechnische Bauteile

In ausgewählten Fällen schneller Notlösungen oder, besser, bei komplexen Funktionsbauteilen kann die Bottom-up Technik gewählt werden. Die Top-down

¹⁸⁷ Für die weiteren Schritte ist die detaillierte Kenntnis der beschreibenden Fachliteratur unumgänglich v.a. [VDI 2209].

¹⁸⁸ Schritt 4 stellt somit die konkreteste Handlungsempfehlung von MeK4 dar.

Technik ist das der Produktstruktur näherliegende Mittel und entspricht eher der Arbeitsweise der meisten 3D-CAD-Programme. Trotz ihrer Vorteile ist sie nicht durchgängig verbreitet. Die parametrischen Bezüge müssen bei jeder Modelländerung neu abgearbeitet werden. Es ist daher relevant, wie diese angelegt werden und man kann sie differenzieren[VDI 2209]:

- Parametrische Bezüge strukturiert entlang der Erzeugnisstruktur: übersichtlicher, einfachere Auswertung, Schwierigkeiten wenn nicht top-down gerichtete Bezüge modelliert sind.
- Parametrische Bezüge unabhängig repräsentiert: freiere Modellierung möglich aber nicht transparent, aufwendiges constraint-Management zur Beziehungsauflösung nötig. Fehler entlang der Konstruktionslogik werden verdeckt.

Einsatz von Modellertechniken: Hiermit beginnt die eigentliche CAD-Modellerstellung nach den vorbereitenden und planenden Schritten oben. Je nach Software-Werkzeug (CAD-Programm) ist Systemunterstützung für die je Baugruppe und Bauteil gewählte Modellertechnik vorhanden¹⁸⁹.

Baugruppen:

Abhängig von der Entscheidung zugunsten Top-down können weitere Modellierungstechniken hinzu genommen werden. Hierzu ist das KBE und KBx (MeK5) zu zählen, das methodisch erstellte CAD-Modelle automatisch konfiguriert und ändert – also wissensbasiert konstruiert. Vor allem wirtschaftliche Gesichtspunkte sind dazu umfangreich zu betrachten, da vermehrt Erstellungs- und Pflegeaufwand entsteht, langfristig bei richtigem Einsatz (in der Variantenkonstruktion) aber viele Vorteile generiert werden können. Techniken des Assembly Design sind [HDG+13] jene klassischen wie Zwangsbedingungen oder Skeletttechniken. Funktionen des Assembly Designs sind die dreidimensionale Anordnung der Bauteile entlang einer definierten Produktstruktur, die Definition der Beziehungen untereinander, die Struktur der Parametrierung und die Bereitstellung von Hilfsgeometrie (Skelette).

Bauteile:

Die Modellertechniken der Bauteile sind ungleich vielfältiger und noch stärker vom gewählten CAD-Softwarewerkzeug abhängig als jene der Baugruppen: Dazu zählen bspw. die Featuretechnologie genauso wie Methoden des intelligenten Austausches von Geometrieinformationen (Kopiegeometrie) wie auch Referenzsteuerungstechniken und KBE. Die Technikauswahl kann bei Bauteilen eher dem einzelnen Konstrukteur überlassen werden, als bei den Baugruppen.

Beim **Anfertigen des CAD-Modells** kommen natürlich die o.a. Modellierungstechniken zum Einsatz. Es ist aber auch auf die Dokumentation des Vorgehens und die Integration der Arbeitsschritte in übergeordnete Systeme wie PDM/PLM oder ERP zu achten. Wissenswiederverwendung kann mit den Methoden MeW1 und v.a. MeW2 unterstützt werden¹⁹⁰.

Hilfsmittel (Software)

Als Hilfsmittel aller hier als Methodikeinsatz im CAD vorgestellten Techniken dienen natürlich die CAD-Programme selbst, mit ihren unterschiedlichen Funktionen. Die von zahlreichen Rankings als ungefähr gleich funktionellen High-End-Produkte PTC Creo[®], Dassault Catia[®] und Siemens NX[®] bieten ähnliche und vergleichbare

¹⁸⁹ Einen Überblick darüber bietet v.a. Kap. 6.6.1 aber auch [VDI 2209] und [VDI 2218].

¹⁹⁰ MeW2 ermöglicht eine externe Beziehungsentwicklung in einem übergeordneten mehrdimensionalen Ontologiesystem und die Schnittstelle zum/vom CAD zur externen Steuerung und Verwaltung von Beziehungen und Parametern. Dies betrifft nicht unmittelbar die Modellierungsstrategie (Top-down, Bottom-up) sondern die darin definierten Referenzen und Parameter.

Funktionalitäten¹⁹¹. Insbesondere die Technologien der Produktstrukturierung wie Skeletttechniken werden nicht von allen Softwaresystemen gleich funktionell unterstützt¹⁹².

Für informationstechnische Voraussetzungen stellt [VDA 4961] eine Checkliste bereit.

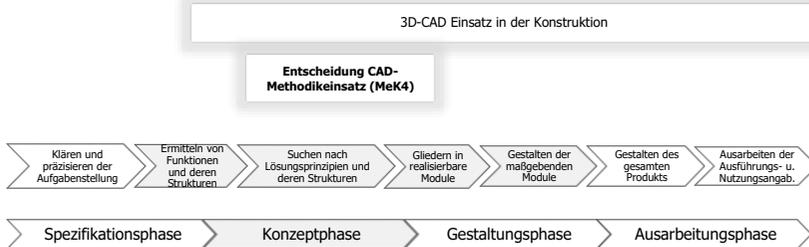
Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

[VWB+09] definiert den Beginn der 3D-Modellierung in der Produktentwicklung beim Übergang von der Konzeptphase zur Entwurfsphase und bezieht sich dabei auf den Produktentwicklungsprozess nach [VDI 2221]. Für viele konstruktive Aufgaben ist aber die Zuhilfenahme von CAD schon zu früheren Entwicklungsstufen nötig, da komplexe Rahmenbedingungen, wie Schnittstellen, Bauräume, ..., sonst nicht verdeutlicht werden können¹⁹³.

Entsprechend der Vernetzung von CAD-Aufgaben in der Konstruktion der Technischen Logistik mit Planungsaufgaben kann der CAD-Methodikeinsatz in einen dem Produktentwicklungsprozess verwandten Prozess der 7-Stufen Planungssystematik für Materialflusssysteme [HNS07] eingeordnet werden (siehe auch Methode MeK1 und Abschnitt 3.4.1). Mit den vier Hauptschritten nach [VDI 2221] (alternativ dargestellt nach [RS12]) und einer 7-Stufen Planungssystematik für ein Materialflusssystem [HNS07] kann man den CAD-Einsatz den Prozessphasen mit in Bild 3.20 zuordnen:

Entwicklung/Konstruktion:



Materialflussplanung:

7-Stufen-Planungssystematik

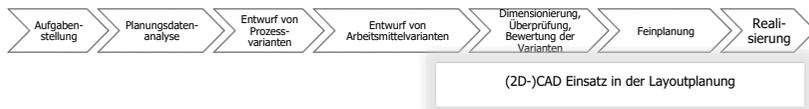


Bild 3.20: Zuordnung der CAD-Verwendung zu Prozessphasen des Entwickelns (nicht Neukonstruktion in grau) [VDI 2221] und Planens [HNS07]

¹⁹¹ Eine umfangreiche Darstellung findet sich in [LAN15].

¹⁹² Als Beispiel für CAD-Baugruppen-Techniken kann für das Produkt PTC Creo® die Skeletttechnik, das Layoutmodell, die Funktion Kopier/Publiziergeometrie mit Schrumpfverpackung, die Komponentenschnittstellen sowie zur Beziehungsdefinition die Referenzsteuerung und zu deren Analyse der Referenzviewer als effizient einsetzbar genannt werden.

¹⁹³ Auch beim simultaneous engineering der Entwicklung mit der Planung kommt CAD, und hier v. a. das 2D-CAD schon in der Phase der Anforderungsdefinition zum Einsatz.

Die Entscheidung zugunsten des Methodikeinsatzes im CAD ist also sehr früh im PEP der Neukonstruktion zu treffen, da sie alle weiteren CAD-Schritte maßgeblich beeinflusst. Bei der Anpassungs- und v. a. Variantenkonstruktion ist ein nachträglicher Einsatz von bspw. Top-Down an nicht damit erstellten Modellen ein erheblicher Aufwand. Dieser ist kritisch zu prüfen und wird sich nur bei Modularisierung und Variantenreichtum eines Produkts lohnen¹⁹⁴. Eine Verwendung von Methodik im 2D-CAD Planungsbereich ist durchaus denkbar und wird auch in unterschiedlichsten Ausprägungen angewandt, wenngleich die Techniken komplett unterschiedlich zu jenen für 3D sind. Hier sind vermehrt Bibliothekssysteme und drag&drop Module/Blöcke mit hinterlegten Informationen zu finden, die am ehesten den 3D-Komponentenschnittstellen entsprechen. Die Verwendung dieser Methodiken gestaltet auch den 2D-CAD Planungseinsatz effizienter, ist aber nicht Teil von MeK4.

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeW1 bietet Arten von Wissensspeichern für den Einsatz der mit MeK4 geforderten Konstruktionsregeln.

MeW2: Die externe Entwicklung von Abhängigkeiten mittels übergeordnetem Software-Werkzeug (z.B. xKBE-app) kann den Methodikeinsatz im CAD effizienter gestalten. Eine bidirektionale Abhängigkeit von Beziehungen und Parametern ergibt sich aus der Auslagerung von CAD-Konfigurations- und Parametrisierungsaufgaben in das extern wissens- und beziehungsverarbeitende Programm xKBE-app.

MeK2: Die Konstruktion wird v. a. in ihrer Modularität durch die Umsetzungsmöglichkeit jener in CAD beeinflusst. Dies ist im methodischen Entwicklungsprozess zu berücksichtigen.

MeK5: Im Falle der automatischen Konstruktion sind Rahmenbedingungen bei der Gestaltung der CAD-Methodik zu berücksichtigen, die nur in ihrer Effizienz, nicht aber existenziell von der CAD-Softwaresystemen abhängig sind.

Zum Bereich Berechnung und CAE ist keine direkte Querbeziehung an sich vorhanden. Die CAD-Methodikverwendung ist dort aber sehr wohl von Wichtigkeit, wenn es um die effiziente Erstellung von Importgeometrien für CAE geht, die, aufgrund berechnungstechnischer Restriktionen, immer eine Abwandlung der zu fertigenden CAD-Geometrie sind. CAD-Modelle stellen hier aber nur zur Geometrieerzeugung einen Bezug zu CAE her. Vielmehr ist die Prozesskette CAD-CAE mit Optimierungsschleifen durch methodisches CAD zu verbessern¹⁹⁵. Hierzu bieten die neu auftkommenden Techniken der flexiblen und direkten Modellierung geeignete Unterstützung.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Methodikeinsatz im CAD bedarf strukturierender Entwürfe als Vorarbeit und ist somit in einer ersten Phase subjektiv produktivitätshemmend, was sich aber im Falle jeder (immer notwendigen) Konstruktionsänderung auch nur kleinsten Ausmaßes als das Gegenteil herausstellt.

¹⁹⁴ Bild 6.32 zeigt die Einflüsse der 3D-Produktmodellierung im Produktlebenszyklus.

¹⁹⁵ Siehe Bild 6.72 bis Bild 6.74.

Für Neukonstruktionen **absolut empfohlen**, ein Nachpflegen vorhandener Konstruktion ist bei großem Anpassungsaufwand derselben bei Variantenreichtum und Modularisierung **sinnvoll**.

Vorteile

- Einsatz in nahezu jedem CAD-System möglich.
- Je konsequenter eingesetzt, desto geringer Aufwand bei späteren Konstruktionsänderungen.
- Einmal erstellte CAD-Strategie ist auf viele ähnliche Produkte projizierbar.

Nachteile

- Höherer Zeitaufwand als „quick and dirty CAD“
- Qualifiziertes Personal (CAD-System abhängig) und Hintergrundwissen [VDI 2209] notwendig

Top-down (nach [VDI 2209]): Die strenge Gliederung kann von Konstrukteuren als Einengung empfunden werden. Vorteilhaft bei autonomer Erstellung von Teilen (in strukturierten Arbeitsgruppen). Vorteilhaft bei Wiederverwendung von Bauteilen und Baugruppen.

Bottom-up (nach [VDI 2209]): Nachträglich abstimmende Maßnahmen nötig. Flache Produktstruktur ist hilfreich.

Da nach [EM13] der Arbeitsaufwand zum Projektende exponentiell steigt, können methodische CAD-Modelle hier zumindest arbeitstechnischen Nutzen schaffen.

Neuheitsgrad

Die Techniken hinter dem Methodeneinsatz im CAD sind lange verfügbar. Die Zusammenfassung jener hier als Methode MeK4 soll Bewusstsein für die Sinnhaftigkeit der Verwendung schaffen, sowie eine Basis für die propagierten Ansätze der automatischen Konstruktion (KBx mit MeK5) liefern. Im Sinne ihrer Projektion auf logistische Gewerke kann man bei etablierten, großen Unternehmen von einem Einsatz von MeK4 ausgehen, andererseits sind viele Produzenten bekannt, die weit davon entfernt sind!.

Beispiele

Beispiel für die Wirkung von Top-down:

1: Eine Bohrung, deren Position durch räumliche Gegebenheiten (in einem Top-down Modell) vorgegeben ist, soll durch zwei Teile einer Tragkonstruktion, die unabhängig voneinander entwickelt werden, durchgehen. Wenn diese Bohrung im zusammengebauten Zustand auf beide Teile aufgebracht wird, werden die beiden Einzelbohrungen fluchten und auch bei Änderung der Bohrungsposition werden beide Teile die Änderung erfahren. Wäre im Gegensatz mit Bottom-up den beiden Konstrukteuren, die jeweils einen Teil erstellten, die Bohrungsposition vorher mitgeteilt worden, so hätten beide diese Änderungen nachvollziehen müssen, was aufwendig und v.a. fehleranfällig ist.

2: Bei einer Top-down Produktstrukturierung nach Bild 3.21 ist z.B. die Änderung des Bohrungsdurchmessers im Motor auf alle beteiligten Bauteile (Pleuel, Kolbe, Zylinderkopf,...) hierarchisch über ein z.B. Skelettmodell geregelt und muss in den einzelnen Komponenten, im Gegensatz zur Bottom-up Technik, nicht nachgepflegt werden. Dies erleichtert das Änderungsmanagement und vermeidet Fehler beim durchgängigen Nachziehen von Änderungen. Die abgebildete Hierarchie ist z.B. in einem CAD-System in übergeordneten Werkzeugen einsehbar¹⁹⁶. Im Falle von KBE kann diese mit MeW2 auch extern angelegt, verwaltet und importiert bzw. exportiert werden, was die Schnittstelle zu weiteren Werkzeugen, wie bspw. berechnungs- oder datenbankgesteuerte Parameterdefinition, eröffnet.

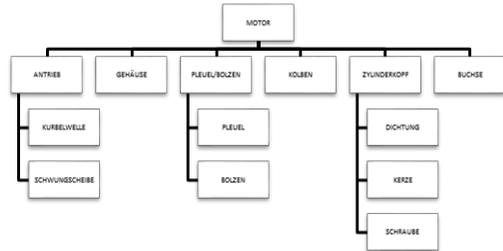


Bild 3.21: Top-down einer Verbrennungskraftmaschinenbaugruppe

Szenario für den Einsatz in der Technischen Logistik:

Eine Umsetzung der Funktionalitäten des KBx ist v.a. durch den Einsatz von CAD-Methodik möglich.

Erfahrungsberichte zum Methodik-Einsatz:

Der Einsatz der AVL-Motormethodik, der im Wesentlichen alle hier angeführten Techniken und weitere verwendet, führt zu einem erheblichen Marktvorteil in der konzeptionellen und vollständigen Neuentwicklung von Verbrennungskraftmaschinen gegenüber den herkömmlichen Methoden, die teilweise bei den OEMs in Verwendung sind [GEP11], [SAS06].

Quellen

Als wichtigste Quelle ist hier [VDI 2209] angeführt, die auch die strategischen Dimensionen der Methodik im CAD beschreibt. Über die Leistungsmerkmale von CAD-System gibt [VDI 2249] übergeordnet Auskunft, nicht jedoch zu den Modellierstrategien. [VDI 2218] behandelt die Feature-Technologie allgemein. Die Umsetzung der Strategien ist von den verwendeten Software-Produkten abhängig; dafür sei auf die produktbegleitenden Hilfesysteme und Trainings verwiesen. [VDI 2209] gibt weiters in Abschnitt 9 Empfehlungen für die Praxis mit CAD. [HDG+13] behandelt CAD im Kontext der Automobilindustrie.

Die Quellen [KÖH10], [CKV08] und [BON13] behandeln die Bedienung von PTC.Creo®. Details zu Methodik im CAD sind hier nicht enthalten.

¹⁹⁶ Bei PTC Creo® im Referenzviewer.

3.4.5 MeK5: KBx

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Historisch belegt sind Vollautomatisierungsversuche von Konstruktionen der 1990er Jahre, wo automatisierte Konstruktion (KBE) erstmals IT-technisch möglich wurde. Viele davon sind als gescheitert zu betrachten, da der Aufwand dem Nutzen gegenüber in einem groben Missverhältnis stand. Der hohe Aufwand der Erstellung von KBE-Lösungen ist einer der Hauptnachteile, Konstruktionsprozesse wissensgestützt effizienter und akkurater zu machen.

Die Literatur beschreibt aktuelle ausgewählte erfolgreiche Lösungen [ALC14] und Methodiken zum Entwickeln von full-KBE Systemen (full-KBE nach der Einteilung in Kap. 2.2.13.2 Tabelle 5). [VBD+12] zeigt den aktuellen Stand auf und spezifiziert Entwicklungsziele. Dazu zählen das Beseitigen improvisierter Lösungen und die Wissenswiederverwendung. Es existieren keine technischen Handlungsempfehlungen zum Erstellen von KBE-Lösungen; lediglich aufwendige Methodiken zur Erstellung eines solchen Systems auf IT-Ebene sind bekannt. Umfangreiche projekttechnische Vorgehensweisen zur Erstellung von KBE werden mit [VDI 5610-1], technische Beispiele mit [VDI 5610-2] dargelegt. Nirgendwo dort wird nach dem Grad der sinnvollen Automatisierung einer Konstruktionsaufgabe und oder nach der Größe des zu erzeugenden CAD-Modells differenziert. Hier bietet MeK5 einen ersten Ansatz der Differenzierung und in Ergänzung dazu greift MeW2 die Wissenswiederverwendung im KBE-Erstellungsprozess auf.

Zielsetzung:

- Entscheiden zu können, ob eine KBE-Lösung erstellt werden soll.
- Entscheiden zu können, was in einer Konstruktion sinnvoll wofür automatisierbar ist.
- Bewusstsein für Sinnhaftigkeit automatisierter Konstruktion schärfen.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Die Ziele von oben werden erreicht durch:

- Bereitstellung von Bewertungsmöglichkeiten und Prüfkriterien für den KBE-Einsatz und ggf. Verwurf des Entschlusses der Erstellung einer KBE-Lösung
- Differenzierung der Konstruktionsautomatisierung nach technisch/logistischer Aufgabenstellungsart und schrittweiser Reduktion des Automatisierungsgrades mit zunehmender Größe und Komplexität der Gewerke (aus KBE wird KBx)
- Bereitstellung eines Werkzeuges der Wissensverwaltung (MeW2), das den Erstellungsprozess der KBE-Lösung unterstützt und dokumentiert
- Bereitstellung von Umsetzungsbeispielen

Ein Prozess stellt dazu eine Frage/Checkliste für den Einsatz von KBE bereit und mit der Definition des KBx kann der Konstruktionsautomatisierungsgrad für unterschiedliche Aufgabenstellungen differenziert werden.

Fokus zur Technischen Logistik

Die KBx-Definition (Kap. 2.2.13.3) ist im Kontext der Technischen Logistik entwickelt und als solche nur für diese gültig. Eine Abstufung der Konstruktionsautomatisierung ist sicherlich für andere Branchen denkbar, allerdings nicht unangepasst von der KBx-Definition auf diese übertragbar.

Eine Zuordnung der Möglichkeiten des KBx gibt Bild 3.22 wieder.

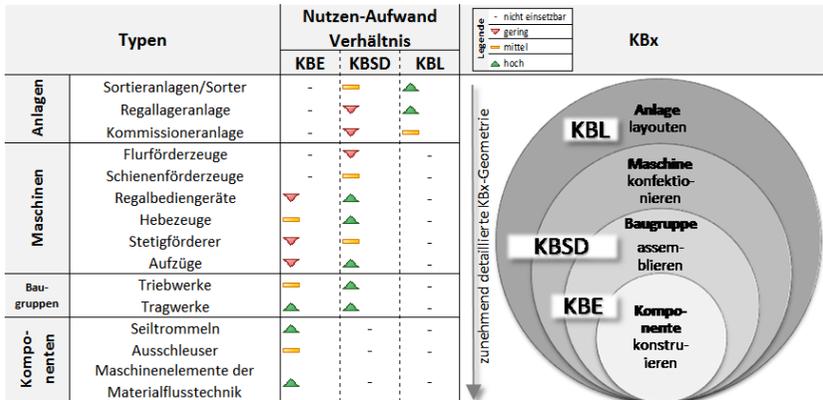


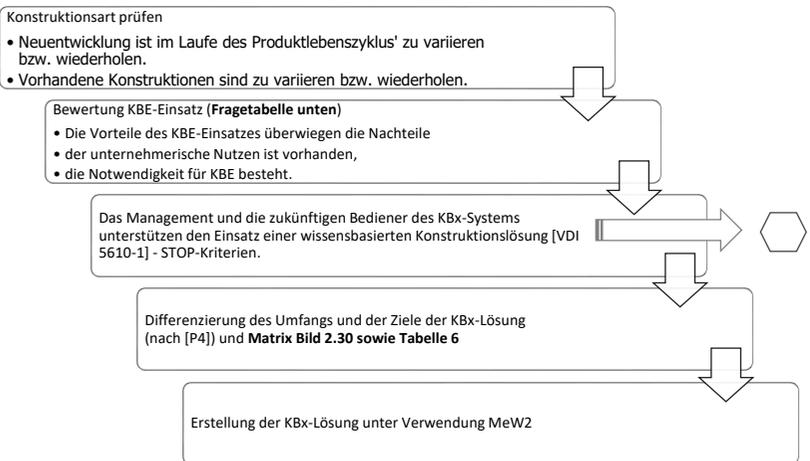
Bild 3.22: Eignung des KBx für die Gewerke der Technischen Logistik [P3]

Durchführung

Ablaufplan (Bild)

Prüfprozess zum Einsatz KBx

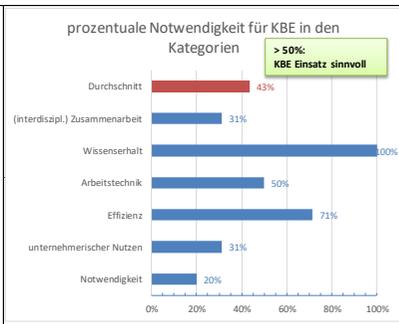
Das Erstellen einer KBx-Lösung ist aufgabenspezifisch immer unterschiedlich [VBD+12]. Untenstehend findet sich ein Prüfprozess, ob und welche Art von KBx für die Konstruktionsaufgabe eingesetzt werden soll.



↓ **Bild 3.23:** Prüfprozess KBx in der Technischen Logistik ↓↑

#	Kategorie	Prüffragen	Gewichtung		Bewertung	gew. Wert	Anmerkung (nicht für den Befragten)
			rel. in der Kat. (durch paare Vergleich)	Vorgabe [1/2]			
N1	Notwendigkeit nach [ALC12]	Wird Konstruktionswissen unzureichend verwaltet?	▲ 2	▲ 2	2	4	
N2		Geht Wissen durch das häufige Wechseln von Fachkräften im Unternehmen verloren?	▲ 2	▼ 0	0	0	
N3		Sind viele dezentrale Wissensspeicher unterschiedlicher Art vorhanden und diese nicht immer aktuell?	▲ 2	▲ 1	1	2	
N4		Ist die Benutzerfreundlichkeit bereits eingesetzter KBE-Systeme ausreichend?	▼ 1	▼ 0	0	0	
N5		Besteht der subjektive Eindruck, dass zu viel Wissen im Konstruktionsprozess vorhanden ist?	▼ 1	▲ 2	2	2	
			Teilergebnis:		8	von 20	
U1	unternehmerischer Nutzen nach [ALC12]	Benötigt der Konstruktionsprozess Beschleunigung?	▲ 2	▲ 2	2	4	
U2		Sind komplexe Berechnungen vorhanden und daher die Fehleranfälligkeit der Konstruktion hoch?	▲ 2	▲ 2	2	4	
U3		Ist die Produktentwicklung multidisziplinär und daher die Bearbeiter auf Ihre Kernkompetenzen fokussiert (verteilte Rollen in der Konstruktion/Berechnung)?	▼ 1	▲ 2	2	2	
U4		Sollen die Konstrukteure nur wenige Entscheidungen selbständig treffen?	▼ 1	▲ 2	2	2	
U5		Ist der Konstrukteur bereits frei für innovative Tätigkeiten?	▲ 2	▼ 1	-1	-2	negative Frage!
			Teilergebnis:		10	von 16	
E1	Effizienz	Ist die Produkteinführungszeit zu reduzieren?	▲ 2	▲ 2	2	4	
E2		Sind die Produktkosten zu reduzieren?	▲ 2	▲ 2	2	4	
E3		Sind viele Anpassungen an Kundenwünsche vorhanden, die die Konstruktion nicht wesentlich ändern (max. Variantenkonstruktion)?	▼ 1	▲ 1	1	1	
E4		Sollen diese Kundenanforderungen rascher umgesetzt werden?	▼ 1	▼ 1	1	1	
E5		Sind die Produktdetails zu spät im Entwicklungsprozess bekannt?	▼ 1	▲ 2	2	2	
E6		Soll Konstruktionswissen an Dritte weiter vermarktet werden?	▲ 2	▲ 2	4	4	
E7		Kann prinzipiell Budget für F&E einer KBE-Lösung bereitgestellt werden?	▲ 2	▲ 2	4	4	STOP-Kriterium
			Teilergebnis:		20	von 28	
A1	Arbeitstechnik	Ist das vorhandene CAD-System etabliert im Unternehmen (oder neu)?	▼ 1	▲ 2	2	2	
A2		Wird viel Zeit für Doppelarbeiten benötigt?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A3		Wird viel Zeit für das Aufsuchen bereits getätigter Konstruktionen benötigt?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A4		Kann den Mitarbeitern Einarbeitungszeit in die neue KBE-Lösung bereitgestellt werden?	▲ 2	▲ 2	4	4	
A5		Ist mehr Transparenz für Unternehmens- und Entwicklungsprozesse nötig?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A6		Benötigt der Konstruktionsprozess mehr Standardisierung?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A7		Ist die Dokumentation der Entwicklung verbesserungswürdig?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A8		Besteht Verbesserungsbedarf bei Zugriffskonzepten auf konstruktive Daten?	▼ 1	▲ 1	1	1	
A9		Treten die Konstruktionsaufgaben wiederholt auf (Anpassungs- und Variantenkonstruktion)?	▲ 2	▲ 2	4	4	
A10		Ist Budget und Kapazität zur Betreuung der KBE-Lösung nach der Erstellung dieser noch vorhanden?	▲ 2	▲ 1	2	2	STOP-Kriterium
A11		Ist die Produktarchitektur soweit statisch, dass während der geplanten Lebensdauer der KBE-Lösungen keine grundlegenden Änderungen zu erwarten sind?	▲ 2	▲ 2	4	4	
A12		Sind mit dem vorhandenen CAD-System Releasewechsel geplant?	▼ 1	▼ 0	0	0	negative Frage!
A13	Ist die Konstruktionsaufgabe sehr einfach [VBD+12]?	▼ 1	▼ 0	0	0	negative Frage!	
A14	Sind im Unternehmen Software-Eigenentwicklung üblich?	▼ 1	▼ 0	0	0	negative Frage!	
A15	Ist der Konstruktionsprozess vornehmlich kreativ und innovativ [VBD+12]?	▲ 2	▼ 0	0	0	negative Frage!	
A16	Kann der Konstruktionsprozess vorhanden (oder wird es extern zugebracht) [VBD+12]?	▲ 2	▲ 2	4	4		
A17	Kann der Konstruktionsprozess eindeutig definiert werden [VBD+12]?	▲ 2	▲ 1	2	2		
A18	Herrscht im Unternehmen ständige Technologieänderung [VBD+12]?	▲ 2	▼ 0	0	0	negative Frage!	
			Teilergebnis:		28	von 56	
W1	Wissenserhalt	Ist das Wissen im Konstruktionsprozess sinnvoll für weitere Entwicklungen wiederverwendbar?	▲ 2	▲ 2	2	4	
W2		Soll das Wissen im Konstruktionsprozess über die Konstruktion hinaus aufbereitet werden?	▲ 2	▲ 2	4	4	
W3		Sind die Mitarbeiter willens, Wissen preiszugeben?	▲ 2	▲ 2	4	4	STOP-Kriterium
			Teilergebnis:		12	von 12	
Z1	(interdisziplinäre) Zusammenarbeit	Soll verteilte auf die Konstruktion zugegriffen werden [AMM08]?	▲ 2	▼ 1	2	2	
Z2		Sind mit der Konstruktion CAE-Analysen geplant, die viele Änderungen nach sich ziehen?	▲ 2	▲ 1	2	2	
Z3		Sind die Schnittstellen der Zusammenarbeit zu verbessern?	▼ 1	▲ 1	2	2	
Z4		Ist dem Kunden der Entwicklungsprozess zu dokumentieren/vorzuführen?	▲ 2	▲ 2	4	4	
			Teilergebnis:		10	von 16	

	Gewichtung rel. in der Kat.	gew. Bewertung	erreicht	max. gew.	max.	%
Notwendigkeit	1	8	8	40	20	20%
unternehmerischer Nutzen	1	10	10	32	16	31%
Effizienz	2	20	40	56	28	71%
Arbeitstechnik	2	28	56	112	56	50%
Wissenserhalt	2	12	24	24	12	100%
(interdisziplinäre) Zusammenarbeit	1	10	10	32	16	31%
Gesamtergebnis:			148	296	148	



Schritte

Konstruktionsart prüfen: obwohl in der Fragetabelle im folgenden Schritt implizit die Konstruktionsart erfasst wird, muss zu Beginn geprüft werden, in welchem Rahmen die KBE-Lösung zu erstellen ist. Quantitativ ist dies nicht bemessbar und muss wie jede KBE-Erstellung situationsangepasst erfolgen [VBD+12].

Bewertung KBE-Einsatz: Die Fragetabelle versucht Klarheit über die Entscheidung für und wider KBE zu schaffen. Wenn die Summe (Durchschnitt) der Ergebnisse der Kategorien größer als 50 % ist, kann von einem sinnvollen KBE-Einsatz ausgegangen werden. Eine Gewichtung ist in der jeweiligen Kategorie relativ zwischen den einzelnen Fragen/Themen mit 1 (unwichtig) und 2 (wichtig) zu vergeben, die Tabelle beinhaltet dazu Vorgabewerte.

Abschließend sind die Kategorien untereinander nochmals zu gewichten. In der Bewertung¹⁹⁷ bedeutet 0 nicht relevant und 2 sehr relevant. Die Bewertung kann beliebig verändert werden, der Hauptnutzen der Tabelle besteht in der prinzipiellen Behandlung mit Grundfragen des KBE. Die Bewertung ist subjektiv, im Idealfall von mehreren Befassten, auszuführen. Naturgemäß sind auch die verteilten Gewichte subjektiv; die Fragetabelle hilft aber, eine Tendenz zu identifizieren.

STOP-Kriterien: Da nach den Grunderkenntnissen des Wissensmanagement im Ingenieurwesen

[VDI 5610-1] einige Voraussetzungen gelten, sind diese nochmals hier als STOP-Kriterium angeführt. Bei Vorliegen nur einer fehlenden Voraussetzung daraus, ist der KBE-Lösung kein Erfolg wahrscheinlich.

Differenzierung KBx: Die Differenzierung in KBx grenzt den Verwendungszweck und den Umfang der KBx-Lösung ein und spezifiziert die umzusetzenden Hauptfunktionen. Die angegebenen Regelklassen mit den nötigen Daten und Informationen spannen einen Rahmen des einzusetzenden Wissens auf.

Erstellung der KBE-Lösung unter Verwendung MeW2: Der Ablauf einer KBE-Erstellung ist nach [VBD+12] immer situationsangepasst¹⁹⁸. Die Einbeziehung von MeW2 soll helfen, das erfasste Wissen über die Umsetzung der einzelnen KBx-Lösung hinaus verfügbar zu halten und den Entwicklungsprozess zu dokumentieren.

Hilfsmittel (Software)

KBx-Systeme selbst sind nicht automatisiert erstellbar. Methoden zum Entwerfen von KBE-Systemen sind von interdisziplinären Teams entwickelt worden¹⁹⁶. Dabei sind stets full-KBE-Lösungen adressiert, die im Bereich der Technischen Logistik die Ausnahme darstellen¹⁹⁹. Diese Methoden sind für den Einsatz im Bereich automotive/aerospace entworfen und nicht unangepasst auf die Technische Logistik zu transferieren.

Die xKBE-app, die Methode MeW2 in eine IT-Lösung umsetzt, ist ein Werkzeug zur Entwicklung und Dokumentation von Beziehungen in Konstruktionen, das Daten und Information zentral verfügbar hält. Sie unterstützt den Ansatz für KBE-fähige augmented CAD-Systeme²⁰⁰.

¹⁹⁷ Die Tabelle ist mit einer exemplarischen Bewertung vorausgefüllt um die Ergebnisdarstellung zu verdeutlichen.

¹⁹⁸ Die Richtlinien [VDI 5610-1] und v. a. [VDI 5610-2] sowie die in Kap. 6.13.2 angeführten KBE-Implementierungen liefern ein best-practice für die nicht u fixierende Vorgehensweise.

¹⁹⁹ Z.B. DC Design Suite [FOR14], Details dazu sind aus strategischen Gründen nicht publiziert

²⁰⁰ Hier ist KBE CAD-integriert und das CAD durch übergeordnete Berechnungs- und Verwaltungstools gesteuert.

Für die Beherrschung von komplexen Zusammenhängen verschachtelter Produktstrukturen existiert Software für Komplexitätsmanagement, die dem Konzept von xKBE-app ähnlich ist [TES14a]²⁰¹.

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Die Ausprägungen von KBx sind in unterschiedlichen Phasen des PEP einsetzbar. KBE ist bei der Variantenkonstruktion sinnvoll und im Ausarbeiten angesiedelt. KBSD ist der Anpassungs- und Variantenkonstruktion zuzuordnen und dementsprechend ab dem Entwerfen einsetzbar, wenn Lösungsprinzipien bekannt, deren konkrete Ausprägung aber noch offen ist. Insbesondere KBL ist einerseits ein Bindeglied zwischen der Realplanung von Logistiksystemen und der frühen Konstruktionsphase mit MeK1²⁰². In der Ausarbeitungsphase ist KBL ein Konfektionierungselement für Maschinen und Anlagen mit geringer Geometriedetailtiefe (s. auch Bild 2.30).

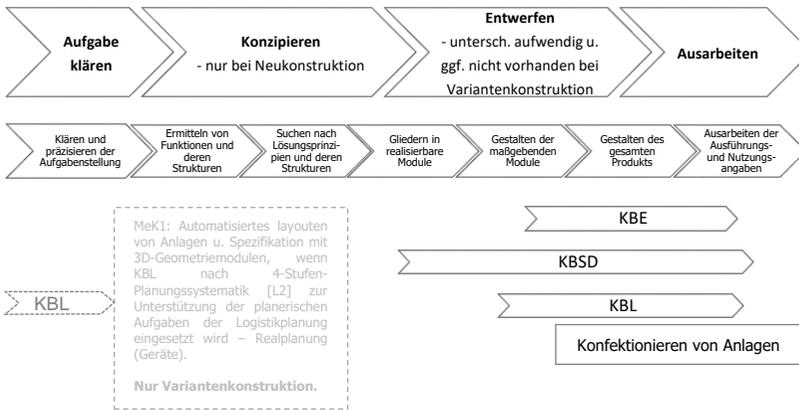


Bild 3.24: VDI-Konstruktionsphasen für KBx

²⁰¹ S. auch Kap. 6.12.2.3 und 6.12.2.5.

²⁰² Wenn mit 3D-Geometriemodulen die planerischen Aufgaben soweit unterstützt werden können, dass aus dem üblichen 2D-Layout bereits 3D-CAD-Baugruppen entstehen entsteht ein doppelter Nutzen. Der Planung liegen genauere Informationen über das verbaute Material vor, also sind die Kosten exakter ermittelbar. Der Konstruktion liegen zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt die Anforderungen und Randbedingungen des zu entwerfenden Systems vor; es kommt zu einem simultaneous engineering. Naturgemäß ist dieser KBL-Ansatz nicht für eine Neukonstruktion möglich, da die Lösungsprinzipien dann ja nicht bekannt sind, und somit keine 3D-Geometriemodule verfügbar sind.

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeK2 ist der Rahmen der Aktivitäten mit KBE. Die Methodische Entwicklung als solche sorgt für eine dokumentierte, nachvollziehbare Entwicklung von Konstruktionen. Nur so sind diese automatisierbar²⁰³.

Methodisches CAD, MeK4, ist eine unabdingbare Voraussetzung für KBx. Da KBx in der Domäne CAD angesiedelt ist, ist methodisches arbeiten (nach MeK4) Voraussetzung, um regenerierbare und stets neu parametrierbare Varianten einer Konstruktion zu erzeugen.

MeW2 stellt dem KBx ein Entwicklungs- und Dokumentationsszenario bereit, das die Arbeit mit KBx erleichtert. Dabei wird Wissen zentral erfassbar und der Entwicklungs- und Änderungsprozess dokumentierbar.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Aufwand für die Erstellung eines KBE-Systems ist in der Literatur und oben hinreichend differenziert betrachtet und ist von Anwendungsfall zu Anwendungsfall individuell zu beurteilen. Mit der Differenzierung in KBx und der Bewertungsliste kann der Aufwand/Nutzen einfach und fundiert abgeschätzt werden.

Wenn die Frage nach Unterstützung der KBx-Entwicklung durch das Management und die Mitarbeiter nicht positiv beantwortbar sind, ist trotz investiertem Aufwand in KBx kein Erfolg und Nutzen daraus möglich²⁰⁴.

Die Differenzierung des Einsatzes in KBx mit der vorgestellten Methode MeK5 bringt folgende Vorteile:

- Vermeidung einer Überautomatisierung der Aufgabe durch Differenzierung der zu automatisierenden Tätigkeiten nach Objektgröße und Einsatz.
- Neue Schnittstelle für das Zusammenwirken Konstruktion-Berechnung (CAD-CAE) mit dem KBSD und dadurch effizientere mechanische Dimensionierung der Objekte.
- KBL als Anknüpfung an wissensbasierte Planungsansätze, das eine maschinenbaulich-technische Sicht auf die Entwicklungsaufgabe im CAD stellt. Dadurch sind frühestmöglich Stücklisteninformationen verfügbar, die eine akkurate Preisberechnung ermöglichen.

Nachteile:

- Auch KBx ist von positiven Entscheidungen des Managements zugunsten Wissensmanagements, Bereitstellung von Budget und Ressourcen und der Preisgabe des Wissens der Mitarbeiter abhängig²⁰⁵. Bei Nichtvorhandensein einer der Voraussetzungen ist KBE erfolglos (vgl. STOP-Fragen im obigen Prozess).

²⁰³ „Die Konstruktionsmethodik ist ebenfalls unabdingbare Voraussetzung für eine flexible und durchgängige Rechnerunterstützung des Konstruktionsprozesses unter Nutzung rechnerinterner Produktmodelle. Ohne sie ist die Entwicklung wissensbasierter Programmsysteme, die rechnergesteuerte Konstruktion von Wirkkomplexen, die Anwendung von gespeicherten Daten und Methoden, die Verknüpfung von Einzelprogrammen, insbesondere von Geometriemodellierern mit Berechnungsprogrammen, sowie die Durchgängigkeit des Datenflusses und die Datenverknüpfung mit anderen Unternehmensbereichen (CIM, PDM) nicht möglich.“ [FEL13a]

²⁰⁴ Zufolge allgemeiner Erkenntnisse des Wissensmanagements im Ingenieurwesen [VDI 5610-1].

²⁰⁵ Wie dies für KBE und Wissensmanagement allgemein nach [VDI 5610-1] gilt.

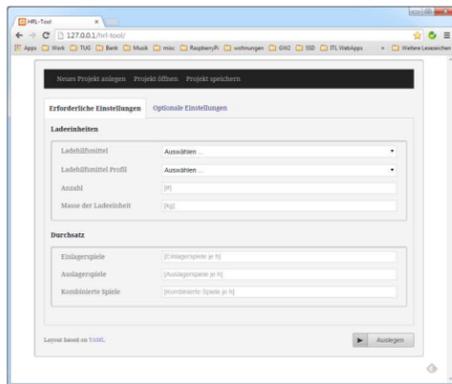
Neuheitsgrad

Die Neuheit von MeK5 liegt in der Projektion des Knowledge-based engineering auf die Technische Logistik. Mit den erstellten Prüffragen kann abgewogen werden, ob ein KBx-Einsatz sinnvoll erscheint. Die Zuordnung einzelner Arten des KBx zu Konstruktionsarten bzw. zum PEP gibt einen ersten Überblick über die Phasen des Einsatzes von KBx in der Produktentwicklung. Mit der vorgestellten Differenzierung „KBx“ kann ein effizienter Einsatz ermöglicht werden.

Beispiele

Durch den Einsatz von KBx konnten in den jeweiligen Domänen folgende Konstruktionsautomatisierungen vorgenommen werden:

- KBE (Komponenten und Baugruppen):
 - Vollautomatisierte Generierung einer Rundstahlkettennuss [MÜL12]
 - Vollautomatisierte Generierung einer Hubseiltrommel [P6]
- KBSD (Bereich Maschinen und Anlagen):
 - Antriebsdimensionierung eines Regalbediengerätes [P5]
 - Antriebsdimensionierung des Verteilförderers einer Kippschalensortieranlage (auch Anlagenlayouting mit KBL) [P11]²⁰⁶
- KBL (Bereich Anlagen):
 - Im Bereich Konfektionieren von Anlagen:
Automatisierte Lösung (HRL-Tool) zum Gestalten von Hochlagersystemen mit Regalbediengeräten aus lediglich materialflusstechnischen Grundgrößen (Kapazität, Durchsatz) [P4], [PIC12], s. Bild 3.25.
 - Im Bereich Automatisiertes Layouten und Spezifikation von Anlagen mit 3D-Geometriemodulen:
DC-Design-Suite von fortna [FOR14]
Layouting eines Kippschalen-Sorter-Loops [SCH16]



²⁰⁶ Siehe auch Kap. 4.3.2.

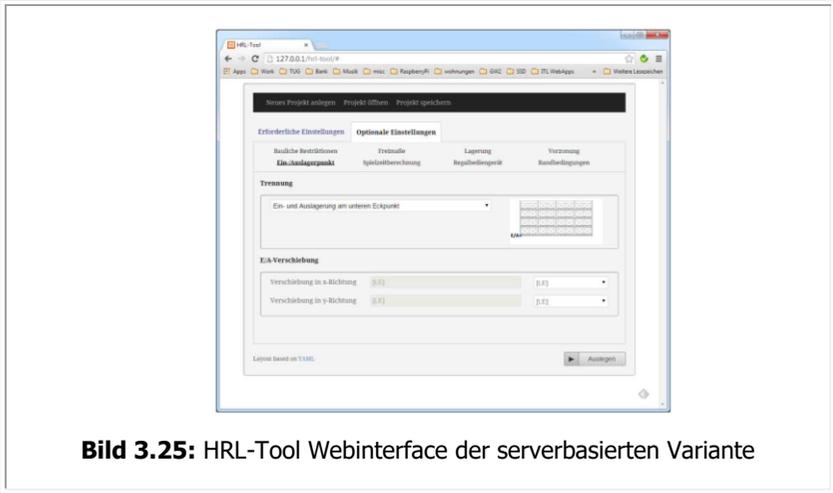


Bild 3.25: HRL-Tool Webinterface der serverbasierten Variante

Quellen

Weiterführende Arbeiten zu KBE und KBx im Umfeld der Technischen Logistik sind [JT12] mit Methoden für die Planung intralogistischer Anlagen mit KBx zu entnehmen. Die Arbeiten [POK06] und [GPS10] versuchen eine Erweiterung des KBE hin zur Konzeptionsphase und verfolgen so einen ähnlichen Ansatz wie MeK3. Grundlagen zu KBE sind den Werken [HDG+13] und [VWB+09] zu entnehmen.

3.5 Methodiken und Methoden die die Berechnung und Simulation unterstützen

3.5.1 MeB1: Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik – CAE

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Der Nutzen von Modellbildung und Simulation (CAE) und daraus eine mögliche virtuelle Produktentwicklung ist allgemein bekannt und anerkannt. Gegen den Einsatz von CAE sprechen vermeintlich hohe Anforderungen an Bediener, hohe Investitionskosten, schwierig zu bestimmende Einsatzszenarien und ein nahezu undurchdringlicher Dschungel an potenten Simulationslösungen (Bild 3.26).

Maßgebende CAE-Regelwerke sind zwar vorhanden, aber auf den allgemeinen Maschinenbau bezogen und daher nicht direkt auf das CAE in der Technischen Logistik übertragbar. [VDI 2209] gibt sehr allgemein zu den Simulationsmethoden und nicht zu den Software-Werkzeugen Auskunft. [VDI 2211] bietet Auswahlkriterien für Berechnungssoftware und stellt Berechnungs-methoden vor; mit den abschließenden Beispielen ist sie heute sicherlich das maßgebende Regelwerk. Die Fachliteratur beschäftigt sich größtenteils mit den (mathematischen) Grundlagen der Methoden oder mit klick-to-klick Anleitungen der Ausführung von Werkzeugen.

ANSYS 15.0 Capabilities Chart	ANSYS Product Solutions														
	ANSYS Multiphysics™	ANSYS Mechanical™	ANSYS Structural™	ANSYS Professional™ MS	ANSYS Professional™ MT	ANSYS DesignSpace™	ANSYS Explicit Solver™	ANSYS Autodyn™	ANSYS LS-DYNA™	ANSYS Fluent™	ANSYS CFX™	ANSYS CFD Postprocessor™	ANSYS PolyFlow™	ANSYS HFSS™	ANSYS Maxwell™
Structural Analysis															
Analysis Types															
Static	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Modal	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Buckling (linear)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Buckling (nonlinear)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Transient	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spectrum	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Harmonic	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Random vibration	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Substructuring	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Geometric Nonlinearity															
Large strain	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Large deflection	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Material Model Multiplicities															
Linear material models	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rate-dependent plasticity	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rate-independent plasticity	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hyperelasticity	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Viscoelasticity	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Creep	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Reaction materials															
Bonded/ins separation sliding	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Prevention (loosn, etc.)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Welds	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spall welds	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Nonlinear Contact Modeling															
Rough	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Frictionless	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Friction	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gaskets	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Advanced Analysis															
Rotordynamics	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Component mode synthesis	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Cyclic symmetry analysis	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Repeating	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Submodeling	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Element birth and death	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Bild 3.26: Portfolio von ANSYS [ANS14]

Dies führt zu unterschiedlichsten Herangehensweisen der Modellbildung und Simulation von Aufgaben des Berechnens technischer Bauteil und Baugruppen mit diversen Zielen. Oft endet einerseits eine „wissenschaftliche“ Herangehensweise in durchgängig selbst erstellten Codes und Modellen in höheren Programmiersprachen²⁰⁷, die nur vom Ersteller verwendbar sind. Andererseits bemühen sich Hersteller von Simulationswerkzeugen um eine „ingenieurtaugliche“ Modellbildung, Simulation und Analyse mit ihren Werkzeugen [ITI14] für ein breites Bedienerfeld.

²⁰⁷ Z.B. die Arbeiten [PIA09a], [PS09], [PS08], [PIA09b].

Die Methode MeB1 versucht im Feld der Technischen Logistik Methoden mit deren Prinzipien und zugehörigen Softwarewerkzeugen den Konstruktionsphasen zuzuordnen und Einsatzempfehlungen für ausgewählte Werkzeuge auszusprechen. Dies soll der Verbreitung und der Minderung einer Hemmschwelle sowie des effizienten Einsatzes des CAE dienen²⁰⁸.

Zielsetzung:

- Zusammenschau von Einsatzerkenntnissen zu CAE für die Technische Logistik
- Klarheit schaffen bzgl.:
 - Einsatzmöglichkeiten und Voraussetzung von CAE
 - der Eignung der Werkzeuge für die Objekte der Technischen Logistik (Komponenten, Baugruppen, Maschinen und Anlagen) und Aufgaben damit
- Überblick über kommerziell verfügbare ausgewählte Simulationswerkzeuge für technische Simulationsmodelle

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Eine Prüftabelle zur Anwendung von Berechnungsverfahren (vornehmlich CAE) bietet:

- Zusammenschau der Einsatzempfehlungen verschiedener Regelwerke von CAE
- Zuordnung des CAE-Einsatzes zu Konstruktionsphasen und den Objekten der Technischen Logistik (KBMA)
- Zuordnung ausgewählter Simulationswerkzeuge zu den Konstruktionsphasen und Prinzipien des CAE²⁰⁹
- Zuordnung von Simulationsmethoden zu Aufgabenstellungen und Themen der Technischen Logistik

Fokus zur Technischen Logistik

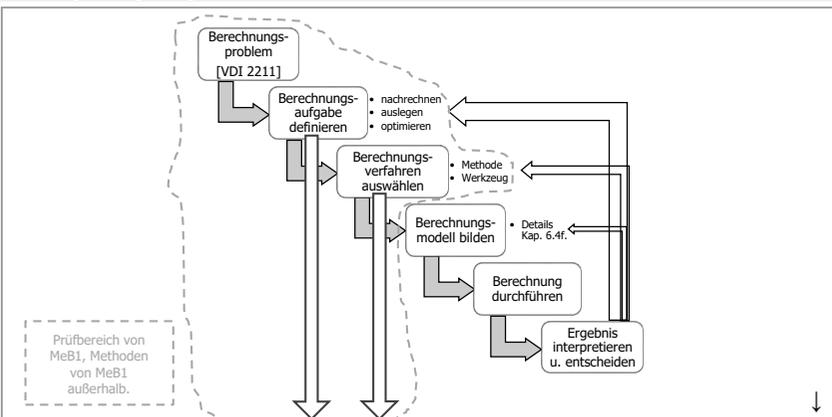
Die Tabelle in Bild 3.27 wurde im Kontext der Technischen Logistik entwickelt und ist somit nur in diesem Bereich einsetzbar. Ebenso sind die ausgewählten Simulationsmethoden (FEM, MKS und DEM) hier hauptsächlich geeignet. Andere Bereiche des Maschinenbaus können durchaus weitere Methoden benötigen.

²⁰⁸ Die Ausführungen beziehen sich auf die Wirkung der von MeB1 empfohlenen Methoden. MeB1 an sich bietet den Vorteil, für die Technische Logistik geeignete Simulationsmethoden schnell aufzufinden und einfach einzusetzen.

²⁰⁹ Aus den praktischen Erfahrungen: [P1], [P2], [P8], [P9], [P11], [P12], [LAN09].

Durchführung

Ablaufplan (Bild)



Vorgehen nach [VDI 2211]	Phase	Aufgabe klären	Konzeption		Entwurf	Ausarbeitung		
	Arbeitsschritt	1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien u. deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten u. Nutzungsangaben
Ergebnis		Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktkondokumentation
Konstruktionsart	Neukonstruktion							
	Anpassungskonstruktion							
	Variantenkonstruktion							
	Wiederholungskonstruktion							
CAE Einsatz nach:								
[VDI 2211]: als Analyse- u. Zielvorgabe				+		+	+	+ (nach MEK2)
[VDI 2211]: als integr. Methode f. Optimierung						o	o	o
[VDI 2211]: rechnerunterstützte Arbeitsmittel beim Entwerfen			Lösungsvarianten erzeugen (vorausberechnen)		Lösungsvarianten analysieren (nachrechnen)			
[VDI 2211]: Berechnung und CAE					Auslegung: Faustformeln, einf. Berechn.		Optimierung	Nachrechnung, wenn Konstruktion gelöst, u. Faustform. nimmer gültig
Einsatz CAE für:		Komponenten, Baugruppen, Maschinen, Anlagen						Anmerkung
Berechnung	Strukturmechanik		K, B		K, B		K, B	K.: Komponente, B.: Baugruppe, M.: Maschine
	Dynamik		B		B, M		B, M	
	Visualisierung (Dynamik)						B, M	Dem3D für A. 213
CAE-Methoden nach Zeitaufwand [VDI 2211]:								
Klasse	Beispiel	Produkt	in Konstr.prozess vermeiden - B-Methoden daraus entwickeln, Bewertung separat: <u>Hilfe durch MeB1</u>					
A-Akademisch	multidomän, nichtlinear,...	höhere Programmiersprachen, MS, programmiert erweiterte B-Systeme						
B-Brückenbauer	stand-alone Werkzeug	AD, RD, SX, AW, CS, LI, ED		o		o	+	nicht Element der stand. Ingenieurausbildung
C-Common	CAD-embeddend o. Faustformeln	CS, empirisch-analytische Berechnungsregelwerke	Konstrukteur erledigt selbst - wünschenswert! Faustformeln (Auslegungsschemen Fördertechnik), Bewertung inkludiert: <u>Hilfe durch MeB1</u>					
CAE-Methoden nach Prinzip und Produkt:								
	FEM		CS		CS, AW		AW	AD: ADAMS, RD-RecurDyn, SX: SimX, MS:
	MKS-AS		SX, MS		SX, MS		SX, MS	MATLAB/Simulink, AW:
	MKS		AD, RD		AD, RD		AD, RD	Ansys-Workbench, CS:Creo-Simulate, LI: LIGGGHTS, ED:EDDEM
	DEM		LI, ED		LI, ED		LI, ED	
CAE-Methoden nach Thema:								
nichtlineare Materialien beherrschen			(FEM)		FEM		FEM	MKS f. FEM: Bereitstellung dynamischer Lasten und Lastfälle für Lastfallkombinationen in FEM-Berechnungen
Betriebsfestigkeitsrechnung							MKS f. Betr.f.	
Schwingungen vermeiden			MKS				MKS (FEM)	
Leichtbau					(FEM)		FEM	
Funktion optimieren					MKS		MKS, FEM, DEM	
Sicherheit erhöhen							MKS f. FEM	
Schallentwicklung beherrschen							MKS f. FEM	

Bild 3.27: CAx in der Technischen Logistik – Prozess und Prüftabelle

Schritte

Aus einem allgemeinem Problemlösungszyklus heraus definiert [VDI 2211] eine Vorgehensweise für **Berechnungsprobleme**, die im Konstruktionsprozess mehr oder weniger vollständig durchlaufen wird. Aufbauend darauf versucht MeB1, dem Auswahlschritt des Berechnungsverfahrens Erfahrungserkenntnisse für die Berechnung in der Technischen Logistik zur Verfügung zu stellen (Bild 3.27).

Mit dem Berechnungsproblem stellt sich das **Definieren der Berechnungsaufgabe**. Sie kann nachrechnen, auslegen oder optimieren bedeuten²¹⁰. Dazu stehen unterschiedlichste Verfahren, von der einfachen händischen Rechnung mit den Methoden der Ingenieurausbildung bis zur aufwendigen Modellbildung und Simulation zur Verfügung (vgl. auch Bild 3.27 ABC-Methoden, welche Teil der Ingenieurausbildung sind).

Die **Auswahl des Berechnungsverfahrens** ist der komplexeste und folgenreichste Schritt im Prozess und wird zusätzlich zu [VDI 2211] in die Wahl der Methode und des CAE-Produkts untergliedert²¹¹. Bild 3.27 versucht Klarheit bezüglich des richtigen Zeitpunktes des Einsatzes von CAE in den Phasen der Konstruktion zu schaffen. Dafür ist der CAE-Einsatz nach unterschiedlichsten Regelwerken und Betrachtungsweisen vorgestellt²¹². Wenn die Domäne des CAE-Einsatzes für die Objekte der Technischen Logistik geklärt ist²¹³, folgt der Auswahlschritt hin zu den Methoden. Hier treten die C-Methoden in den Vordergrund, die heutzutage von jedem Konstrukteur einzusetzen sind und auch im Fachbereich weit verbreitet sind. Wenn diese nicht ausreichen, können Spezialisten für B- oder A-Methoden hinzugezogen werden. Eine erste Zuordnung der Softwarewerkzeuge erfolgt ebenfalls hier. Aus der Definition der Aufgabe kann dann das Prinzip bzw. die Methode der zu berechnenden physikalischen Effekte ausgewählt werden und ein Software-Werkzeug identifiziert werden. Wenn die Aufgabe zu Beginn nicht spezifisch genug ist, kann die letzte Ebene der Tabelle helfen, aus einigen gängigen Themen der Berechnung ein Prinzip bzw. eine Methode auszuwählen.

²¹⁰ Eine Definition dazu findet sich in Kap. 6.9.4 mit [EM13] und in [VDI 2211].

²¹¹ Ergänzend zur fachlichen Auswahl des Berechnungsverfahrens oben führt [VDI 2211] folgende, um eigene Aspekte (*) ergänzte, Kriterien an:

- Allgemeines – Ergebnis Anforderungsprofil:
 - Art der Berechnungsaufgabe klar definieren
 - Aussagegüte der Ergebnisse festlegen
 - Vorgehensweise zur Modellbildung entwickeln
 - Marktrecherche
- Betriebliche Bewertungskriterien
 - Qualifikationen der Mitarbeiter
 - Einsatzhäufigkeit
 - Implementierungsaufwand
 - Investition
- Entscheid ob Eigen- oder Fremdberechnung
- Technische Aspekte im Falle der Eigenberechnung (*)
 - Pflege und Wartbarkeit des Systems
 - Schnittstellen zu/von anderen CAE-Systemen
 - Integrationsgrad der vorhandenen Software-Produkte und DV-Konzepte prüfen [VDI2211]. Relevant v.a. im Geometriemodell-Workflow; neutrale oder proprietäre Formate möglich.
 - Automatisierbarkeit der Simulationslösung
 - Integration in vorhandene Datenbanksysteme der Dateiverwaltung (PDM/PLM, SDM).

²¹² Schwarze Gliederungsbalken in Bild 3.27 mit: CAE-Einsatz nach, Einsatz CAE für, CAE-Methoden nach Zeitaufwand [VDI 2211], CAE-Methoden nach Prinzip und Produkt, CAE-Methoden nach Thema.

²¹³ Berechnung Strukturmechanik/Dynamik bzw. Visualisierung.

Abhängig vom gewählten Prinzip, dessen Methode und dem zugehörigen Software-Werkzeug kann das **Modell gebildet** werden²¹⁴.

Mit dem **Durchführen der Berechnung** gelangt man zum **Interpretieren des Ergebnisses** und der Entscheidung, ob die Berechnung und von wo beginnend zu wiederholen ist - **Iteration**. Dazu gehören die Prozesse der Verifikation, Validierung und Optimierung²¹⁵. Diese setzt ein, wenn mit der Sensitivitätsanalyse ein „Gefühl für das Modell“ erarbeitet wurde und kann ingenieurlich-intuitiv oder nach strenger Herleitung erfolgen²¹⁶.

Hilfsmittel (Software)

Viele Werkzeuge ähneln einander stark. Im Bereich der CAD-embedded Simulationslösungen existieren bspw.:

- CS: Pro/ENGINEER (Mechanica und Mechanismus) bzw. Creo.Simulate [PTC11]
- SolidWorks (COSMOSWorks) [DAS06]
- NX (vormals UG: Nastran) [SIE05]
- CATIA (SIMULIA) [DAS14]
- SimDesigner (Structure, Motion) ausführen von SimXpert-Templates ([SIM16])

Unterteilt in die Prinzipien und Methoden der Werkzeuge sind das für stand-alone Lösungen im Speziellen²¹⁷:

- FEM:
 - AW: Ansys und Ansys Workbench Platform [ANS12]
- MKS-AS:
 - SX: SimulationX [ITI14]
 - MS: MATLAB/Simulink [BOD06]
- MKS:
 - AD: MSC.ADAMS [MSC10]
 - RD: RecurDyn [REC08]
- DEM:
 - ED: EDEM [DEM14]
 - LI: LIGGGHTS [CFD14]

²¹⁴ Details dazu in Kap. 6.4f. und [VDI 2211].

²¹⁵ S. Kap. 2.2.9 und 6.9.

²¹⁶ Kap. 2.3.5 in [VDI 2211] – hierzu zählen auch kommerziell verfügbare Optimierungssysteme.

²¹⁷ Abzugrenzen bleibt von reinen Visualisierungswerkzeugen wie bspw. DEMO3D [SIM11]. Diese können ebenfalls im CAE Prozess als geeignet identifiziert werden, sind aber nicht in der Lage, physikalische Zusammenhänge korrekt wiederzugeben sondern diese bestenfalls nur anzudeuten. Sie zählen daher definitionsgemäß (Kap. 2.2.5) nicht zu den technischen Simulationsmodellen.

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Die von MeB1 identifizierten Berechnungsmethoden sind zwar hauptsächlich den Schritte „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ zuzuordnen. Klarheit über den Einsatz einer CAE-Methode bzw. Modellbildung und Simulation sollte aber schon beim Klären der Aufgabe bestehen, um die nötigen Schritte ggf. frühzeitig einzuleiten.

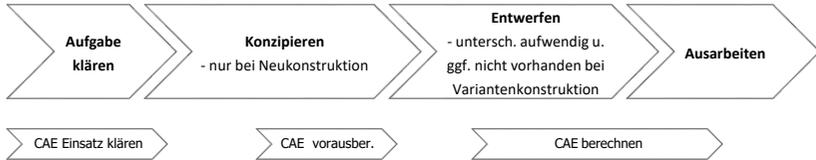


Bild 3.28: VDI-Konstruktionsphasen CAE

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

Die Methoden MeB3 und MeB2 sind eine direkte Folge auf Forderungen der [VDI 2211]. Während MeB2 versucht einfache analytische C-Methoden zu definieren oder zu verbessern, ist MeB3 ein Werkzeug, um aus A-Methoden einfacher und effizienter einsetzbare B-Methoden zu erstellen. Beide basieren auf MeB1.

Des weiteren ist MeB1 ein Teil des methodischen Konstruierens und somit mit MeK2 in Beziehung.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

MeB1 bezieht sich nicht direkt auf die Methoden des CAE sondern deren Einsatz. Der Aufwand, MeB1 einzusetzen ist gering. Aus dem Prüfprozess kann eine gute Übersicht über sinnvoll einzusetzende CAE-Methoden und –Werkzeuge gewonnen werden. Daher ist der Nutzen von MeB1 als hoch anzusehen, wenn die Entscheidung für oder wider CAE im Raum steht²¹⁸.

Neuheitsgrad

MeB1 versucht eine durch das Anwendungsgebiet „Technische Logistik“ gefilterten ersten und grundlegenden Blick auf das CAE. Mit der Zuordnung der Methoden und Werkzeuge zu den Konstruktionsphasen liegt eine neue Betrachtungsweise für das Fachgebiet vor.

²¹⁸ Der Nutzen, Aufwand sowie die Vor- und Nachteile von CAE an sich sind detailliert den einschlägigen Quellen zu entnehmen. Der Hauptvorteil liegt in der Virtualisierung der berechnerischen Tätigkeiten des Engineerings mit Qualitätsverbesserung, Verbreiterung der Berechnungsgültigkeiten, Bearbeitungszeitverkürzung gegenüber Versuchen und einer Wiederverwendung von (Teil)modellen. Nachteilig kann der Einarbeitungsaufwand und die nötige hohe fachliche Qualifikation der Bearbeiter gesehen werden. Ebenso stehen hohe Investitions- und laufende Kosten teils aufwendiger Softwareprodukte den Vorteilen gegenüber.

Beispiele

Beispiele, für den CAx-Einsatz, die auch die Abstufung in ABC-Methoden zeigen und den Objekten der Technischen Logistik (KBMA) zuzuordnen sind können wie folgt angegeben werden²¹⁹:

- C-Methoden:
 - M: Ableitung C-Methoden für Dynamik an einem Kettenzug [P14], [LAN09] aus B-Methoden
- B-Methoden:
 - Modellbibliothek „Technische Logistik“; [P7] Tabelle 1 in Kap. 2.2.8
 - M: Beherrschung des Verhaltens von Paketströmen [FWJ13]
 - M: Beherrschung von Resonanzphänomenen an einem Kettenzug [P1]
 - M: Beherrschung der Antriebsdynamik eines Karussellagers [P12]
 - B: Beherrschung Polygoneffekt an einem Kettenrad [P2]
 - B: Beherrschung der Dynamik von Isolatorsträngen an Freileitungen [LF10], [P8]
- A-Methoden:
 - M: Beherrschung des Einschleusens von Paketen auf Sortieranlagen [P11]
 - M: Beherrschung der Dynamik von Paketströmen [PIA09a], [PS08]
 - M: Beherrschung der Dynamik an Regallagern und Regalbediengeräten [HÜB10]
 - M: Dynamische Wirkungen auf Bediener an Flurförderzeugen [FF10]
 - K: Beherrschung der Dynamik von frei schwingenden Seilen [P9]

Quellen

CAE: [MEY07], [STE04a], [VDI 2221], [VDI 2209].

Grundlagen FEM: [BAT02], [KLE05], [KRE12], [SCH11], [STE04b], [VWB+09] und [SCH05].

Grundlagen DEM: [MUN04].

Grundlagen MKS: [DH06], [VWB+09], [MSC10], [WS89], [SCH90], [DAN05].

Anwendungen von MKS in der Technischen Logistik: [P1], [P2], [P5], [P8], [P11], [P12], [C42], [FWJ13], [CRR13], [CRR+14], [LAN09], [GK06], [KAT08].

²¹⁹ Beispiele für die Modellbildung und Simulation mit technischen Simulationsmodellen zeigt Kapitel 6.8 mit Grundlagen und einer Modellbibliothek von Grundprinzipien und Submodellen für die Technische Logistik.

3.5.2 MeB2: Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und -gültigkeiten durch CAE

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

„Konstrukteure sollen selbst berechnen!“ [VDI 2211]. Je nach Größe der Konstruktionsabteilung und Struktur des Engineerings können vorhandene Berechnungsexperten hinzugezogen werden, aber auch Berechnungen extern vergeben werden; dies ist immer mit einem zeitlichen und finanziellen Mehraufwand verbunden.

Für viele Berechnungsaufgaben der Fördertechnik und Technischen Logistik existieren Berechnungsregelwerke, die analytisch in vorgegebenen Grenzen und Rahmenbedingungen Nachrechnungen und Auslegungsrechnungen ermöglichen. Wenn jedoch Ziele verfolgt werden, wie Schwingungsreduktion, Leichtbau, Schallemissionen beherrschen, oder der Umgang mit nichtlinearen Materialien, wird die Gültigkeit dieser Regelwerke überschritten und es kann mit CAE verfahren werden (MeB1 bietet dafür Auswahlhilfe). Die Methoden und Werkzeuge des CAE gehören (nach [VDI 2211] – Klassifizierung) allerdings zu den B- bzw. A-Methoden, die „nicht ohne weiteres“ einsetzbar sind.

Die im Fachbereich verbreiteten Normen und Regelwerke gehören zu den C-Methoden, die nicht nur einfach anwendbar sind, sondern schon größtenteils eine Bewertung integrieren (Übersicht im Abschnitt „Quellen“ der MeB2). Mit der Methode MeB2 sollen Wege gezeigt werden, um aus CAE-Erkenntnissen einfach zu bedienende C-Methoden abzuleiten, die dem Konstrukteur in der täglichen Arbeit dienen können. Einerseits sind diese für die o.a. Ziele nicht immer verfügbar und andererseits kann und muss die Gültigkeit vorhandener C-Methoden verbreitert werden. Statistischen Grundlagen und die geeigneten Methoden werden hier qualitativ gelistet und sind nicht Gegenstand der Methode, da sie von Fall zu Fall unterschiedlich einzusetzen sind.

Zielsetzung:

- Ableitung von neuen C-Methoden (Faustformeln, analytische Berechnungsregelwerke) aus Erkenntnissen von CAE
- Verbreiterung der Gültigkeit vorhandener Faustformeln und analytischer Berechnungsregelwerke

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

MeB2 zeigt Verfahren auf, wie aus CAE-Modellen analytische Berechnungsregelwerke für unabhängige Grundgrößen abgeleitet werden können.

- Durch Modellbildung und Simulation einer Problemstellung (mit MeB1) wird ein virtuelles Experimentierfeld für Design of Experiments (DoE) geschaffen [SBH10].
- Das CAE stellt den Modell- und Lösungsraum der Regression dar.

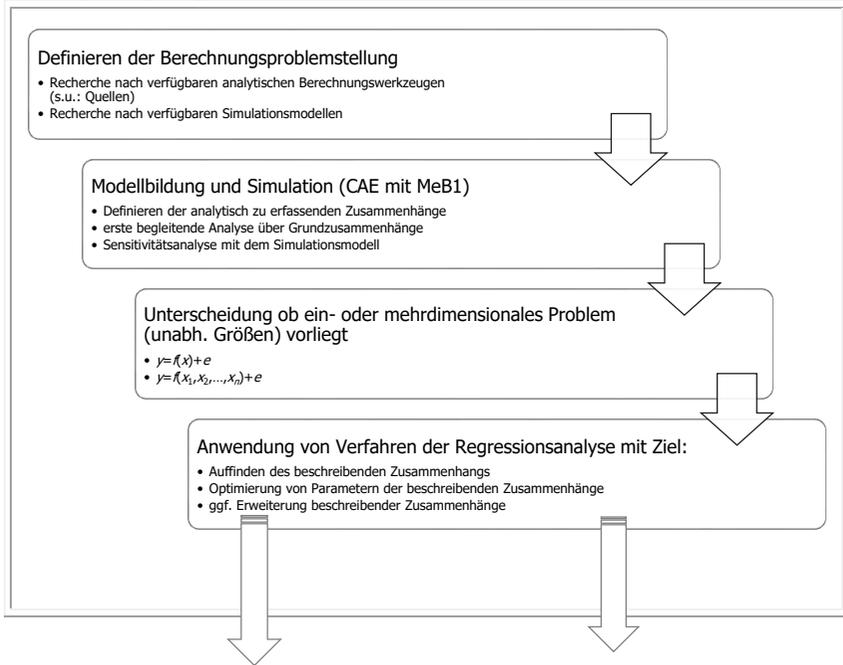
- Die Ergebnisse des Simulationsmodells sind Sensitivitätsanalysen zu führbar, wodurch funktionale Zusammenhänge zwischen den Grundgrößen (mit den beschreibenden Parametern) abgeleitet werden können.
- Mit unterschiedlichen Herangehensweisen (s.u.) kann aus einem vorliegenden Lösungsfeld auf beschreibende Zusammenhänge geschlossen werden (Regressionsanalyse und Verfahren der Statistik).

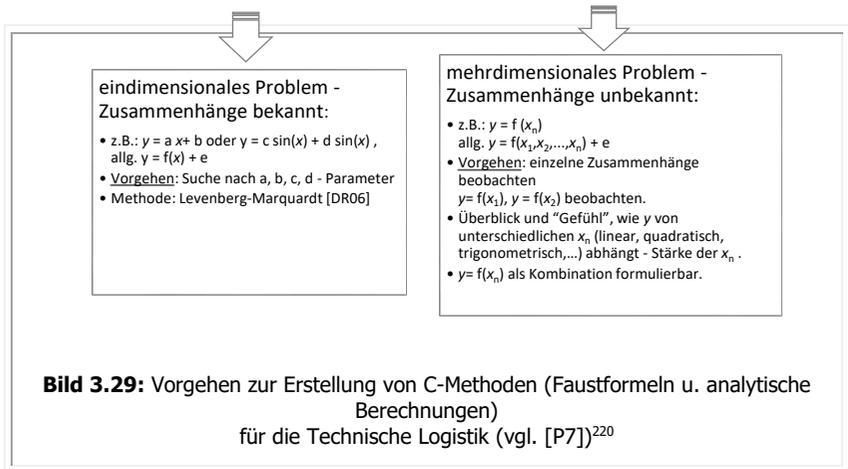
Fokus zur Technischen Logistik

Da die analytischen Berechnungsschemen (C-Methoden) im Fachbereich verbreitet und akzeptiert sind, ist die Erstellung bzw. Verbesserung davon hier sinnvoll. Andere Branchen mit stärkerer CAE-Durchdringung können eher zu MeB3 tendieren, die gesteuerte Simulationen vorschlägt.

Durchführung

Ablaufplan (Bild)





Schritte²²¹

Definieren der Problemstellung. Zu spezifizieren ist, welche Aussage in Abhängigkeit welcher Einflüsse zu treffen ist. Dies kann verbal oder non-verbal mit ersten einfachen Grundzusammenhängen erfolgen.

Modellbildung und Simulation. Das CAE-Modell dient mit seinen Sensitivitäten, die die Einflüsse der Aufgabendefinition abbilden müssen, als Modell- und Lösungsraum für die folgenden Regressionsanalysen. Je nach Umfang der zu entwickelnden C-Methode ist der Modellgültigkeitsbereich festzulegen.

Unterscheidung ein- oder mehrdimensionales Problem. Durch Analysen des Modells und seiner Sensitivitäten kann für den zu analysierenden Zusammenhang schrittweise identifiziert werden, ob ein ein- oder mehrdimensionales Problem vorliegt. Dazu müssen, im Rahmen eines durch induktive Modellbildung erstellten Modells²²², stufenweise physikalische Effekte an- und abgeschaltet werden bzw. Parameter des Modells verändert werden.

Anwendung von Verfahren der Regressionsanalyse. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen und Daten werden die beschreibenden Zusammenhänge $y = f(x) + e$ bzw. $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ schrittweise identifiziert.

Gültigkeit. Voraussetzung für die Anwendung obigen Schemas ist die Unabhängigkeit der einzelnen x_1, x_2, \dots, x_n ²²³.

²²⁰ Levenberg-Marquardt z.B. in PTC.MathCAD® als "genfit" verfügbar (kleinste Quadrate). Regressionsanalyse z.B. mittels "einfacher Regressionsanalyse" auch in Microsoft EXCEL® verfügbar; s. Abschnitt „Hilfsmittel (Software)“.

²²¹ MeB2 stellt bewusst eine einfache und niederschwellige Herangehensweise der Regressionsanalyse und Extraktion von einfachen Zusammenhänge in analytischer Form von implizit (in einem CAE-Modell) bzw. transzendent vorliegenden Zusammenhängen (komplexe Analytik) vor. Für die Durchführung der nötigen CAE-Simulationen sei auch auf die statistische Versuchsplanung und das DoE mit zugehöriger Fachliteratur verwiesen (z.B. SBH10).

Für komplexere Zusammenhänge und die einzelnen Verfahren der Regressionsanalyse sei auf die Grundlagen der Statistik verwiesen.

²²² S. Kap. 2.2.4 und [D05].

²²³ Ist die Unabhängigkeit der einzelnen x_1, x_2, \dots, x_n nicht gegeben sind Methoden der statistischen Versuchsplanung (DoE) anzuwenden, um Einflüsse der einzelnen Größen untereinander aufzuzeigen [SBH10]. Softwareprodukte sind verfügbar, die beispielsweise Effektdiagramme ableiten. Neuronale

Hilfsmittel (Software)

Die Software-Werkzeuge für die Modellerstellung sind MeB1 zu entnehmen. IT-Werkzeuge für Regressionsanalysen sind:

- Microsoft.EXCEL® (Trendlinie in Graphen) [MIX14]
- PTC.MathCAD® (bspw. der Befehl "genfit" mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus) [PTC14]
- Höherwertige Statistiksoftware wie bspw. SPSS [IBM14]

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

MeB2 ist im Berechnen den Schritten „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ entsprechend des CAE-Einsatzes zuzuordnen. Dementsprechend deckt sich der Einsatzbereich mit jenem von MeB1.

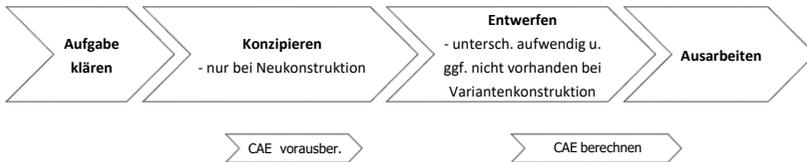


Bild 3.30: VDI-Konstruktionsphasen des CAE und MeB2

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeB2 benötigt die Modellbildung und Simulation mit MeB1 und ist als solche ein Teil des methodischen Konstruierens mit MeK2 (s. auch Bild 3.27).

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Nutzen der Verwendung von C-Methoden gegenüber den aufwendigeren A- und B-Methoden liegt in der breiten und einfachen Verwendbarkeit direkt im Konstruktionsprozess durch die Konstrukteure. Dieser Nutzen kann mit MeB2 erzeugt werden.

Der Aufwand für die Erstellung von CAE-Modellen und die anschließenden Regressionsverfahren ist erheblich. Daher ist zu prüfen, wie oft eine zu erzeugende C-Methode einzusetzen ist. Das Vorhaben mit MeB2 ist eher Gegenstand von Forschungs- und Grundlagenarbeiten als der täglichen Arbeit im Konstruktionsprozess.

Vorteilhaft kann im Vorliegen von verbesserten oder neuen C-Methoden die Verbesserung der Berechnungs- und damit Produktqualität gesehen werden.

Netze sind ein probates Mittel zur Unterstützung von Sensitivitätsanalysen im Rahmen der virtuellen Versuche.

Nachteilig ist der Zeitaufwand für die Erstellung und die eingeschränkte Gültigkeit der abgeleiteten C-Methoden gegenüber den CAE-Modellen anzuführen.

Neuheitsgrad

Eine Neuheit ist nicht primär der Einsatz der Regressionsanalyse zur Ableitung von funktionalen Zusammenhängen, sondern die Anwendung dafür zur Erstellung von C-Methoden mit CAE-Modellen als Datenbasis für die Technische Logistik.

Beispiele

Berechnungsbeispiel Dynamik an einem Unstetigförderer – Rundstahlkettenzug²²⁴:

Ein eindimensionales Problem stellt die Beschreibung des Zusammenwirkens von Rundstahlkette und Kettennuss dar. Die gesuchte geometrische Beschreibung ist eine trigonometrische Funktion und stellt die Grundgleichung des Phänomens „Polygoneffekt“ dar. Dafür ist in [P2] das Verfahren mit MeB2 und das Ergebnis dafür dargestellt.

Ein mehrdimensionales Problem stellt die Beschreibung von Resonanzphänomen dar, die beim Betrieb eines Rundstahl-Kettenzuges durch den Polygoneffekt hervorgerufen werden. Die Längen der Ketten und die Kraftüberhöhungen sind von den Kettendimensionen, der Hubgeschwindigkeit, der Hubmasse, den mechanischen Eigenschaften der Kette und des Tragwerks und der installierten Leistung abhängig. [LAN09] und [P1], [LAN04] beschreiben das Vorgehen, das Modell, die Gültigkeit und die erarbeiteten C-Methoden für dieses Dynamik-Phänomen (s. Bild 3.31).

[P14] zeigt den sehr eingeschränkten Gültigkeitsbereich der die Kette dimensionieren den Norm auf [DIN 818-7]. Es wird eine C-Methode vorgestellt um die Gültigkeit der in der Norm verwendeten dynamischen Kraftgrößen zu verbessern.

²²⁴ MeB2 kommt in keinem der synoptischen Beispiele von Kap. 4 zum Einsatz. Folglich sei auf das angeführte Beispiel „Rundstahlkettenzug“ und die hier angegebenen Publikationen verwiesen, die diese Methode aufgreifen (Bild 3.31).

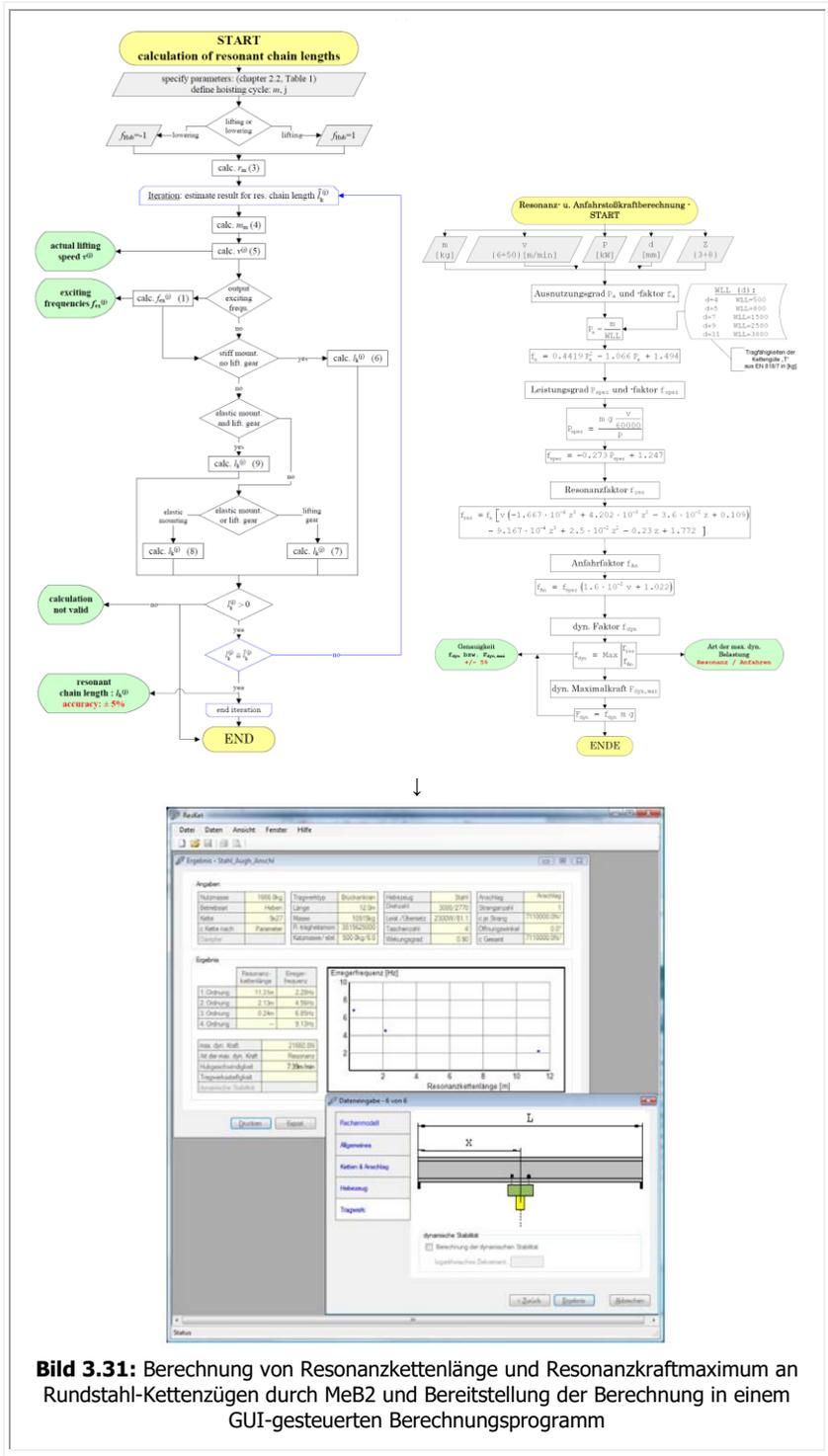


Bild 3.31: Berechnung von Resonanzkettenlänge und Resonanzkraftmaximum an Rundstahl-Kettenzügen durch MeB2 und Bereitstellung der Berechnung in einem GUI-gesteuerten Berechnungsprogramm

Quellen

Berechnungsregelwerke einiger logistischer Gewerke der Stückgut-Stetigförderertechnik:

- Bandförderer: [VDI 4440-1], [DIN 15207], [DIN 15209], [DIN 15210], [DIN 22101], [DIN 22107], [ÖNO 9722], [ÖNO 9723], [ÖNO 9724], [ÖNO 9725], [ÖNO 9726], [ÖNO 9751], [VDI 2322], [VDI 2341], [VDI 3602-1], [VDI 3602-2], [VDI 3603], [VDI 3605], [VDI 3606], [VDI 3608], [FEM 2.124]
- Gliederbandförderer: [VDI 4440-2], [DIN 22200], [ÖNO 9727], [FEM 2.521]
- Rollenbahn: [VDI 4440-3], [VDI 2346]
- Kreisförderer: [VDI 2328], [VDI 4440-5]
- Tragkettenförderer: [VDI 4440-2]

Fachliteratur für Berechnung in der Fördertechnik: [HKS04], [HNS07], [MRW08], [KPS75], [SCH87], [PKK88], [PKP79], [SDK65]

3.5.3 MeB3: template-driven Simulationslösungen

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Für viele Berechnungsaufgaben der Technischen Logistik existieren C-Methoden (einfache Faustformeln die meist auch schon eine Bewertung miteinschließen [VDI 2211]). Diese können als Normen oder Fachliteratur vorliegen (s. Quellen der MeB2) und unterschiedlichst erzeugt worden sein; z.B. aus empirischer Herangehensweise unterstützt durch MeB2.

Oft genügen aber C-Methoden zur Berechnung komplexer Zusammenhänge nicht mehr und die Problemstellung ist nur mehr durch Modellbildung und Simulation beherrschbar. Des Weiteren können auch Vorgänge zu visualisieren sein, was mit C-Methoden gänzlich unmöglich ist. MeB1 stellt dazu Vorgehensweisen bereit, der Einsatz und Nutzen von Modellbildung und Simulation verursacht aber nicht nur einen anfänglichen Invest und die Wartung des Software-Werkzeugs, sondern bedarf auch der laufenden Qualifizierung der Bediener.

Während mit MeB2 C-Methoden für die Berechnung erstellt werden können, zeigt MeB3 Wege auf, um nicht simulations-geschulten Berechnern und v.a. Konstrukteuren Modellbildung und Simulation zugänglich zu machen. Dafür werden sog. „guided-simulation“ Ansätze sowie simulation-templates mit abgegrenzten Eingriffsmöglichkeiten von Experten für Anwender erstellt; man spricht von template-driven simulation.

Zielsetzung:

- Simulationsmethoden für nicht simulationsgeschulte Konstrukteure und Berechner sicher verwendbar machen. Dadurch Zugang zu modernen CAE-Ansätzen ermöglichen und A- und B-Methoden ohne großes Simulationswissen verfügbar machen („quasi C-Methoden“ schaffen).
- Einfache Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen ohne Einarbeitungsaufwand schaffen.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

- Führung des Anwenders durch komplexe Simulationen.
- Beschränkung der Veränderungs-, Eingriffs-, und Berichtsmöglichkeiten des Anwenders in Modellbildung und Simulationslösung durch Experten
- Beherrschung der Berechnung durch (fremd- oder eigenerstellte) abgegrenzte Simulationslösungen.
- Implementation der erstellten Berechnungslösung durch Experten.

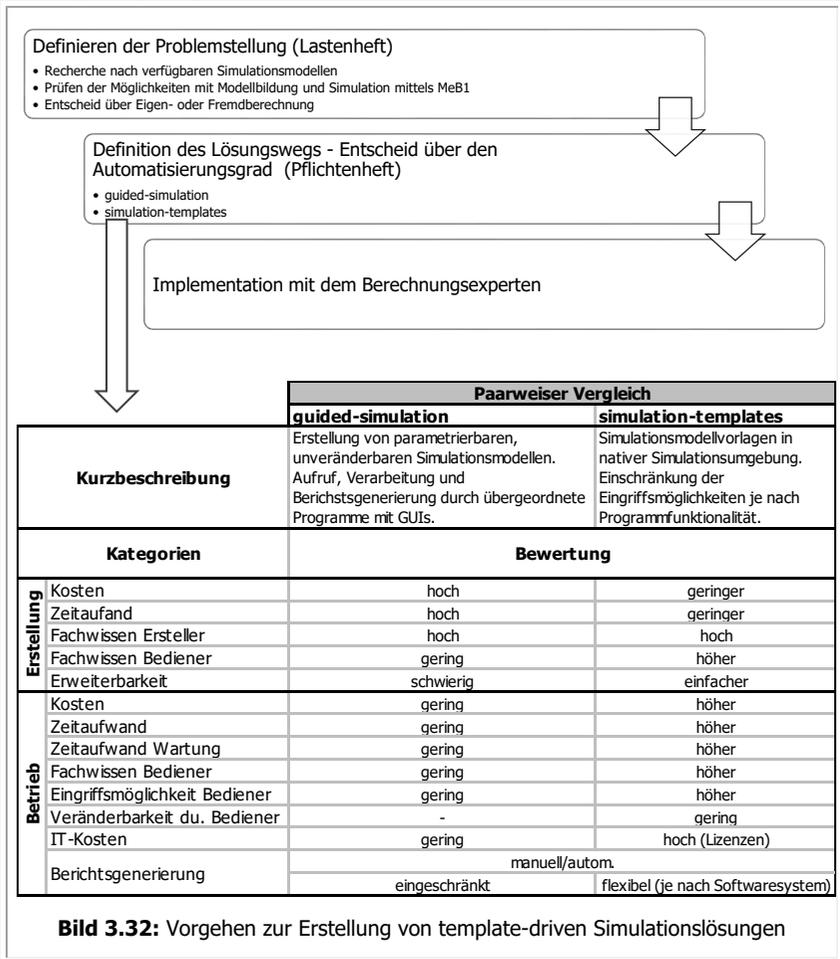
Fokus zur Technischen Logistik

Wie MeB2 basiert auch MeB3 auf der Erkenntnis, dass in den Berechnungsabteilungen der Technischen Logistik vornehmlich Generalisten anstelle von Spezialisten anzutreffen sind (s. Kap. 2.3). Nach [VDI 2211] soll aber die Berechnung vom

Konstrukteur ausgeführt werden, wozu MeB2 und MeB3 einen Ansatz unterschiedlicher Berechnungskomplexität bieten. Natürlich ist die Vorgehensweise MeB3 auch auf andere Branchen übertragbar und dort anzutreffen²²⁵.

Durchführung

Ablaufplan (Bild)



Schritte

Definieren der Problemstellung. Mit der Problemstellung muss das Software-Werkzeug, oder mehrere verschiedene im Falle multidomänaler Simulation, spezifiziert werden, die in der Lage ist, das Problem zu lösen. Dazu ist MeB1 dienlich. Wenn eigene

²²⁵ V.a. Berechnungsspezialisten arbeiten mit automatisierten, makro-gesteuerten Simulationsmodellen auf Kommandozeilen- und Codebasis anstelle der grafischen Eingabemasken. Diese Vorgehensweise ähnelt jener von MeB3 und ist v.a. im automotive anzutreffen [MSC12].

Modellbildungs- und Simulationskapazität vorhanden ist, kann die template-driven Simulationslösung im Hause erstellt werden. Ansonsten ist externe Vergabe nötig. Allenfalls bedarf es einer taxativen Formulierung des Lastenheftes.

Definition des Lösungswegs. Je nach Anwenderzielgruppe ist die „guided-simulation“ besser als die „simulation-templates“ geeignet, je nach Fachwissen des zukünftigen Bedieners. Mit obiger Tabelle kann zwischen den Vorgehensweisen differenziert werden²²⁶.

Implementation mit dem Berechnungsexperten. Essentiell ist die anfängliche und laufende Unterstützung des berechnenden Konstrukteurs durch den Simulationsexperten, um Fehlbedienungen des Systems auszuschließen.

Hilfsmittel (Software)

SimulationX [ITI14]: Code-Export, Analyzer Version, Templates.
 Ansys [ANS12]: Templates, Code-Export, in der Workflow-Technology mit der Workbench-Plattform
 ADAMS [MSC10]: scripted Simulation, u.a. SimManager
 Co-Simulation allgemein: z.B. FMI-Schnittstellen [FMI14] oder s-Function-Import/Export [BOD06].

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

MeB3 ist wie MeB2 im Berechnen den Schritten „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ entsprechend des CAE-Einsatzes zuzuordnen. Dementsprechend deckt sich der Einsatzbereich auch mit jenem von MeB1 bzw. MeB2.

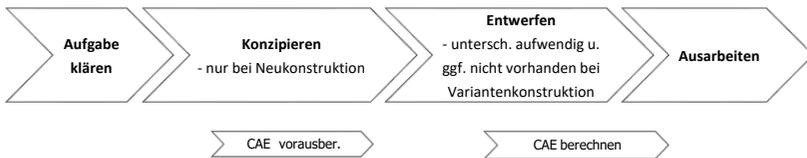


Bild 3.33: VDI-Konstruktionsphasen und MeB3

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

MeB3 benötigt die Modellbildung und Simulation mit MeB1 und ist als solche ein Teil des methodischen Konstruierens MeK2 (s. auch Bild 3.33).

²²⁶ Die guided-Simulation wird mittlerweile von vielen Software-Herstellern nativ angeboten. Schlagwörter dazu sind Workflow-Management, Simulationsprozessmanagement, Analyzer-Version. Siehe dazu auch die Softwareprodukte bei den Quellenangaben unter „Hilfsmittel“. Der Funktionsumfang kann sich geringfügig aber nicht prinzipiell vom o.a. unterscheiden.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Der Nutzen von mit MeB3 erstellten Berechnungsmethoden besteht in deren effizientem Einsatz und der Sicherung von Berechnungsqualität. Die Vermeidung von Modellbildungsfehlern und Fehlern in der Durchführung der Simulationen ist mit der „Führung“ durch definierte Prozesse von Experten vorteilig. Auch nach Wiederaufnahme eines Berechnungsverfahrens ist der Prozess aufgrund der Bedienerführung rasch und sicher beherrschbar. Vorteilig ist weiters, dass kein (teures) Simulations-Know-how nötig ist. Es kann eine höhere Berechnungsqualität als mit klassischen C-Methoden (Faustformeln) bei geringem Durchführungsaufwand erreicht werden.

Die Erstellung von template-driven Simulationen ist allerdings teuer und aufwendig. Deren Einsatz ist sorgfältig bzgl. der Wiederverwendung zu prüfen. Die Lösungen sind teilweise starr und nicht beliebig erweiterbar.

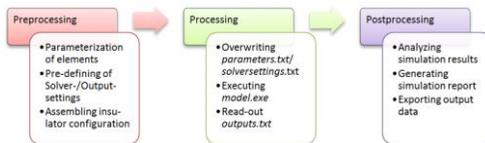
Neuheitsgrad

Der Einsatz von simulation-templates ist in z.B. automotive schon umgesetzt und die Software-Hersteller bieten die o.a. Hilfsmittel dafür an. Im Bereich der Technischen Logistik konnten bislang keine derartigen Ansätze beobachtet werden, woraus sich eine Neuerung v.a. in der prädestinierten Variante guided-simulation der template-driven Simulationslösungen ableiten lässt.

Beispiele

Beispiel guided-simulation einer Freileitungs-Seilschwingung:

Die dynamischen Kräfte nach Bruch eines von zweier Isolatorstränge einer Hochspannungsfreileitung wurde mittels guided-simulation für einen Endkunden erarbeitet [P8], [FL12], [FL11] und [LF10]. Mit einem intuitiven und graphisch unterstützten Preprocessing mittels GUIs (s. Bild 3.34) werden code-exportierte Modelle parametrisiert, aufgerufen und berechnet. Im Postprocessing stehen standardisierte Ausgaben ausgewählter Größen wie bspw. Seilkräfte graphisch und numerisch zur Verfügung.



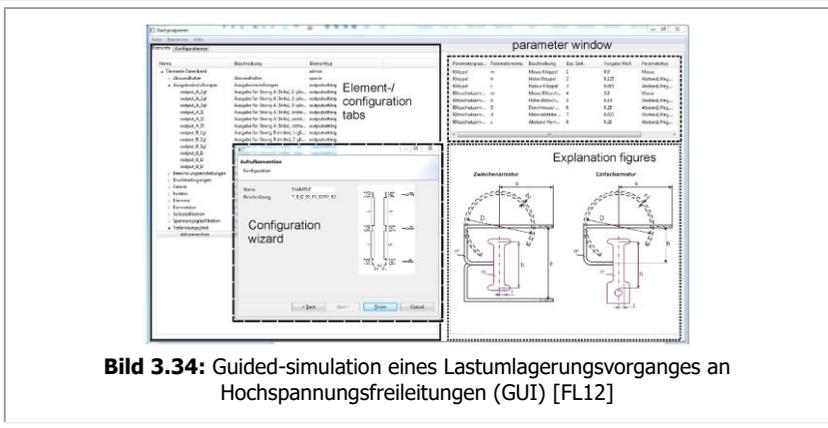


Bild 3.34: Guided-simulation eines Lastumlagerungsvorganges an Hochspannungsfreileitungen (GUI) [FL12]

Quellen

Quellen der Methode sind die Prozesse und Möglichkeiten mit den Software-Werkzeugen. S. „Hilfsmittel“.

3.6 Methodiken für den Umgang mit Wissen

3.6.1 MeW1: Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Im Konstruktions- und Entwicklungsprozess ist einerseits, wie in jeder (kreativen) Tätigkeit, der Einsatz von Wissen nötig, andererseits entsteht dabei neues Wissen, das zur Effizienzsteigerung wiedernutzbar gemacht werden muss. Für diese Aufgaben liegt explizites Wissen (Informationen, Daten) in Form von Büchern, aber vor allem in Richtlinien- und Normen-Form (v.a. in empirischen Berechnungen) vor. Alleine dieses Wissen jedem damit befassten zur Verfügung zu stellen, stellt eine große Herausforderung dar, die durch IT-Systeme unterstützt heutzutage besser denn je bewältigbar ist. Das implizite Wissen, das die eigentliche Erfahrung aller Befassten darstellt, ist der Schlüssel zum Gelingen der Aufgabe. Es ist aber aufgrund seiner Natur den Wissensinhabern weder voll bewusst noch ist es einfach artikuliert- und formulierbar [HDG+13]. Nach [FEL13a] ist der zeitliche Anteil und die Häufigkeit der konventionellen Informationsbeschaffung am Konstruktionsprozess recht hoch. So hat die Datenbereitstellung eine große Bedeutung für die Rationalisierung des Konstruktionsprozesses und für den Abbau von Störeffekten beim Konstruieren.

Wie in jeder maschinenbaulichen Branche, stellt sich die Aufgabe der effizienten Informations-, Daten- und Wissensbeschaffung auch für die Technische Logistik. Einige Besonderheiten sind für die Branche anzuführen. Viele Klein- und Mittelbetriebe verfügen über nur wenig verzweigte Strukturen im Engineering und Aufgaben bündeln sich in einzelnen Personen. Übergeordnete Strukturen, wie von großen Entwicklern bekannt, mit eigenen Knowledge Engineers sind daher nicht anzutreffen. In größeren Betrieben der Branche kommt es aufgrund von Karrieremodellen oder persönlichen Zielen, wie in anderen Branchen auch, zu häufigem Wechseln der Positionen, was zu „fluktuierenden Teams“ führt. Des weiteren ist Entwicklungswissen aufgrund der Auftragsart in der Branche oft in Projekten gespeichert und es fehlt daher eine Querschnittsicht über ggf. parallele Entwicklungen.

Als Herausforderungen stellen sich daher die Sicherung und Bewahrung, die effiziente Bereitstellung und die Erzeugung von neuem Wissen²²⁷.

Zielsetzung:

- Entscheiden können, ob einfache Formen des Wissensmanagements (KM) für dessen Grundaufgaben bzw. Aktivitäten (Wissen erzeugen, speichern, verteilen und anwenden) eingesetzt werden sollen.

²²⁷ VDI 5610 [VDI 5610-1] liefert weitere Gründe und Ziele für das Wissensmanagement, die im Prüfprozess unten herangezogen werden. MeW1 bietet für Wissensmanagement einfache, pragmatische Ansätze, deren Sinnhaftigkeit am erzielten Erfolg rasch messbar ist. Diese Ansätze bzw. Methoden und Hilfsmittel sind nach Umfang und Funktionsweise differenziert und dem Konstruktionsprozess zugeordnet. Für viele davon ist auch eine Verwendung in den organisatorischen Aufgaben der Technischen Logistik, wie beispielsweise der Layout-Planung denkbar.

- Entscheiden können, welche Methode des Wissensmanagements in einer Konstruktionsaufgabe zu welcher Phase für welche Wissensaufgabe eingesetzt werden soll.
- Überblick über prinzipielle Funktionen und Inhalte einzelner Methoden zu erhalten.

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Die Ziele werden erreicht durch²²⁸:

- Bereitstellung einzelner, bewährter und einfacher ggf. IT-basierter und papiergebundener Methoden bzw. Hilfsmittel für Aufgaben des Wissensmanagements
- Zuordnung der Methoden zu Konstruktionsphasen und zu Aktivitäten des Wissensmanagements

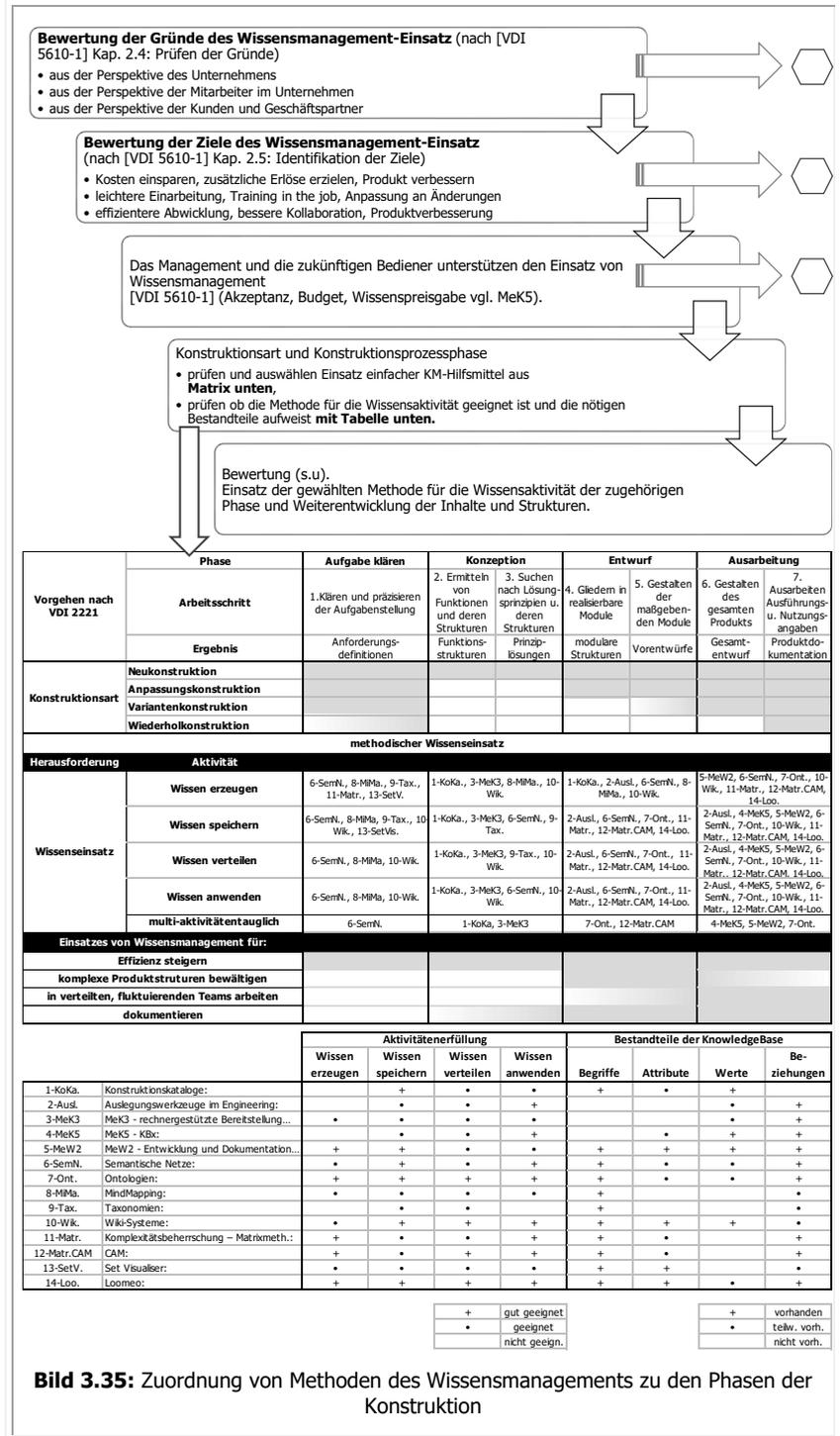
Fokus zur Technischen Logistik

MeW1 ist allgemein für konstruktive Tätigkeiten gültig. Aus Projekterfahrungen angepasst auf Tätigkeiten in der Technischen Logistik lässt sich hier v.a. für die häufig eingesetzte Wiederholkonstruktion das probate Werkzeug ermitteln. Die Komplexität der Werkzeuge entspricht der oben dargelegten geringen Größe der Entwicklungsabteilungen und der Wissenskonzentration in wenigen Entwicklerköpfen im Fach.

Durchführung

²²⁸ Bei MeW1 handelt es sich um einen praktisch-anwendungsorientierten „niederschweligen“ Ansatz mit Fokus auf die Konstruktionstätigkeit. Hierzu werden einfache, schnell umzusetzende Verfahren bereitgestellt und nicht ein umfangreicher WM-Prozess (phasenweise) etabliert (nach [VDI 5610-1]). Der phasenweisen Umsetzung von high-end KM wird damit der pragmatische Ansatz entgegengestellt, ein zu identifizierendes System umzusetzen, um den ersten Schritt in Richtung KM zu tätigen. Für Bereiche, in denen KM bereits eingesetzt ist, kann MeW1 bestenfalls als Ergänzung herangezogen werden. MeW1 ersetzt daher keinesfalls die phasenweise Einführung und Anwendung eines high-end KM mit Sensibilisierung, Strategie-Definition, Bestandsaufnahme, Konzeption, Realisierung und Einsatz mit kontinuierlicher Verbesserung.

Ablaufplan (Bild)



Vorgehen nach VDI 2221	Phase	Aufgabe klären	Konzeption		Entwurf	Ausarbeitung		
	Arbeitsschritt	1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien u. deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten Ausführungs-u. Nutzungsangaben
	Ergebnis	Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinzip-Lösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktdokumentation
Konstruktionsart	Neukonstruktion							
	Anpassungskonstruktion							
	Variantenkonstruktion							
	Wiederholungskonstruktion							
methodischer Wissensenseinsatz								
Herausforderung	Aktivität							
	Wissen erzeugen	6-SemN, 8-MiMa, 9-Tax., 11-Matr., 13-SetV.	1-KoKa., 3-MeK3, 8-MiMa, 10-Wk.	1-KoKa., 2-Ausl, 6-SemN, 8-MiMa., 10-Wk.	5-MeW2, 6-SemN, 7-Ont., 10-Wk., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.			
	Wissen speichern	6-SemN, 8-MiMa, 9-Tax., 10-Wk., 13-SetVs.	1-KoKa., 3-MeK3, 6-SemN, 9-Tax.	2-Ausl, 6-SemN, 7-Ont., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.	2-Ausl, 4-MeK5, 5-MeW2, 6-SemN, 7-Ont., 10-Wk., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.			
	Wissen verteilen	6-SemN, 8-MiMa, 10-Wk.	1-KoKa., 3-MeK3, 9-Tax., 10-Wk.	2-Ausl, 6-SemN, 7-Ont., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.	2-Ausl, 4-MeK5, 5-MeW2, 6-SemN, 7-Ont., 10-Wk., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.			
	Wissen anwenden	6-SemN, 8-MiMa, 10-Wk.	1-KoKa., 3-MeK3, 6-SemN, 10-Wk.	2-Ausl, 6-SemN, 7-Ont., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.	2-Ausl, 4-MeK5, 5-MeW2, 6-SemN, 7-Ont., 10-Wk., 11-Matr., 12-Matr.CAM, 14-Loo.			
multi-aktivitätentauglich	6-SemN.	1-KoKa, 3-MeK3	7-Ont., 12-Matr.CAM	4-MeK5, 5-MeW2, 7-Ont.				
Einsatzes von Wissensmanagement für:								
Effizienz steigern								
komplexe Produktstrukturen bewältigen								
in verteilten, fluktuierenden Teams arbeiten								
dokumentieren								

		Aktivitätenerfüllung				Bestandteile der KnowledgeBase			
		Wissen erzeugen	Wissen speichern	Wissen verteilen	Wissen anwenden	Begriffe	Attribute	Werte	Beziehungen
1-KoKa.	Konstruktionskataloge:		+	•	•	+	•	+	
2-Ausl.	Auslegungswerkzeuge im Engineering:		•	•	+			•	+
3-MeK3	MeK3 - rechnergestützte Bereitstellung...	•	•	•	•			•	+
4-MeK5	MeK5 - KB:		•	•	+		•	+	+
5-MeW2	MeW2 - Entwicklung und Dokumentation...	+	+	•	•	+	+	+	+
6-SemN.	Semantische Netze:	•	+	•	+	+	•	•	+
7-Ont.	Ontologien:	+	+	+	+	+	•	•	+
8-MiMa.	MindMapping:	•	•	•	•	+			•
9-Tax.	Taxonomien:		•	•	•	+			•
10-Wk.	WKI-Systeme:	•	+	+	+	+	+	+	•
11-Matr.	Komplexitätsbeherrschung – Matrilmeth.:	+	•	•	•	+	•		+
12-Matr.CAM	CAM:	+	•	•	•	+	•		•
13-SetV.	Set Visualiser:	•	•	•	•	+	•	•	•
14-Loo.	Loomco:	+	+	•	•	+	•	•	•

+	gut geeignet	+	vorhanden
•	geeignet	•	teilw. vorh.
	nicht geeign.		nicht vorh.

Bild 3.35: Zuordnung von Methoden des Wissensmanagements zu den Phasen der Konstruktion

Schritte

Bewertung der Gründe des Wissensmanagement-Einsatz: [VDI 5610-1] gibt eine Reihe von Gründen für den Einsatz von Wissensmanagement aus drei unterschiedlichen Perspektiven an. Damit kann in einem ersten Schritt geprüft werden, ob die dort gelisteten Herausforderungen im Unternehmen bestehen bzw. bereits bewältigt werden.

Bewertung der Ziele des Wissensmanagement-Einsatz: Mit den in [VDI 5610-1] gelisteten Zielen können Ziele für den KM-Einsatz im Unternehmen spezifiziert und mit den unternehmerischen Zielen abgeglichen werden. Nach Bewertung kann eine Entscheidung bezüglich des Einsatzes von Wissensmanagement fallen²²⁹.

Vorhandene Unterstützung: [VDI 5610-1] nennt als Hauptvoraussetzung für das Gelingen des KM-Einsatzes die nötige Unterstützung durch das Management und die der zukünftigen Bediener (Akzeptanz, Budget, Wissenspreisgabe vgl. MeK5). Ist diese nicht vorhanden, ist der KM-Einsatz zu verwerfen.

Auswahl nach Matrix und Tabelle: Mit der angegebenen **Matrix** (Bild 3.35 oben) kann überprüft werden, zu welcher Phase des Konstruktionsprozesses für welche Wissensaktivität welches Hilfsmittel eingesetzt werden kann. Die untersten Spalten zeigen Gründe für den Einsatz von Wissensmanagement-Instrumenten in den Konstruktionsphasen. Mit der **Tabelle** (Bild 3.35 unten) kann weiters geprüft werden, welches der gelisteten Werkzeuge/Methoden welche Wissensaktivität erfüllen kann. Zusätzlich sind die Bestandteile der einzelnen KnowledgeBases angegeben²³⁰.

Bewertung (s.u.) und Einsatz: Nach Bewertung und allfälliger Begründung der Anwendung von Wissensmanagement-Instrumenten erfolgt deren Einsatz mit Weiterentwicklung der Inhalte und Strukturen (Pflege).

Hilfsmittel (Software)

Für die dargelegten Methoden existierende teils vielfach IT-Hilfsmittel. Untenstehend sind Quellen aus praktischen Erfahrungen angegeben²³¹:

- 1-KoKa. → Konstruktionskataloge: Viele CAD-Dienstleister bezeichnen ihre Produktdatenbanken als Konstruktionskataloge. Diese Bezeichnung trifft nur zu, wenn eine Systematisierung²³² eingehalten wird. Die in der Literatur bekannten Konstruktionskataloge (u.a. [ROT00] u. die Verweise auf weitere Kataloge darin) und sind papiergebunden.
- 2-Ausl. → Auslegungswerkzeuge im Engineering: Diese können sowohl papiergebunden als auch IT-basiert umgesetzt sein. Beispiele sind die Normen und Richtlinien und deren elektronische Realisierung, sowie empirisch erstellte Auslegungsberechnungen (wie [P2], [LAN09]).

²²⁹ Die Aspekte Gründe/Herausforderungen und Ziele beziehen sich auf die phasenweise Etablierung eines high-end Wissensmanagementsystems nach [VDI 5610-1]. Für die hier dargelegten einfacheren Ansätze kann aufgrund der unaufwendigeren Etablierung auch pragmatisch entschieden werden!

²³⁰ Beispielsweise ist für die Unterstützung des KBx-Erstellungsprozesses (MeK5) eine Ontologie (7-Ont.) nicht ausreichend, da nur bedingt Werte und v.a. Formelzusammenhänge in den Beziehungen hinterlegt werden können. Des Weiteren sind die Beziehungen auch nicht in jeder Ontologie mehrdimensional abbildbar (Regelklassen des KBx). Dafür wurde das Schema der Ontologie zur Methode MeW2 erweitert.

²³¹ Definitionen der Hilfsmittel s. Kap. 2.2.12.2 und Tabelle 4.

²³² nach Bild 6.124.

- 3-MeK3 → MeK3 - rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien: siehe MeK3
- 4-MeK5 → MeK5 – KBx: siehe MeK5
- 5-MeW2 → MeW2 - Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen: siehe MeW2
- 6-SemN. → Semantische Netze: Kommerzielles Software-Produkt „K-Infinity“ [INT14]
- 7-Ont. → Ontologien: Freeware Ontologieditor „Protégé“, auch webbasiert, der Stanford University [SOC14]²³³.
- 8-MiMa. → MindMapping: große Vielfalt an kommerziellen und freien Software-Lösungen, aber auch papiergebunden möglich. Übersicht über die IT-Lösungen unter [SOC14].
- 9-Tax. → Taxonomien: sind aufgrund ihrer Einfachheit sowohl elektronisch mit jedem Zeichenprogramm als auch unterstützt (bspw. Microsoft Visio® [MIC14]) oder papiergebunden erstellbar.
- 10-Wik. → Wiki-Systeme: es ist im Funktionsumfang zu unterscheiden, mit welchen Zugriffskonzepten man die Lösung verwenden will. Danach richtet sich meist der Preis kommerzieller Wiki-Systeme wie bspw. „lexiCan“²³⁴ [VET14].
- 11-Matr. → Komplexitätsbeherrschung –matrixbasierte Methoden: Die Erstellung der DSM u.ä. Matrizen kann noch papiergebunden erfolgen. Ab der Analyse der Matrizen wird allerdings je nach Größe derer IT-Unterstützung benötigt. [DSM14a] gibt Übersicht über verfügbare Lösungen.
- 12-Matr.CAM → Cambridge Advanced Modeller: Der CAM gehört ebenso zu den matrixbasierten Methoden der DSM, s.o.²³⁵ [ENG13].
- 13-SetV. → Set Visualiser: [ENG14]
- 14-Loo. → Loomeo: [LOO14]

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Wissenseinsatz MeW1 ist dem ganzen Konstruktionsprozess zugehörig und steht im Produktlebenszyklus überlappend, genauso wie MeK2, mit der Produktplanung und Aufgabenstellung vor der Produktion mit Fertigung/Montage/Prüfung (s. Bild 2.28). Natürlich kann KM auch über diese Phasen ausgedehnt werden, MeW1 hat jedoch nur den Konstruktionsprozess im Fokus.

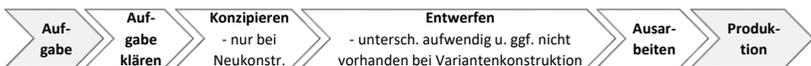


Bild 3.36: VDI-Konstruktionsphasen für MeW1

²³³ S. auch Kap. 6.12.2.2.

²³⁴ S. auch Kap. 6.12.2.4 und Bild 6.116.

²³⁵ S. auch Anmerkung unter „Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit“.

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess (MeW1) mit den dargelegten Methoden ist direkt verbunden mit der Herangehensweise des Knowledge-based engineering. Dazu ist MeK5 ein Instrument von MeW1 und MeW2 als Hilfsmittel des KBx (MeK5) ein ebensolches.

Der Methodikeinsatz im CAD MeK4 baut auf Wissensspeichern auf (Konstruktionsrichtlinien), die in Form der Methoden von MeW1 ausgeführt sein können.

Die matrixbasierten Methoden zur Komplexitätsbewältigung sind mit den zugehörigen Instrumenten ihrer Analyse auch geeignet, die methodische Konstruktion MeK2 zu unterstützen. Insbesondere sind die am Ende des Konzeptionierens zu definierenden Module mit den matrixbasierten Methoden auffindbar.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

Eine Eignung der Methoden für den Wissens Einsatz in den Phasen der Konstruktion in der Technischen Logistik kann wie folgt angegeben werden. Die Bewertung ergänzt den finalen Auswahlprozessschritt nach Bild 3.35²³⁶.

1-KoKa. Konstruktionskataloge:

Konstruktionskataloge sind sehr statische und meist papiergebundene Wissensspeicher die daher schwierig mit verteilten Rollen bearbeitet werden können. Mit ihnen können v.a. beim „Konzipieren“ neue Lösungen gefunden werden. Wenn neue Lösungen im Rahmen der Konstruktion erzeugt wurden, kann mit den Konstruktionskatalogen das Wissen gespeichert, verteilt und wiederholt angewandt werden.

Graphisch aufwendig erstell- und vor allem pflegbar.

2-Ausl. Auslegungswerkzeuge im Engineering:

Die Auslegungswerkzeuge der Technischen Logistik sind traditionell empirisch abgeleitete (analytische) Berechnungsprozesse, die IT-gestützt eingesetzt werden können. Sie enthalten, da ihr Erstell- und Findungsprozess nicht immer ausreichend vorliegt, viel implizites Wissen. In der Phase „Entwerfen“ kann mit ihrem wiederholten Einsatz (Optimierung, Sensitivitätsanalyse) Wissen genauso wie mit CAE-Methoden erzeugt werden (MeB1). Vielmehr ist aber der Wissens Einsatz damit möglich.

Aufwand gering bis mittel, je nach Komplexität der Umsetzung (IT-basiert oder papiergebunden).

3-MeK3 MeK3 - rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien:

Die Erstellung eines vollautomatisierten Systems nach MeK3 ist nur bei mehrfach wiederholtem Einsatz effizient. In der Phase „Konzipieren“ kann jedoch auch mit der weniger automatisierten Variante (IT-basierter morphologischer Kasten) Wissen erzeugt vor allem aber gespeichert, verteilt und angewandt werden.

Aufwand hoch und nur bei vielfach wiederholtem Einsatz gerechtfertigt.

4-MeK5 MeK5 – KBx:

²³⁶ Die Ausführungen bewerten nicht die Erfassung des Inhalts der Wissenspeicher.

Mit Knowledge-based Konstruktionslösungen ist vor allem das „Ausarbeiten“ von wiederholten Konstruktionen effizient und das darin gespeicherte Wissen kann verteilt und angewandt werden.

Der Aufwand und Nutzen des KBx ist bei Methode MeK5 detailliert beschrieben.

5-MeW2 MeW2 - Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen:

MeW2 ist das probate Mittel, um das in CAD-Systemen (und automatisierten Konstruktionen) implizit und verteilt gespeicherte Wissen, zentral zu speichern, verteilen und anzuwenden. In einer intuitiv bedienbaren Bedienweise ist dabei Wissen ebenso erzeugbar.

Der Aufwand und Nutzen ist bei komplexen CAD-Konstruktionen gerechtfertigt. Kommerzielle Lösungen dazu existieren (noch) nicht.

6-SemN. Semantische Netze:

Wenn semantische Netze mit einfachen Hilfsmitteln (papierbasiert oder Standard-Software) erzeugt werden, sind sie im Bereich der „Aufgabenklärung“ effiziente KM-Hilfsmittel. Mit zunehmender Komplexität in den folgenden Konstruktionsphasen werden diese durch die Ontologien verdrängt.

7-Ont. Ontologien:

Mit Ontologien können nahezu alle Aufgaben des KM in der Konstruktion wahrgenommen werden, v.a. in den Phasen „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“. Durch die Speicherung des Wissens in Ontologien können damit neue Zusammenhänge erkannt werden (Wissen erzeugen). Mit Multi-User-Konzepten IT-basierter Ontologieeditoren kann das Wissen verteilt und effizient angewandt werden.

Wenn die Erstellung der Ontologien konstruktionsbegleitend erfolgt, und nicht erst abschließend zur Dokumentation, können mit geringem Aufwand die zentralen Aufgaben des Wissensmanagements erledigt werden. MeW2 erweitert das Fehlen von Werten und Formeln der KnowledgeBase.

8-MiMa. MindMapping:

Mit MindMapping können die Anforderungen an ein Produkt erfasst und damit das Wissen gespeichert werden. Beim Arbeiten mit den MindMaps kann neues Wissen erzeugt und das darin Enthaltene verwendet werden. Eine Verteilung ist mit IT-basierten Systemen und Zugriffskonzepten möglich.

MindMaps sind unaufwendig erstellbar.

9-Tax. Taxonomien:

Taxonomien sind geeignet für die Strukturierung (also Wissensspeicherung) von Anforderungen und funktionalen Konzepten. Durch ihren verbreiteten Einsatz in Lehrwerken dienen sie der Verteilung von Wissen auch im Konstruktionsprozess. Mit zunehmender Komplexität der Konstruktionsaufgabe in den folgenden Phasen sind diese nicht mehr umfangreich (mehrdimensional) genug.

Taxonomien sind unaufwendig erstellbar.

10-Wik. Wiki-Systeme:

Wiki-Systeme sind in eigentlich allen Phasen der Konstruktion effizient einsetzbare Werkzeuge um Wissen zu speichern, verteilen und anzuwenden. Durch Multi-User-Benutzung entsteht neues Wissen. Sie sind eines der verbreitetsten Instrumente des Wissensmanagements, nicht nur aufgrund des Erfolges von Wikipedia, auch in vielen Unternehmen.

Wiki-Systeme sind unaufwendig erstellbar und quasi evolutionär.

13-SetV. Set Visualiser:

Das Programm Set-Visualiser erlaubt Begriffe mehrfach zuzuordnen und ist damit der Taxonomie (9-Tax.) überlegen im Erzeugen und v.a. Speichern von Wissen.

Die entstehenden Euler-Diagramme sind unaufwendig erstellbar und können primär zur Aufgabenklärung herangezogen werden.

Im Beherrschen von Komplexität von technischen Systemen entsteht Wissen mit den Systemen 11-Matr., 12. Matr.CAM und 14-Loo. Dessen Speicherung ist vor allem mit IT-basierten Systemen ([ENG13], [LOO14]) effizient und kann verteilt und angewandt werden. Die Systeme sind in den Phasen „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ bei der Gliederung und Erkennung von Zusammenhängen modularer Strukturen hilfreich und mit Aufwand einsetzbar.

Bild 3.35 zeigt in den untersten Zeilen die Bereiche des Wissensmanagement-Einsatzes im Kontext Effizienzsteigerung, Beherrschung komplexer Produktstrukturen, Arbeit in verteilten, fluktuierenden Teams und der Dokumentation. Vor allem in der Phase „Ausarbeitung“ ist Wissensmanagement unbedingt empfehlenswert.

Neuheitsgrad

Als neuartig kann die Zuordnung der einzelnen Methoden zum PEP sowie deren Auswahl für die Konstruktion im Fachbereich angesehen werden.

Beispiele

Beispielhaft hervorzuheben sei noch der Einsatz von:

- 2-Ausl. Auslegungswerkzeuge im Engineering: s. Kap. 4.2.1.3.
- 6-SemN. Semantische Netze und 7-Ont. Ontologien und 12-Matr.CAM CAM: Kap. 4.2.2²³⁷.
- 14-Loo. Looemo: Moduldefinition bei der Entwicklung einer Klimakammer mit Rekuperation [OSL11]

Ein durchgängiges Beispiel für den Einsatz der Techniken und Hilfsmittel von MeW1 ist der Rollenförderer in Kap. 4.2 und speziell Kap. 4.2.2.

Quellen

Wissensmanagementmethoden sind im Text oben und in Kapitel 2.2.12.2 mit Quellen angegeben.

Grundlagen zum Wissensmanagement sind allgemein [VDI 5610-1] und für semantische Netze [REI10] und im Kontext des CAD und der Entwicklung/Konstruktion [HDG+13] zu entnehmen.

²³⁷ Kap. 6.12.3 am Beispiel Shuttle-Fahrzeug Bild 6.138 bis Bild 6.141. Kap. 6.14.3 mit DMM für einen Hängeförderer (Bild 6.165 bis 6.167). Weitere Beispiele in [P3], [P11].

3.6.2 MeW2: Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen – xKBE-app

Kurzbeschreibung

Problemstellung:

Der Aufwand für die Erstellung von automatisierten Konstruktion (KBx) - ist im Allgemeinen sehr hoch (s. MeK5 und Kap.3.4.5). Das dafür formalisierte explizit vorzuliegende Wissen wurde dafür von den Wissensinhabern (die es größtenteils implizit besitzen) erzeugt. Es ist daher effizient, dieses Wissen auch außerhalb der KBx-Lösung verfügbar zu machen. Diese stellt ja sehr oft mit dem CAD-Teil und den steuernden Programmen ein geschlossenes System für Einzelfälle dar.

In KBx-Lösungen ist das Wissen an unterschiedlichsten Orten gespeichert – z.B. im CAD, in der steuernden Berechnung und den verbundenen Datenbanken. Dieses verteilte Wissen über das KBx hinaus in Beziehung zu setzen und zu speichern ist die Aufgabe von MeW2. Genauso wie die Entwicklung von neuen und Dokumentation von vorhandenen Beziehungen zu ermöglichen. Dies ist mit steigender Komplexität der KBx-Aufgabe ohne IT-Unterstützung unmöglich. Die bekannten Entwicklungsmethodiken des KBE (MOKA,... s. Kap. 2.2.13.2) sind dazu sehr aufwendig. Bestehende Ontologieeditoren und semantische Netze wären prinzipiell geeignet, können die Zusammenhänge aber nicht ausreichend formal abbilden, da Beziehungen nur verbal und nicht mathematisch formulierbar sind (s. MeW1). Diese sind aber Kern jeder KBx-Lösung.

Folglich wird mit MeW2 und deren prototypischer Umsetzung in der xKBE-app ein Ansatz zur Erfassung und Verteilung vor allem aber zur Speicherung und Anwendung des in KBx-Lösungen eingesetzten expliziten Wissens verfolgt. Ein derartiges Entwicklungs- und Dokumentationswerkzeug für Beziehungen wird nur dann effizient verwendbar sein, wenn dessen Bedienung keinen erheblichen Mehraufwand darstellt. Dies wird durch eine automatisierte Schnittstelle zu einem gängigen CAD-System (PTC.Creo®) prototypisch realisiert dargelegt.

Zielsetzung:

- Wiederverwendung und Erfassung von in KBx-Lösungen hinterlegtem Wissen
- Intuitive und unaufwendige Unterstützung der Entwicklung und Dokumentation von komplexen Beziehungen in KBx-Lösungen
- Schaffung eines Wissensspeichers, der Wissen an CAD übergeben kann und von diesem auch solches erfassen kann
- Zusammenführung von vielerorts erfasstem und gespeichertem Wissen
- Demonstrationsszenario (neben MeW2 an sich) bereitstellen

Lösungsansatz/Arbeitsprinzip:

Die Ziele von MeW2 werden in der xKBE-app erfüllt durch:

- Erfassung und Darstellung der KBx-Aufgabe mit der Systemtechnik (s. Kap. 2.2.1)
- Zuweisen von Entitäten und Relationen im System
- Formalisieren der Relationen der Systemobjekte in unterschiedlichen Klassen (Regelklassen des KBx) verbal und nonverbal (mathematisch)
- Einbeziehen von internen und externen Wissensspeichern (Einbinden von Dokumenten, verlinken zu Datenbanken).
- Einfache und effiziente Bedienbarkeit:
 - Intuitives GUI mit drag&drop-Relationserstellung
 - Schnittstelle VB-API zu CAD-Programmen (PTC Creo® zur Erfassung konstruktiver Relationen in vorhandenen CAD-Modellen
 - Steuerung von konstruktiven Beziehungen in CAD-Modellen (Größen, Platzierungen, ...) mit der VB-API
- Visualisierung der Entitäten und Relationen in unterschiedlichen Sichtweisen (derzeit in xKBE-app: Ontologiesicht, Strukturhierarchie und Klassenbrowser, geplant: DSM-Editor und Schnittmengendiagramme) mit Filtermöglichkeiten
- leistungsfähige Datenbankstruktur > als bei Ontologieeditoren
- Demonstration der Möglichkeiten des Konzeptes mit der xKBE-app²³⁸

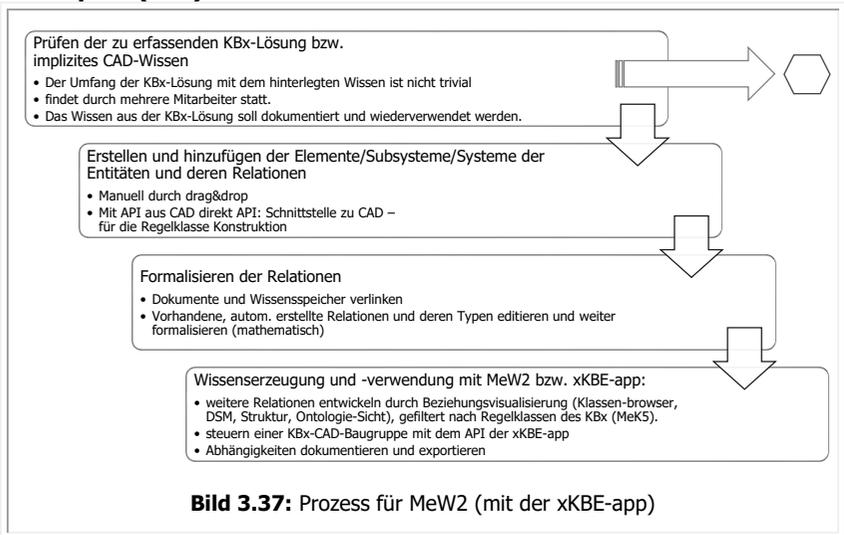
Fokus zur Technischen Logistik

Das Konzept der MeW2 und der xKBE-app ist nicht primär auf den Bereich der Technischen Logistik beschränkt. Vielmehr ist es aus dem Einsatz von KBx hierin entstanden. Eine Verwendung in anderen Bereichen des Knowledge-based engineering ist möglich. Beispielsweise konnte für den VB-API-Ansatz, des Auslesens von CAD-Modell-Eigenschaften in eine Datenbank, bereits interessante Verwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise Übersicht über Modellvarianten, diskutiert werden [GEP11].

²³⁸ Web-frontend und lokale Arbeitsumgebung s. Kap. 6.14.2.3. Theorie xKBE-app s. Kap. 6.14.2

Durchführung

Ablaufplan (Bild)



Schritte

Prüfen der zu erfassenden KBx-Lösung bzw. implizites CAD-Wissen: Wenn die KBx-Aufgabenstellung nicht trivial ist, also lediglich einige steuernde Relationen zu vergeben sind, und die Aufgabenstellung durch mehrere Mitarbeiter bearbeitet wird ist es sinnvoll MeW2 einzusetzen. MeW2 ermöglicht dann das Speichern und Wiederverwenden von Wissen. Durch die Visualisierung der Relationen kann neues Wissen erzeugt werden.

Erstellen und Formalisieren der Relationen: Abbildung der CAD-Objekte der KBx-Aufgabenstellung als System mit Entitäten und formalisierbaren Relationen (s. Bild 3.38).

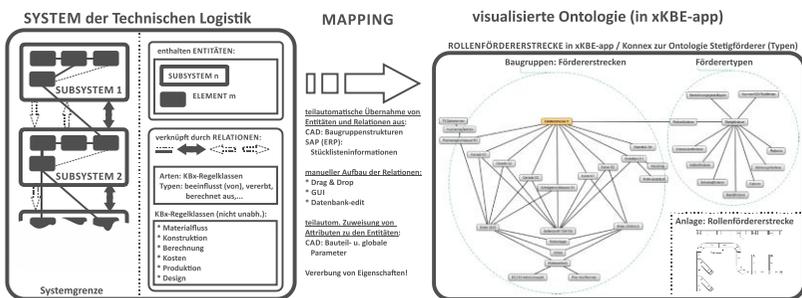


Bild 3.38: Vorgehen für MeW2 (xKBE-app)

Ein System der Technischen Logistik kann dazu als Komponente, Baugruppe, Maschine oder Anlage vorliegen (s. Kap. 2.2.3.1ff.). Je nach deren Größe kann entweder eine Anlage mit KBL in System/Subsystem/Element unterteilt werden (Bild 2.17), oder es kann eine einzelne Baugruppe (KBE) detailliert betrachtet²³⁹. Dazu sind die Relationen

²³⁹ Dann ist die Baugruppe selbst das System, die Komponenten Subsysteme und die (CAD-)Konstruktionselemente die Elemente. Wenn eine Komponente betrachtet wird, stellt diese selbst das

aus den KBx-Regelklassen gestaltbar und Entitäten zu vergeben²⁴⁰. MeW2 und die xKBE-app sehen unterschiedliche Arten der Erfassung von Relationen vor (Mapping):

- Manuell (drag&drop) zwischen zu erstellenden Entitäten der Elemente, Subsysteme und System.
- Durch (teil)automatisierte Übernahme (VB-API) CAD-Beziehungen in die Regelklasse „Konstruktion“.

System dar. Subsysteme können dann Unterbaugruppen oder Konstruktionselemente sein. Die Elemente sind dann die Konstruktionselemente der Unterbaugruppe oder die Parameter des Konstruktionselements. Ein System/Subsystem/Element kann eine oder meist mehrere Entitäten besitzen.

²⁴⁰ Begriffsklärung bezogen auf die Realisierung der MeW2 mittels xKBE-app (Details s. Kap. 6.14):

- Entität:
Eine Entität stellt einen „Informationscontainer“ dar und ist in der Lage die Grundinformationen eines beliebigen realen oder imaginären Objektes zu speichern und zu verwalten. Die Entität wird dadurch zum Abbild dieses Objektes. In Erweiterung zu den Grundinformationen kann eine Entität Attribute und Attributgruppen besitzen.
- Relation:
Eine Relation stellt eine Verknüpfung von Informationen dar. Sie kann Entitäten und Attribute in beliebiger Kombination in Beziehung setzen. Relationen besitzen nicht alle Grundinformationen. Anstatt des Namens finden in einer Relation Relationstypen Anwendung. Ein Relationstyp besitzt einen Namen und einen „inversen Namen“, da jede Relation eine Leserichtung aufweist.
- Grundinformationen:
Sind ein Satz von Datenbankfeldern (Name, Beschreibung, Kommentar). Entitäten, Attribute, Attributgruppen, Dokumente, Relationen und Relationstypen verfügen über die Möglichkeit diese Informationen aufzunehmen.
- Revision:
Fast alle Informationen werden in der xKBE-App in Revisionen gespeichert. Dieses System begründet sich durch den Grundgedanken, dass keine Information gelöscht oder überschrieben werden kann um die Nachvollziehbarkeit der Informationen zu gewährleisten. Wird eine Information modifiziert, wird die ursprüngliche Information nicht überschrieben. Es wird eine neue Revision der Information erzeugt – die ursprüngliche Information bleibt erhalten.
- Status:
Informationen werden nicht gelöscht. Um Informationen jedoch von der Darstellung und Verwendung auszuschließen, wird ihr Status manipuliert (Grundgedanken des Revisionsystems).
- Attribut:
Jedes Attribut gehört zu genau einer Entität und stellt ein Eigenschaft (oder Merkmalsausprägung) der Entität dar, die es besitzt. Es kann, wie die Entität, über die Grundinformationen verfügen, besitzt aber in Erweiterung dazu Informationen über Wert und Einheit des Attributs.
- Attributgruppe:
Eine Attributgruppe gehört, wie ein Attribut, zu genau einer Entität. Attributgruppen dienen zur Gruppierung von Attributen und erfüllen keine weiteren Funktionen.
- Vererbung:
Die Vererbung ist eine spezielle Art der Relation. Sie wird durch den Relationstyp „derived from“ erstellt und ist in gewisser Hinsicht eine Form der Abstrahierung. Durch die Erstellung einer Vererbungsrelation werden sämtliche Attribute und Attributgruppen von der Elternentität zur Kindentität vererbt, also eine Kopie erstellt, die der Kindentität zugeordnet ist. In der Kindentität ist die Modifikation vererbter Attribute nur beschränkt möglich. Lediglich der Wert des Attributs kann verändert werden. Vererbte Attributgruppen können in der Kindentität nicht verändert werden. Um die gesperrten Informationen zu ändern, müssen sie in der Elternentität geändert werden. Sowohl bei der Kindentität als auch bei der Elternentität wird eine neue Revision der Information erstellt.
Einschränkungen bei der Vererbung:
 - Keine Mehrfachvererbung
 - Keine rekursive Vererbung
 - Bei einer Relation die mit dem Relationstyp „derived from“ erstellt wurde, kann der Relationstyp nicht mehr geändert werden.

Wissenserzeugung und -verwendung mit MeW2 bzw. xKBE-app: xKBE-app und MeW2 ermöglicht die folgenden Wissensaktivitäten (s. MeW1):

- Relationen entwickeln (durch alternative Beziehungsvisualisierung wie Klassen-browser, DSM, Struktur, Ontologie-Sicht), auch gefiltert nach Regelklassen des KBE → Wissen erzeugen.
- steuern einer KBx-CAD-Baugruppe mit dem API der xKBE-app → Wissen anwenden
- Abhängigkeiten zu dokumentieren und zu exportieren → Wissen speichern und verteilen

Hilfsmittel (Software)

Da MeW2 nur als IT-basiertes Vorgehen anwendbar ist, wird in diesem Kontext stets auf den aktuellen Funktionsumfang der xKBE-app referenziert²⁴¹. Die technologischen Aspekte und Details der Softwareentwicklung von xKBE-app sind her nicht gegenständlich.

Prozessphasen

Vorgänger / Nachfolger und Position im PEP bzw. Planung

Da MeW2 ein Unterstützungsvorgehen bzw. –werkzeug für KBx (MeK5) ist, gelten die Phasen der Verwendung von MeK5. Siehe dazu auch Kap. 3.4.5

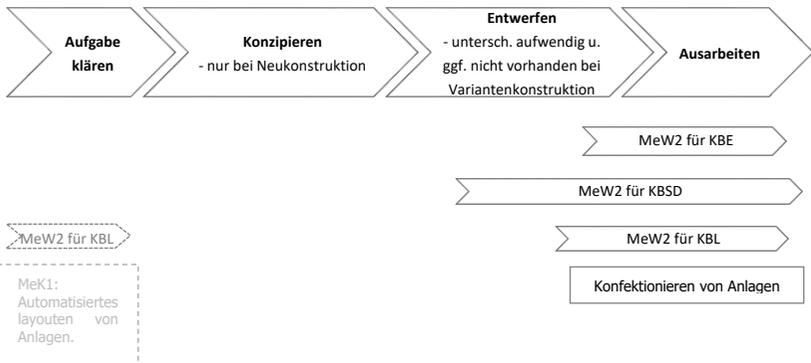


Bild 3.39: VDI-Konstruktionsphasen für Unterstützung des KBx durch MeW2

Vernetzung zu anderen Methoden dieser Arbeit

Als Unterstützungswerkzeug des KBx (MeK5) ist MeW2 dieser Methode direkt zugehörig. Als Element des Wissensmanagements ist sie Teil der MeW1.

²⁴¹ Stand Dezember 2015.

Bewertung

Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile

„Der Nutzen für das KBx der xKBE-app besteht darin, dass mit Drag & Drop Relationen unterschiedlicher Art zwischen Entitäten einfach herzustellen, bzw. vorhandene (z.B. aus CAD-Baugruppenstrukturen) automatisch übernehmbar sind. Wenn nun diese Relationen mit den nötigen Regeln mathematisch formalisiert sind, (z.B. Innendurchmesser Lager ist gleich Außendurchmesser Welle plus/minus Toleranz) können die das KBx bestimmenden Regeln übersichtlich erstellt und automatisch dokumentiert werden. Abhängigkeitspfade sind daraus (für das Änderungsmanagement) genauso ableitbar, wie Parametersätze (für den Variantenvergleich) exportierbar sind [P5].“ Zur Vernetzung von Daten und Informationen kann MeW2 und die xKBE-app ebenso genutzt werden, um diese zu Wissen zu machen²⁴².

Durch die Möglichkeit des Einpflegens von Dokumenten kann ein umfangreiches Expertensystem aufgebaut werden, um komplexe Systeme, wie beispielsweise Lagersysteme, abzubilden und das Wissen dokumentiert verfügbar zu halten.

Der Aufwand zur Erstellung eines IT-Systems für MeW2 ist groß²⁴³.

Als Vorteile lassen sich zusammenfassen:

- Wissen in KBx-Lösungen wiederholt anwenden und zentral speichern. Wissen aus unterschiedlichen Quellen verknüpfen.
- CAD-Modelle extern steuern
- Intuitives Bedienkonzept, das nur geringen Mehraufwand verursacht (bei Nutzung der VB-API) und dynamischer editierbar ist als bspw. jenes der data models [LJ12].

Nachteilig ist der Aufwand der Erstellung des IT-Systems für MeW2. Hier ist abzuwiegen, wie oft wissensbasierte Konstruktionen erstellt und wiedergenutzt werden. Wenn dies häufig der Fall ist, kann der Aufwand zur Systemerstellung gerechtfertigt sein.

Neuheitsgrad

Im Kontext der Unterstützung von Erstellung von KBx-Lösungen handelt es sich mit der MeW2 bzw. der xKBE-app um einen neuwertigen Ansatz. Teilfunktionalitäten der MeW2 werden auch von PDM/PLM-Systemen abgedeckt. Bei den unterschiedlichen Visualisierungsmöglichkeiten, der gefilterten Darstellung von Relationen und der Formalisierung der Relationen über den Umfang herkömmlicher Ontologieeditoren hinaus handelt es sich ebenso um einen neuen Ansatz.

Beispiele

²⁴² Wie in Bild 6.156 anhand eines Produktportfolios gezeigt ist.

²⁴³ Daher wurde die xKBE-app entwickelt, um Erfahrungen über Funktionsweisen und –umfang zu erarbeiten und zu demonstrieren, die für eine Weiterentwicklung genutzt werden können. An und mit ihr kann die Umsetzung des Ansatzes weiterverfolgt werden. Für ein im täglichen Konstruktionsbetrieb einzusetzendes Werkzeug ist die xKBE-app nicht geeignet, da sie prototypischen Charakter hat.

Gegenwärtig wird die xKBE-app für Forschungs- und Lehrzwecke verwendet. In der Lehre bspw. um mit den Ontologien Sachinhalte zu visualisieren (Bild 3.40 - Passfeder). Im Rahmen der Forschung wird einerseits die Datenbankarchitektur weiterentwickelt und eine Client-Server-Architektur (Bild 3.40) zusätzlich zur Desktop-Variante erstellt. Andererseits ist der Import-/Exportprozesse CAD-xKBE-app mit der VB-API in ständiger Weiterentwicklung, insbesondere in Bezug auf große Baugruppen.

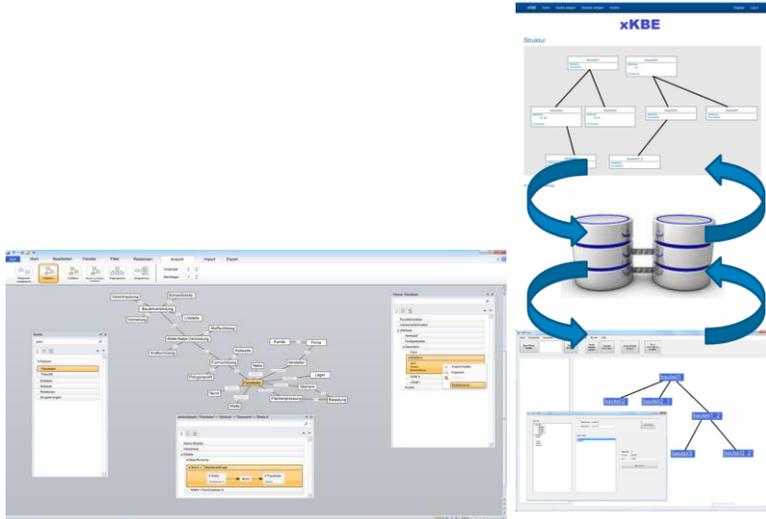


Bild 3.40: Ontologieansicht der Einordnung des Maschinenelements „Passfeder“ mit der xKBE-app-Desktopversion [LJ12] und Client-Server-Architektur der aktuellen xKBE-app Ausbaustufe

Quellen

Eine Quellenangabe wäre lediglich für die verwendeten IT-Technologien möglich, diese sind hier aber nicht gegenständlich. Quellen zu MeW2 sind aufgrund ihrer Neuheit nur beschränkt verfügbar und im Text oben angegeben. Der Ansatz als solches ist in [LJ12], [P3], [P4] und [P6] vorgestellt.

4 Drei synoptische Beispiele für den Methodeneinsatz

Anhand dreier ausgewählter Objekte der Technischen Logistik – Ladehilfsmittel, Rollenförderer und Sortertechnik – wird folgend gezeigt, wie und wozu die in Kap. 3 dargestellten Methoden eingesetzt werden können. Einen ersten Überblick dafür gibt Bild 4.1.

	Konstruktion					Wissen		Berechnung		
	MeK1	MeK2	MeK3	MeK4	MeK5	MeW1	MeW2	MeB1	MeB2	MeB3
Kap. 4.1: Ladehilfsmittel - MODULUSHCA-Box	☐	●	☐			☐		●		
Kap. 4.2: Stetigförderer (Rollenförderer)	☐	☐	●		●	●	☐	●		☐
Kap. 4.3: Sortertechnik	☐	●	☐	☐	●	●	☐	●		☐

☐	Teile der Methode angewandt, geringer Nutzen
☐	Teile der Methode angewandt, große Nutzen
●	Methode angewandt, geringer Nutzen
●	Methode angewandt, großer Nutzen

Bild 4.1: Methodeneinsatz an drei ausgewählten Objekten der Technischen Logistik

4.1 Beispiel Ladehilfsmittel

4.1.1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Physical Internet (PI) [MON12], [MON11]:

Das PI ist ein **offenes, globales Logistiksystem**, das auf physischer, digitaler und operationaler Interkonnektivität **durch Verkapselung** agiert. Es stellt damit ein nachhaltiges, flexibles und effizientes Logistikkonzept dar und begegnet der Ist-Situation mit einem völlig neuen Konzept (siehe Bild 4.2).

“The way physical objects are moved, stored, realized, supplied and used throughout the world (now!) is economically, environmentally and socially inefficient and unsustainable“. Die Argumente dafür sind mannigfaltig und die Beweisführung evident. Es wird hauptsächlich Luft und Verpackung transportiert. Leerfahrten sind eher die Regel als die Ausnahme. Produkte lagern ungebraucht oder sind nicht verfügbar. Multimodaler Transport ist nach wie vor ein nichterfüllter Traum [MON12]. Das Vorbild des PI ist das digitale Internet. Darin ist der Key Enabler die Übertragung von standardisiert formatierten Datenpaketen durch heterogenes Equipment unter Nutzung des TCP/IP-Protokolls.

Im PI soll nun in einem offenen Transportmarkt, eine “black box“ ihren Inhalt paketweise auf den besten Routen durch ein offenes und geteiltes Transportnetzwerk bringen. Dies geschieht durch digitale und physische Verkapselung der physischen Güter unter Nutzung standardisierter Geräte wie PI-movers, PI-containers, PI-warehouses und PI-hubs (crossdocking-fähig).

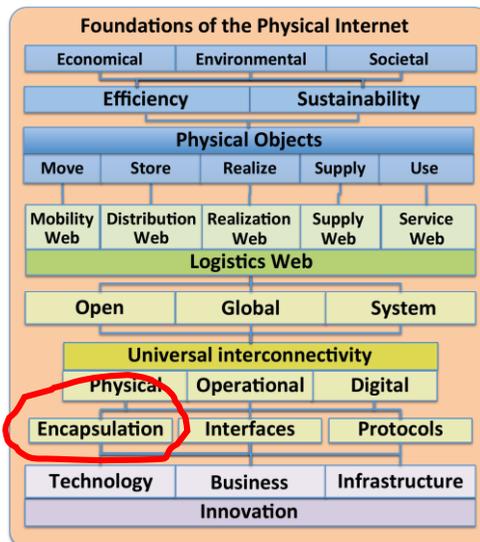


Bild 4.2: Grundlagen des PI und Bereich der MODULUSHCA-Box [MON12]

Schnelldrehende Konsumgüter – fast moving customer goods (FMCG) [LE13], [EL14]:

Megatrends fordern Logistiker durch Globalisierung, mehr Individualisierung des Konsums und Siedlungszentralisierung (s. Kap. 1.2.2). Davon sind auch FMCGs betroffen, die nicht nur schnelldrehend und beschränkt haltbar, sondern auch niedrigpreisig sind. Dazu werden in unterschiedlichen Quellen v.a. pharmazeutische Produkte, jene der Körperpflege und Beautyprodukte, Haushaltsprodukte (nur ausgewählte Lebensmittel), Elektronikprodukte und alkoholische Getränke und Tabakwaren gezählt. Weniger als 25% der Weltbevölkerung verbraucht davon mehr als 50% mit einem Volumen von jährlich durchschnittlich € 3.652,- in Europa, in den fast USA das Doppelte [M2115]. Die Branche engagiert sich nicht nur in der Produktion der Produkte, sondern vertreibt, vermarktet und betreibt auch die Logistik dafür größtenteils selbst. Die Produkte werden vom Endverbraucher regelmäßig benötigt und sind in ihren logistischen Spezifikationen (Masse, Dichte, Verpackungsanforderungen) höchst unterschiedlich; man vergleiche einen Kubikmeter oder Kilogramm Toilettenpapier mit einem Kubikmeter oder Kilogramm Batterien.

MODULUSHCA-Project [MOD12]:

Das MODULUSHCA-Projekt nimmt sich der FMCG-Logistik an um sie zu „**interconnected logistics**“ zu führen. Darin entstehen diverse Logistikkonzepte auf operativer, digitaler und physischer Ebene. Auf der physischen Ebene ist das Projektziel eine bessere Volumennutzung im Transport- und Handhabungsprozess mittels standardisierter, modularer Ladehilfsmittel. Deren Entwicklungsprozess schildert auszugsweise dieses Kapitel²⁴⁴.

4.1.2 Konstruktion und Optimierung eines modularen Ladehilfsmittel – MODULUSHCA-Box²⁴⁵

4.1.2.1 Simultaneous engineering MeK1

Der Entwicklungsprozess der modularen Ladehilfsmittel (MODULUSHCA-Box) (Bild 4.3) ist verzahnt mit der Entwicklung und Adaptierung des PI-Grundgedankens auf die FMCG-Branche. Wie in der Methode MeK1 als „simultaneous engineering“ für die Planung intralogistischer Anlagen proklamiert, ist eine solche Vorgehensweise auch für die Neuentwicklung der MODULUSHCA-Box nötig, um ausreichend Entwicklungszeit zur Verfügung zu haben.

²⁴⁴ Übergeordnet verfolgt das Projekt das Ziel eines Leuchtturmpjekts mit Vorreiterrolle. Dazu gehört der Aufbau einer Simulations- und realen Testumgebung mit Einbeziehung von Stakeholdern der FMCG-Branche und die Vernetzung mit weiteren Initiativen und Projekten aus dem PI.

²⁴⁵ Für Beiträge zu Inhalten dieses Abschnittes danke ich meinen Bacheloranden Mario Andreas Häupl, Rudolf Richard Klingler und Patrick Helmut Kobler im Rahmen ihres Bachelorprojektes 2013.

Zu den Aufgaben der Konzeptionierung und Adaptierung des PI für FMCGs zählt neben den entwicklungsmethodischen Aufgaben:

- Berechnung und Definition optimaler Boxgrößen aus logistischen Anforderungen [LE13]
- Entwurf und Umsetzung mehrerer logistischer Testszenarien des Box-Umlaufs
- Entwurf und Realisierung des digitalen Zusammenarbeitskonzeptes
- Marketing und Bewerbung

Vor allem mit den Anforderungen aus den Größendefinitionen und jenen aus den logistischen Umläufen erwachsen die Anforderungen an die Entwicklung der Box und hier ist ein simultaneous engineering nötig.

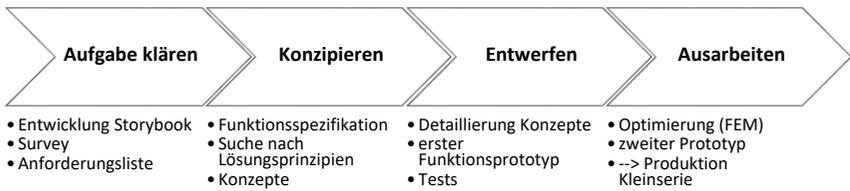


Bild 4.3: Phasen der Entwicklung und Ergebnisse für die Entwicklung der MODULUSHCA-Box

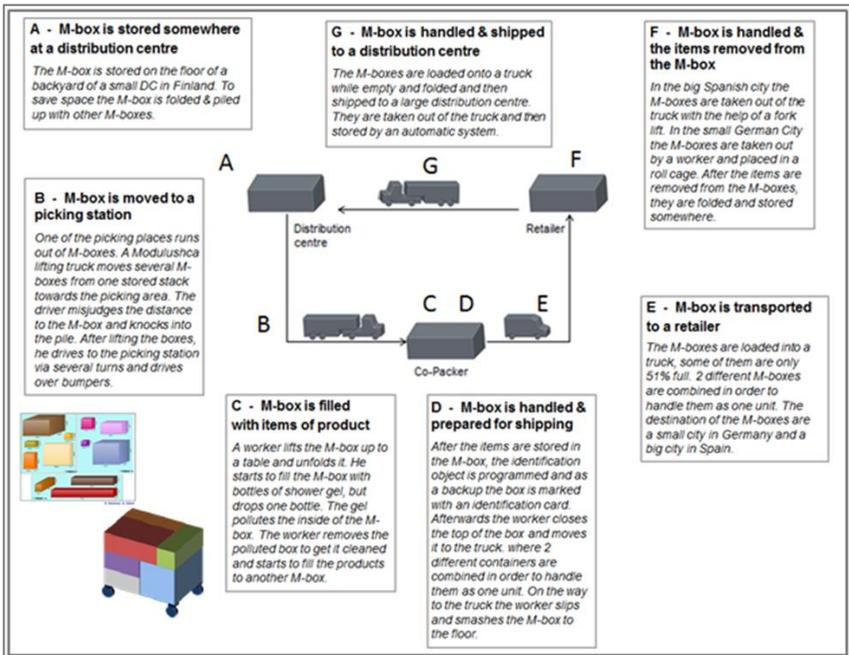


Bild 4.4: MODULUSHCA Storybook [EL14]

Dazu wurden aus dem Anwenderkreis des Box-Umlaufes, weiteren beteiligten Partnern der Branche sowie Logistikunternehmen, deren Kunden und Forschern breitestmöglich die Anforderungen an die Box erhoben, um eine Aufgabenklärung zu erreichen. Als Methoden dafür wurden das „Storybook“ und der daran anschließende „online-survey“ (Teil von MeK2) gewählt. Mit dem Storybook (Bild 4.4) kann auf einfache und verständliche Weise den im survey (Bild 4.5) zu Befragenden der Sachverhalt und die Hintergründe des logistischen Konzepts nahegebracht werden. Mit diesen Informationen ist der zu Befragende in der Lage, die Fragen zur Anforderung an die MODULUSHCA-Box zu beantworten.

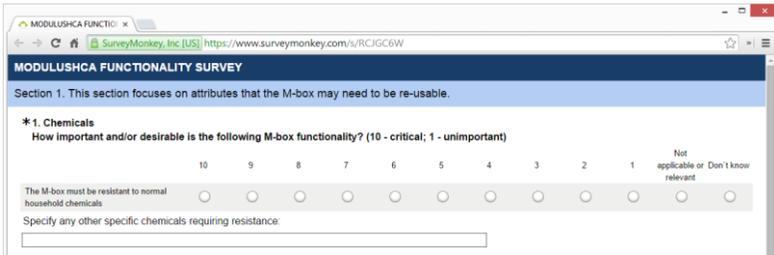


Bild 4.5: Auszug online-survey zur Anforderungsermittlung in weltweit verteilten Teams an die MODULUSHCA-Box mit Basis Storybook [EL14]

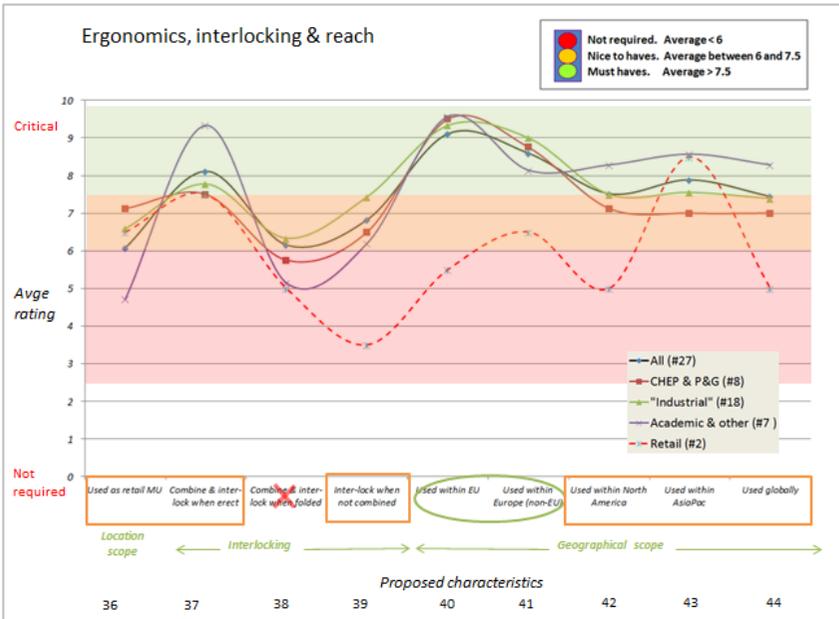


Bild 4.6: Auswertung ausgewählter Fragen des online-survey zur Anforderungsermittlung [EL14]

Dem survey lag zur Einladung und Motivation ein Schreiben mit einer Aufwandsabschätzung und dem Ausblick auf die zu erwartenden Ergebnisse bzw. des beiderseitigen Nutzens bei. Die Ergebnisse der online-Befragung wurden systematisch nach Zielgruppe und Grundfunktion der Box ausgewertet. Für die Frage nach Verbindbarkeit mit anderen Boxen bzw. dem Umfeld (interlocking) konnte schon in der ersten Befragung ein „nice/must have“ eruiert werden (Bild 4.6).

Mit einem simultaneous-engineering-Ansatz konnten die logistischen Anforderungen an die Konstruktion durch den Einsatz moderner und einfach zu verwendender Hilfsmittel in der frühestmöglichen Projektphase geklärt werden. Diese wurden dann systematisch in Anforderungslisten für den methodischen Entwicklungsprozess übergeführt und mit Stichtag unabänderbar gesetzt.

4.1.2.2 Konstruktion – methodisches Entwickeln MeK2 und MeK3

Anforderungsdefinition:

Aus den Ergebnissen der für unterschiedliche Zielgruppen durchgeführten Umfragen (Kap. 4.1.2.1) lässt sich eine Anforderungsliste an die Geometrie, den Aufbau der Konstruktion und die zu transportierenden Stoffe der MODULUSHCA-Box erstellen.

2. Ausgabe vom 10. 04. 2013

 <small>Technische Universität Graz</small>		Anforderungsliste für modulare Container	Blatt: 1	Seite: 1/1
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.	
10.04.2013	F	1. Geometrie:		Kobler Häupl Klingler
	F	Größe 1m ³		
	F	Durch 4 teilbar		
	F	Zusammengesetzt in ISO Container transportierbar		
	F	Quaderförmig (Raumnütungsgrad)		
	W	Optimaler Füllungsgrad intern		
	W	Gute Raumaussnutzung extern		
		2. Aufbau:		
	F	Verbinden mehrerer Container		
	F	Modular für gemeinsame Manipulation		
	F	Stapelbar		
10.04.2013	W	Keine losen Einzelteile		
	F	Dicht gegenüber Feuchtigkeit/Regen		
	F	Faltbar		
	W	Im gefalteten Zustand noch verbindbar		
10.04.2013	W	Minimaler Platzverbrauch im gefalteten Zustand		
		3. Stoffe:		
	F	Belastbar/robust		
	F	Befüllung mit Stoff der Dichte 1000kg/m ³		
	F	Leicht		
	F	Gute CO2 Bilanz		
	W	Recyclebar		
	F	Rostfrei		
F = Forderung W = Wunsch		Ersetzt 1. Ausgabe vom 7. 04. 2013		

Bild 4.7: Anforderungsliste an die MODULUSHCA-Box als Ergebnis des surveys mit Basis storybook

Exemplarisch wird im Weiteren die methodische Vorgehensweise der Entwicklung einer Hauptforderung dargestellt – das mechanische **Verbinden** mehrerer Container untereinander und zu weiteren Hilfsmittel. Dabei handelt es sich um eine neuartige Funktion von Ladehilfsmitteln, die in keinem verfügbaren kommerziellen Produkt ausgeführt ist [EL14]. Das Spektrum aktueller Ladehilfsmittel im Größenbereich „medium“ (bis max. 600 mm x 400 mm) kann nach Bild 4.8 klassifiziert werden. Keine der Varianten darin ist bisher mit ihrer Umgebung verbindbar.

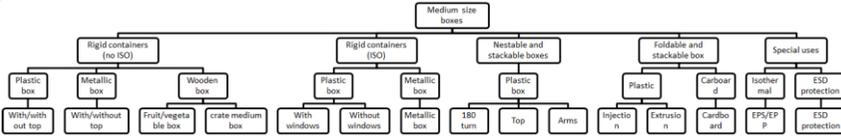


Bild 4.8: Taxonomie verfügbarer Ladehilfsmittel für FMCGs – Größenbereich „medium“ [EL14]

Funktionen und deren Strukturen:

Für die materialflusstechnischen Funktionen der Box kann man zwischen fördern/transportieren und lagern bzw. dem be- und entladen als Hilfsprozess (vgl. Kap. 2.2.3.2 mit einer weiter gefassten Strukturierung der Begrifflichkeiten aufgrund der intra- und extralogistischen Aufgabenstellung) differenzieren (Bild 4.9: Funktion des Verbindens farblich gekennzeichnet)²⁴⁶.

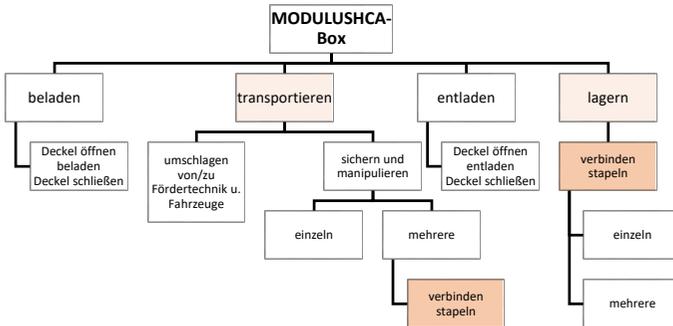


Bild 4.9: Materialflusstechnische Funktionen der MODULUSHCA-Box

Prinziplösungen und modulare Strukturen:

Bild 4.10 stellt mögliche Lösungsprinzipien für das Verbinden einzelner Container auf Basis physikalischer Grundeffekte dar. Mit der Auswahlliste nach Bild 4.11 kann eine erste Bewertung der Prinziplösungen vorgenommen werden. Da die Einbauposition und – lage der einzelnen Verbindemechanismen unterschiedlich

²⁴⁶ Weitere Funktionen der Box sind die Interaktion mit dem Produkt (es zu verkapseln) und mit der Supply Chain (track & trace, Identifizierung, Unterscheidung), die Gegenstand des logistischen Prozesses aber nicht der Konstruktion an sich sind; hierzu kommen verfügbare Fertig-Lösungen zum Einsatz.

im Container erfolgen kann ist es nötig, Kombinationen aus Lösungsprinzip bzw. prinzipieller Lösung und Einbauart weiter zu betrachten, Bild 4.12.

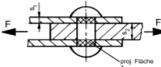
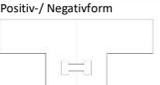
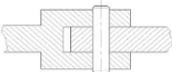
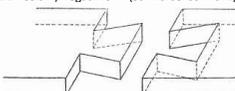
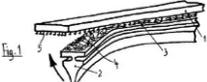
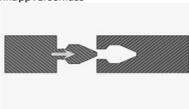
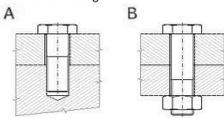
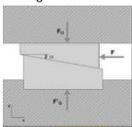
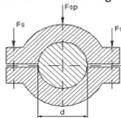
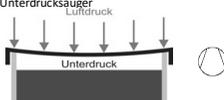
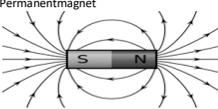
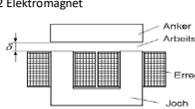
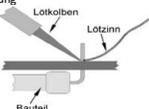
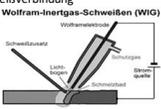
Container verbinden			
Mechanismen			
Lösungsprinzip			
1. mechanisch Flächenpressung mit Zusatzelement	1.1 Nietverbindung 	1.2 Positiv-/ Negativform 	1.3 Splint 
	1.4 Bolzen 	1.5 Spannhaken 	
2. mechanisch Flächenpressung ohne Zusatzelement	2.1 Positiv-/Negativform (Schwalbenschwanz) 	2.2 Klettverschluss 	
	2.3 Schnappverschluss 		
3. mechanisch Reibung	3.1 Schraubverbindung 	3.2 Keilverbindung 	3.3 Klemmverbindung 
	4.1 Unterdrucksauger 		
5. magnetisch Magnetfeld	5.1 Permanentmagnet 	5.2 Elektromagnet 	
	6.1 Klebeverbindung 		
7. thermisch schmelzen	7.1 Lötverbindung 	7.2 Schweißverbindung 	

Bild 4.10: Lösungsprinzipien für das Verbinden der MODULUSHCA-Boxen

Um eine **Bewertung** durchführen zu können (Bild 4.13) müssen Kriterien definiert werden. Da diese Kriterien unterschiedliche Relevanz aufweisen, werden sie gewichtet. Zur Bewertung wurden folgende Kriterien gewählt²⁴⁷:

1. Sicherheit gegen ungewolltes Lösen
2. Platzbedarf bei Verbindung
3. Platzbedarf ohne Verbindung
4. Herstellung des Zusammenhalts
5. Lösen des Zusammenhalts
6. Aufwand zur Herstellung der Verbindung (Automatisierbarkeit)
7. Sicherheit gegen ungewolltes Verbinden

Als Hauptkriterien wurden „hohe Funktionszuverlässigkeit“ (Kriterium 1 in Bild 4.13) und „gute Gebrauchseigenschaften“ (Kriterien 4 bis 7) gewählt, da diese die Eigenschaften zur optimalen Funktionserfüllung wiedergeben. „Geringer Platzbedarf“ wurde als weiteres Kriterium herangezogen.

TU Graz Technische Universität Graz		Auswahlliste Container verbinden Lösungsprinzipien					Blatt: Seite:		
Lösungsvariante (Lv) Eintragen:	Lösungsvarianten (Lv) nach Auswahlkriterien beurteilen: (+) ja (-) nein (?) Informationsmangel (!) Anforderungsliste überprüfen						Entscheiden Lösungsvarianten (Lv) kennzeichnen: (+) Lösung weiter verfolgen (-) Lösung scheidet aus (?) Informationen beschaffen (!) Lösung erneut beurteilen		
	A	B	C	D	E	F			
	Verträglichkeit gegeben								
	Forderungen der Anforderungsliste erfüllt						(!) Anforderungsliste auf Änderung prüfen		
	Grundsätzlich realisierbar								
	Aufwand zulässig								
	Unmittelbare Sicherheitstechnik gegeben								
	im eigenen Bereich bevorzugt								
	Bemerkungen (Hinweise, Begründung):								
Lv	A	B	C	D	E	F	G		
1	1	+	-	+	-	+	-	Nieten sind unlösbar	-
1	2	+	+	+	?	?	?	Nicht mit Containe verbunden	-
1	3	+	-	+	?	?	?	Splinte lose, Sicherheit nicht gegeben	-
1	4	+	?	+	+	?	?	Bolzen nur wenn im System integriert	?
1	5	+	+	+	?	?	+	Als Zusatzelement fix verbunden mit Container	+
2	1	+	+	+	?	?	?	Symmetrie beachten (Positiv/Negativ)	+
2	2	+	+	?	?	?	?	Belastung ertragbar?	?
2	3	+	+	+	+	?	?	Stärke des Schnappverschluss, Lebensdauer?	?
3	1	+	-	+	-	+	?	Loose Zusatzeile erforderlich	-
3	2	+	+	+	?	?	?	Ohne Zusatzelement möglich	+
3	3	+	?	+	+	?	?	Platz für Integration	?
4	1	+	+	+	-	?	-	Platzbedarf, Energieankopplung	?
5	1	?	+	+	?	?	?	Unmagnetisierbare Inhalte	?
5	2	?	+	+	?	?	?	Unmagnetisierbare Inhalte	?
6	1	+	-	+	?	+	-	Unlösare Verbindung	-
7	1	+	-	+	-	+	-	Unlösare Verbindung	-
7	2	+	-	+	-	+	-	Unlösare Verbindung	-

Bild 4.11: Auswahlliste der Lösungsprinzipien für das Verbinden der MODULSHCA-Boxen

²⁴⁷ Basierend auf der Vorgehensweise „Paarweiser Vergleich“ (s. MeK2).

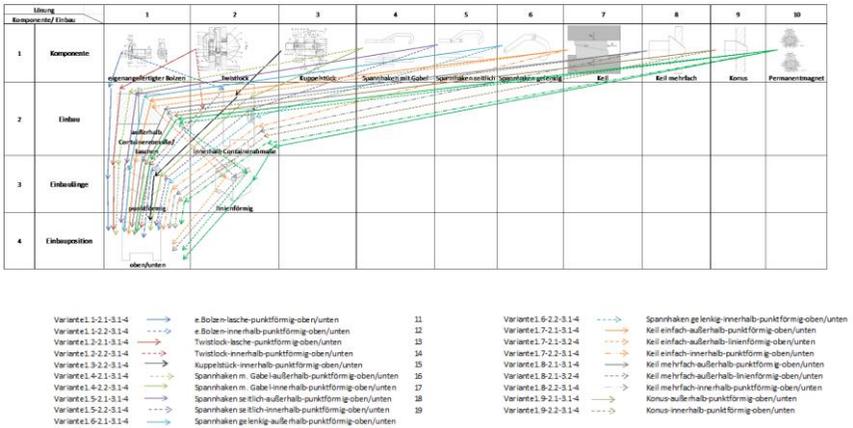


Bild 4.12: Morphologie zur Berücksichtigung der Einbauposition der Prinziplösungen in die MODULUSHCA-Boxen

Nr.	Bewertungskriterien	Gew.	Eigenschaftsgrößen	Einh.	Variante 1 eigenengefertigter Bolzen-Laschen-punktförmig		Variante 2 eigenengefertigter Bolzen-Laschen-punktförmig		ein La		
					Eigensch. Ei1	Wert wi1	Gew. Wert wg1	Eigensch. Ei2		Wert wi2	Gew. Wert wg2
1	Sicherheit der Verbindung gegen ungewolltes Lösen	0,40	Sicherheit gegen ungewolltes Lösen durch Umwelt (Vibration)		mittel	7	2,80	mittel	7	2,80	mittel
2	Platzbedarf bei Verbindung	0,10	Zwischenraum zwischen Container		hoch	2	0,20	gering	8	0,80	hoch
3	Platzbedarf ohne Verbindung	0,10	Verstaubbarkeit Innerhalb Containergeometrie		gering	2	0,20	hoch	8	0,80	gering
4	Herstellung des Zusammenhalts	0,12	Zum Verbinden benötigte Kraft		mittel	7	0,84	mittel	7	0,84	gering
5	Lösen des Zusammenhalts	0,12	Zum Lösen benötigte Kraft		gering	8	0,96	gering	8	0,96	gering
6	Aufwand zur Herstellung der Verbindung	0,08	Grad der Automatisierung	%	20%	2	0,16	20%	2	0,16	50%
7	Sicherheit gegen ungewollte Verbindung	0,08	Sicherheit gegen ungewollte Verbindung		hoch	10	0,80	hoch	10	0,80	hoch
							5,96			7,16	

Bild 4.13: Bewertung der Prinziplösungen der Funktion „verbinden“ der MODULUSHCA-Boxen (Auszug einiger Varianten)

Das Ergebnis der Bewertung der Verbindungslösungen bringt einen Gleichstand zwischen der realisierten Lösung (s.u.) und einem eigenengefertigten innliegenden Bolzen mit bestem Nutzwert. Für die Teilergebnisse je (Haupt)kriterium ergibt die Bewertung die Varianten:

- Hohe Funktionszuverlässigkeit: Variante mehrfach außenliegender Keil
- Gute Gebrauchseigenschaften: Variante einseitiger Twistlock in Laschenausführung bzw. in innenliegender Ausführung
- Geringer Platzbedarf: Variante innenliegender Keil und Konus

Für jede Lösungsvariante ist mittels Schwachstellenanalyse das technische Risiko zu bewerten bzw. abzuwiegen. **FMEA** [EM13] (Teil von MeK2²⁴⁸) untersucht

²⁴⁸ „FMEA wird angewandt zur Verringerung potentieller Fehler beim Planen des Gesamtprodukts (System-FMEA), beim Konstruieren von Baugruppen oder Einzelteilen

BEISPIELE

diese Fehlermöglichkeit und deren Auswirkungen. Für die vorliegende Entwurfskonstruktion wurde eine papiergebundene, reduzierte Analyse möglicher Fehler im „Verbinden“ und deren Folgen vorgenommen. Ergebnis der FMEA ist ein nur gering vorhandenes Restrisiko der realisierten Variante (s.u.) bzgl. des LöSENS der Verbindung und der damit verbundenen möglichen Gefährdungen.

TU Graz		Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse FMEA Detaillösungskonzepte für modulare Container				Untersuchungs-Objekt: Pfad 3		Datum: Juni 2013					
		Bemerkung:						Verantwortlich: Klinger					
Dauerhafter (bzw. geplanter Zustand) Objekt: ● Produkt ● Prozess ● System	2 Mögliche Fehler	3 Mögliche Fehlerfolgen	4 Mögliche Fehlerursachen	5 Risikobewertung Zustandsbewertung			6 Wahrscheinlicher zukünftiger Zustand Fehlerbehebungsmaßnahmen						
				A	B	E	RPZ	Wahrsch.	Termin	Fehlerbehebungs- Maßnahmen	RPZ Ok Datum		
1 Container verbunden	fälschliches Bedienen	ungevolles Verbinden oder Lösen	Ungleichmäßigkeit des Bedienens	2	4	9	48	Hinweisschilder					
	Twistlock bricht	Verbindung wird gelöst	Dimensionierung, maximaler Lasten überschritten	5	9	4	108	Sensoren Auslösung, Bestimmen der auftretenden Lasten					
	Verbindung geht von alleine auf	Container nicht verbunden	Gewinde nicht gut ausgelegt	1	6	3	18	Einbau des Gestänges beachten					
Fahrbewertung:		Bedeutung (B)		Entscheidungswahrscheinlichkeit (E)		Risikopriorität (RPZ)							
Aufmerksamkeitsbedeutung (A)		von Kunde nicht wahrnehmbar		hoch		RPZ = A * B * E							
1		2-3		1		1							
sehr selten		geringfügige Einschränkung		mäßig		2-5							
2-3		Einschränkung bis einzelner Ausfall		gering		6-8		hoch 1000					
wenige bis mittlere Zahl wahrscheinlich		Fehl- bis Totalescheit		sehr gering		9		mittel 128					
4-6		Defektions bis Verstoß gegen Gesetz		unwahrscheinlich		10		keine 1					
mäßig bis große Zahl wahrscheinlich													
7-8													
sehr große Zahl sicher													
9-10													

Bild 4.14: FMEA der Funktion „Verbinden“ der MODULUSHCA-Box

Realisierte Lösung

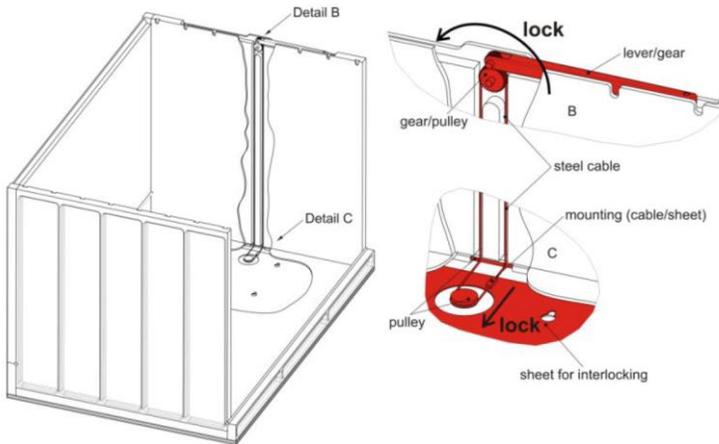


Bild 4.15: Konstruktive Realisierung „Verbinden“ der MODULUSHCA-Box [EL14]

Die aus der Bewertung der Varianten der methodischen Konstruktion identifizierte optimale Variante ist jene mit dem Lösungsprinzip 1.2 „positiv-negativ Form“ (nach Bild 4.10). Das Hauptproblem „nicht mit Container verbunden“ (Bild 4.11) wurde durch Verwendung eines drehbaren Mechanismus beseitigt („TwistLock“ nach Bild 4.12 – Variante 1.2-2.2-3.1-4). Die Funktionsflächen (Boden/Deckel) sind eindeutig als solche für den Betrieb kennzeichnbar und somit leicht im täglichen Umschlagprozess zu identifizieren und zu warten bzw. im Falle von Verschleiß zu ersetzen, da die Box als Ganze

(Konstruktions- oder Produkt-FMEA) und bei der Planung der Produktionsprozesse für das Produkt (Prozess-FMEA).“ [EM13] Dazu existiert umfangreiche Software.

modular und zerlegbar aufgebaut ist. Das „Verbinden“ wird durch einen Hebel-Seilzugmechanismus bedient. Dieser verdreht im Boden befindliche Formelemente in die entsprechenden Nuten der Gegenfläche (Bild 4.15). Durch das Versenken des Hebels ist ungewolltes Lösen der Verbindung schon daher nicht möglich, da der Hebel bei darüberliegenden weiteren Containern nicht bedient werden kann.



Bild 4.16: 3D-Druck Prototypen der MODULUSHCA-Box erster (links) und zweiter Generation

Der im rapid-prototyping realisierte **Prototyp** der zweiten Generation (nach den Optimierung – s. Kap. 4.1.2.3) weist einen Volumennutzungsgrad von 75 % auf, was von nur wenigen Boxen erreicht werden kann [EL14] (s. auch Bild 4.17). Als Verfahren kommen je nach Bauteilanforderung Lasersintern und Laser-Stereolithographie zum Einsatz²⁴⁹. Die äußeren Dimensionen entsprechen dem Modularitätskonzept des PI mit 300 x 400 x 300 mm (s. Kap. 4.1.2.1). Die Leermasse konnte von der ersten zur zweiten Generation um 50% gesenkt werden und liegt bei 3 kg (Bild 4.16). Der Verwendungszweck der ersten Prototypen ist:

- Testobjekt für mechanische Belastungstest und Konstruktionsoptimierungen daraus
- Testobjekt für Handlingtests in logistischen Prozessketten
- Demonstrator für das Lösungsprinzip der Verbindung
- Objekt zur Inspiration der Weiterentwicklung zu einem Serienprodukt mit geeigneteren und ökonomischeren Fertigungsverfahren

Ein paarweiser Vergleich bzgl. der Festanforderungen der realisierten Variante mit den durch Recherche erhobenen verfügbaren Boxkonstruktionen stellt die **Anforderungserfüllung** nicht nur sicher sondern lässt diese auch quantitativ einordnen (Bild 4.17).

Für die zahlreichen Änderungen der Anforderungen im Projektfortschritt steht mit der Morphologie und der methodischen Entwicklung ein System zum schnellen Reagieren darauf, auch im Sinne des simultaneous engineering, zur Verfügung. So wurde beispielsweise die Funktion „Container falten“ erst zu einem

²⁴⁹ Nach der Gliederung generativer Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing) [GEB14] kann der MODULUSHCA-Box-Prototyp dem Concept Modeling zugerechnet werden, das vornehmlich der Verifizierung eines Basiskonzepts dient.

sehr späten Entwicklungszeitpunkt ausgeschlossen. Dies zeigt u.a. Bild 4.17 mit der noch geforderten Festanforderung F-1 „folding/collapsing“

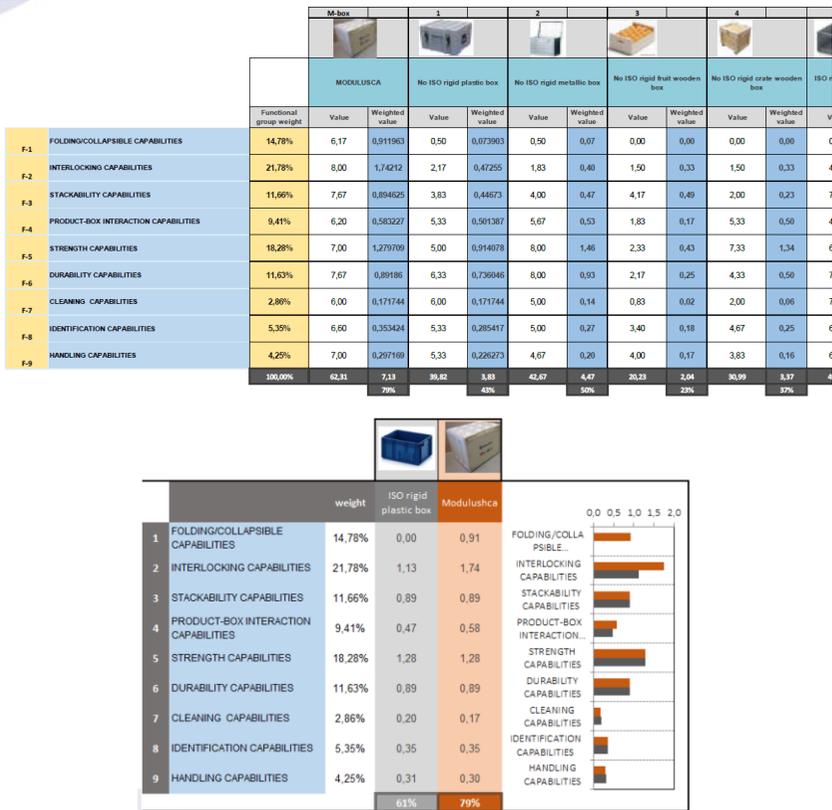


Bild 4.17: Vergleich und Bewertung der Anforderungserfüllung der MODULUSHCA-Box und kommerziell verfügbarer Boxen [EL14]

Zur methodischen Entwicklung des **Gesamtsystems der MODULUSHCA-Box** müssen, über das Verbinden hinaus, weitere Morphologien erstellt werden. Dazu dient der morphologische Kasten des Gesamtsystems (Bild 4.18) mit den zugehörigen Nutzwerten der Gesamt-Lösungsvarianten²⁵⁰.

²⁵⁰ Der gewählte Pfad enthält dabei die Teillösungen mit den besten Nutzwerten, wobei „manuell“ darauf zu achten ist, dass sich die Teillösungen des Pfades nicht gegenseitig ausschließen. Hier könnte mit dem unter MeK3 vorgestellten Konzept der elektronischen Bereitstellung von Lösungsprinzipien Wissen dazu formalisiert verarbeitet und verwendet werden.

Teilfunktion	Morphologischer Matrix					
	Lösungsoptionen					
	1	2	3	4	5	6
Coververdeckel öffnen/schließen Mechanismus aufrollen, über Rollen Nutzwerte: 4,25						
Coververdeckel verschließen Mechanismus Inbaueingriff Nutzwerte: 7,68						
Cover einrasten Mechanismus abgewinkelte Rast- punkt-Strahl Nutzwerte: 7,36						
Cover einrasten Mechanismus Auslenkung abgewinkelte Nutzwerte: 6,72						
Cover einrasten Mechanismus abgewinkelte Rast- punkt-Strahl Nutzwerte: 7,68						
Cover einrasten Mechanismus Drehpunkt, Mechanismus II Nutzwerte: 6,72						
	Plan 1	Plan 2	Plan 3			

Bild 4.18: Morphologie des Gesamtsystems aller Funktionen der MODULSHCA-Box

4.1.2.3 Technische Berechnung zur Bewertung der Konstruktion MeB1:

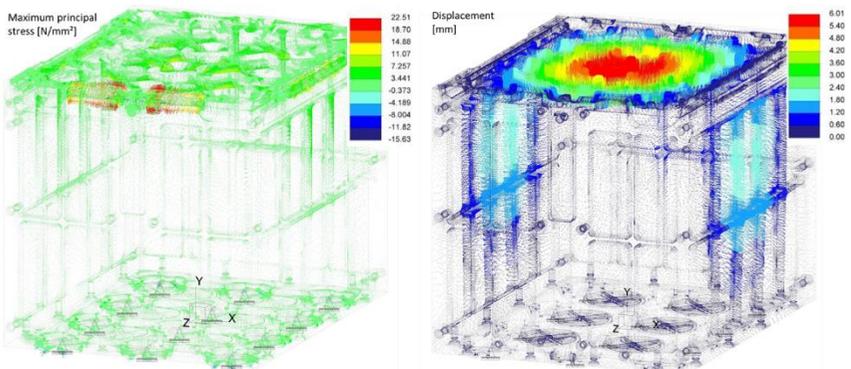
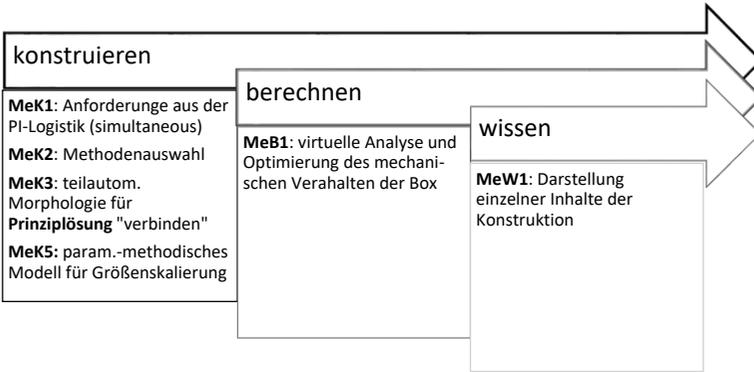


Bild 4.19: Hauptnormalspannungen und Gesamtverschiebungen an der MODULSHCA-Box mittels FEM zufolge einer Deckelbelastung von 5 gestapelten vollen Boxen (max. 25 kg) [P10]

Da es sich bei der Entwicklung der MODULSHCA-Box um eine Neukonstruktion handelt, wurde zur Aufwandsvermeidung und zum Einsparen möglichst vieler realer Tests vor Produktion der 3D-Druck-Prototypen umfangreiche virtuelle Versuche durchgeführt. Mit der FEM lässt sich beispielsweise die Belastung auf die sensiblen Funktionsflächen Boden und Deckel simulieren. Da für das Material

des 3D-Drucks und die Konstruktionsweise damit weniger Erfahrungswerte der Konstrukteure vorliegen als für herkömmliche Materialien, können mit der FEM wertvolle Erkenntnisse bezüglich Konstruktionsweise und Materialeinsatz generiert werden.

4.1.3 Nutzen des Methodeneinsatzes



Kap. 4.1: Ladehilfsmittel - MODULUSHCA-Box	Konstruktion					Berechnung			Wissen	
	MeK1	MeK2	MeK3	MeK4	MeK5	MeB1	MeB2	MeB3	MeW1	MeW2
	○	●	○			●			○	

- Teile der Methode angewandt, geringer Nutzen
- ◐ Teile der Methode angewandt, große Nutzen
- Methode angewandt, geringer Nutzen
- ◑ Methode angewandt, großer Nutzen

Engineering in der Technischen Logistik											
Methoden und deren Ziele											
Vorgehen nach [VDI 2211]	Phase	Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	Aufgabe klären	Konzeption			Entwurf		Ausarbeitung		Fertigung PEP: Nachfolger
Ergebnis	Arbeitsschritt		1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung Anforderungsgliederung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen Funktionsstrukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen Prinziplösungen	4. Gliedern in realisierbare Module modulare Strukturen	5. Gestalten der maßgebenden Module Vorentwürfe	6. Gestalten des gesamten Produktes Gesamtentwurf	7. Ausarbeiten Nutzungsangaben Produktkonzeption		
Haupt- und Nebenziele in jeweiliger PEP-Phase											
Titel		Haupt- u. Neben-Methode									
P10: M-box; logistics research		techn. Anforderungen an Logistik u. sim. eng. mit Logistikkonzeptentwicklung methodisches Entwickeln der Funktionen (Verbinden, Modulbildung...) Auslegung Box Festigkeit									
		MeK1 MeK2 MeK3 MeB1									

Bild 4.20: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Entwicklung der MODULUSHCA-Box, Einordnung Schlüsselpublikation [P10]

Mit **MeK1** können zum frühestmöglichen Zeitpunkt (Projektstart) bereits die Anforderungen aus der Logistik an das zu entwickelnde Ladehilfsmittel abgeleitet und laufend abgestimmt werden. Obwohl es sich beim Logistikkonzept des PI keinesfalls um einen Planungsprozess wie in MeK1 handelt, kann durch das simultaneum engineering wertvolle Entwicklungszeit freigemacht werden.

Mit **MeK2** wird die Aufgabe abstrahiert, unzählige Lösungsvarianten generiert und diese abschließend bewertet. Über die realisierte Variante hinaus steht umfangreiches Grundlagenwissen für die alternative Lösung diverser Funktionen (papiergebunden nach **MeK3**) an Ladehilfsmitteln zur Verfügung.

Der Einsatz von **MeK5** ermöglicht mit dem vollparametrischen und methodisch aufgebauten CAD-Modell eine einfache Größenskalierung der realisierten Lösungsvariante. Da das PI-Konzept für die Boxen bis zu 500 Größenvarianten vorsieht [LE13], kann mit einem durchgängig änderbaren CAD-Modell effizient Größenvarianten generiert werden (Wiederholkonstruktion).

Durch den Einsatz von Modellbildung und Simulation mittels FEM mit **MeB1** kann Entwicklungszeit eingespart werden, um zur optimierten Variante des Prototypen zu gelangen (Bild 4.16).

Einen abschließenden, zuordnenden Überblick über den Methodeneinsatz, die Verwendung der Schlüsselpublikationen und die Position der Methoden im PEP gibt Bild 4.20 wieder.

4.2 Beispiel Stetigförderer (Rollenförderer)

Rollenförderer, oder auch wenn angetrieben Rollenbahnen genannt, sind Stetigförderer für den vornehmlichen Stückguttransport²⁵¹. Wegen seiner weiten Verbreitung und seines breiten Einsatzes wird am Beispiel Rollenförderer die Wirkung des Einsatzes der vorgestellten Methoden gezeigt²⁵².

4.2.1 Prinzipielle Gestaltung und Konstruktion

4.2.1.1 Einordnung - Taxonomien:

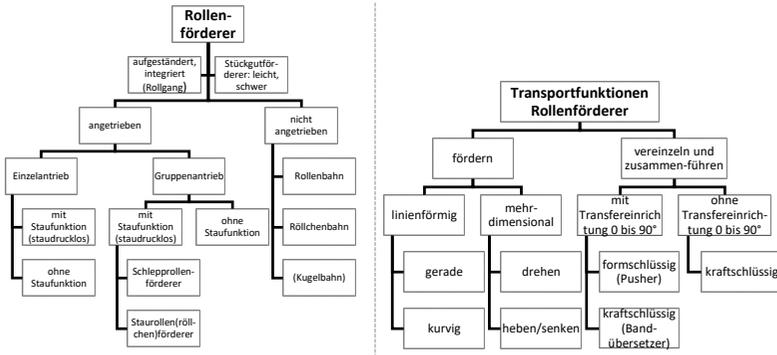


Bild 4.21: Einteilung der Rollenförderer

Bild 4.22: Transportfunktionen der Rollenförderer

²⁵¹ Nach [HNS07], [DIN 15201] und [VDI 4440-3] können Transportgeschwindigkeiten von 0,1 – 2 m/s mit Förderlasten von 25 – 2.000 kg/m erreicht werden. Das Fördergut sind Paletten, Behälter und Kartonagen. Einzelleistungen der Antriebe reichen von 0,12 – 0,75 kW. Die Gleichförmigkeit der Förderbewegung steigt mit der Anzahl der tragenden Rollen; eine Mindestauflage des Transportgutes auf zwei Rollen zu jedem Zeitpunkt ist Voraussetzung des Funktionierens. Man kann die vorwiegend nach dem Baukastenprinzip konstruierten Förderer in Schwer- und Leichtlastförderer einteilen. Die baulichen Ausprägungen sind in Kap. 4.2.1 detailliert. Ein neuer Trend der Antriebstechnik sind die Trommelmotoren, s. Bild 4.23. Die Segmente der Rollenförderer können geradlinig oder in Kurvenform gestaltet sein, um die geforderten Transportfunktionen zu erfüllen, s.

Bild 4.22. Zusätzliche Hub- transfer- und Verzweigungseinrichtungen erfüllen Vereinzelungs- und Zusammenführungsfunktionen. Eine geforderte Pufferfunktion auf dem Förderer wird mit einer Sonderform des Rollenförderers, dem Staurollenförderer erfüllt. Durch segmentweises Abschalten des Antriebs wird eine staudruckarme Pufferung des Förderguts ermöglicht. „Aufgrund des einfachen Aufbaus, der Robustheit und der geringen Investitions- und Betriebskosten sind Rollenbahnen als Stetigfördermittel weit verbreitet. ... Aufgeständerte Rollenbahnen werden in der Lagervorzone, in Kommissionierbereichen, in der Produktion, im gesamten Betrieb beispielsweise bei Arbeiten nach dem Fließprinzip für eine stetige Stückgutbewegung und zum Be- und Entladen von Verkehrsmitteln eingesetzt.“ [HNS07]

²⁵² Einblick über den Stand der Technik gibt neben [HNS07], [DIN 15201] und [VDI 4440-3] Kap. 4.2.1.2. Auf den Staurollenförderer, die Röllchenbahn und die antriebslosen Schwerkraftrollenförderer wird hier nicht Bezug genommen.

Die Taxonomie, als Instrument der Wissensrepräsentation nach MeW1, ist ein verbreitetes und übersichtlich-einfaches Mittel der hierarchischen Gliederung von Objekten. So lässt sich mit Bild 4.21 das Detailkonzept des Förderers, nach bspw. Studien mit der SyLö-app (Kap. 3.4.3), weiter auswählen bzw. eine Einordnung der gewählten Lösung treffen. Die zu erfüllenden Transportfunktionen können mit der Taxonomie nach Bild 4.22 eruiert und eingestuft werden. Schließlich kann mit der Funktionsgruppenzuordnung nach Bild 4.23 eine erste Entscheidung zur Bewertung der konstruktiven Realisierung des Rollenförderers getroffen werden. Die Funktionsgruppenzuordnung stellt dabei prinzipielle Lösungen der nach Bild 4.22 definierten Transportfunktionen bereit. Im Produktentwicklungsprozess ist diese Entscheidung im Rahmen der Neukonstruktion am Ende des Schritts „Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“ zu treffen²⁵³.

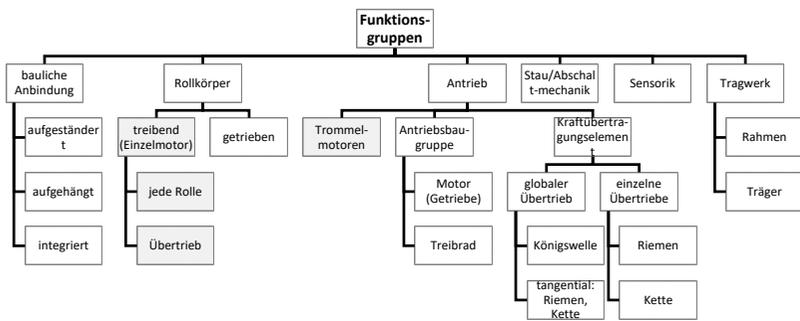


Bild 4.23: Funktionsgruppen der Rollenförderer

4.2.1.2 Stand der Forschung:

Die Monographie und das Normungswesen²⁵⁴ haben schon früh begonnen, den Rollenförderer als wichtige Maschine der Materialflusstechnik systematisch und mathematisch zu beschreiben. [PKK88] gibt die umfangreichste Beschreibung der mechanischen Zusammenhänge und Dynamik am Rollenförderer an, allerdings mit herkömmlichen, mathematischen Mitteln und dem Aufstellen der Bewegungsgleichungen. Konstruktive Skizzen, mit allerdings dem Stand von 1974, ergänzen die Ausführungen. [MRW08] bezieht sich in seiner Betrachtung auf die Leistungsberechnung. [HKS04] gibt ebenso Leistungsberechnungen und einige konstruktive Skizzen wieder.

Umfassend beschäftigt sich [WIE11] mit dem Rollenförderer. Mit dem Ziel, ein Auslegungstool zur Parametrierung freier Parameter einer Rollenförderergeraden und der Berücksichtigung derer Beladung soll eine Überdimensionierung von geraden Förderermodulen vermieden werden.

²⁵³ Am Übergang der Phase konzipieren zu entwerfen (nach [VDI 2221]).

²⁵⁴ Die normativen Regelwerke [DIN 15201] und [VDI 4440-3] gliedern die Stetigförderer allgemein und geben prinzipielle Konstruktionsweisen an.

Obwohl die Überlegungen in den Bereich der Anpassungs- und Variantenkonstruktion einzuordnen sind, wird ein aussagekräftiges abstraktes Funktionsschema des Rollenförderers erstellt (Bild 4.25). Bild 4.24 gibt Einblick in die Wiederverwendbarkeit einzelner Teile und Baugruppen eines Rollenförderers. Dieses dient im Rahmen des methodischen Entwickelns (MeK2) vornehmlich der Auffindung von neuen Lösungsprinzipien für geforderte Funktionen, dieser Schritt wird in [WIE11] allerdings nicht vollzogen²⁵⁵.

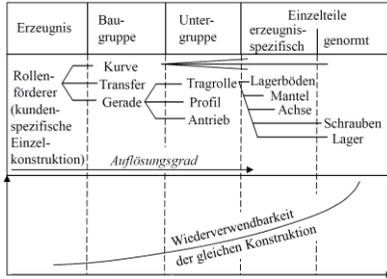


Bild 4.24: Baugruppen eines Rollenförderers bzgl. ihrer Wiederverwendbarkeit [WIE11]

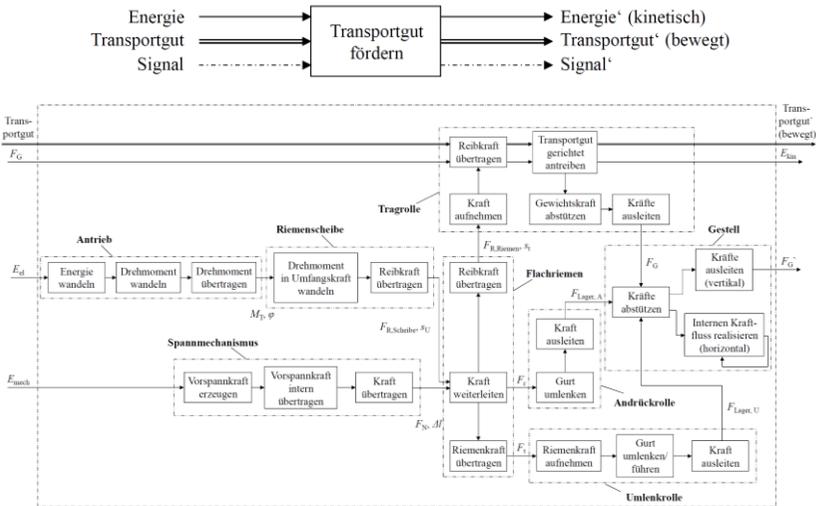


Bild 4.25: Prinzipfunktion und Funktionsstruktur eines Rollenförderers [WIE11]

²⁵⁵ Vielmehr wird hier ein Ansatz mit mathematischen Modellen und statistischer Versuchsplanung gewählt. Weiterführende Literatur darin ist: /KÜN07a/, /KÜN07b/, /KÜN08a/, /KÜN09a/ und /KÜN09a/. Für die Verwendung und den Einsatz von Baukästen wird die Auflösung nach Bild 4.24 vorgeschlagen, um möglichst austauschbare Module zu erhalten, mit denen unterschiedlichste Förderer im Geiste des Baukastenprinzips erstellbar sind.

Eine Grobauslegung des Antriebsmotors kann nach [MRW08] allgemein für Stetigförderer vorgenommen werden. Eingangsparameter sind: Fördergeometrie (Höhe, Länge), Fördergeschwindigkeit, Streckenlast Fördergut und Streckenlasten der Fördererkomponenten (Tragrollenmasse). Die erforderliche Antriebsleistung P_A wird zu Reibungs- und Steigungswiderstand mittels der Gesamtwiderstandsmethode berechnet²⁵⁶:

$$P_A = \frac{[(m_{LG}' + m_{LF}') \cdot \mu \cdot L + (m_{LG}' \cdot H)] \cdot g \cdot v}{\eta_A}$$

Darüberhinaus beschäftigt sich der SFB-696 „Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen“ am Beispiel Rollenförderer [TUD12] intensiv mit der Optimierung des Rollenförderers. Untersuchungsthemen sind die optimale Tragrollenteilung, ein Methodenworkflow zur durchgängigen Verwendung mechatronischer Auslegung. Weiter Themen sind die optische Topographieerfassung des physischen Rollenzustands und die Technische Verfügbarkeit des Gewerks.

Im Bereich der wissenschaftsgestützten Konstruktion von Rollenförderern existiert bspw. die Arbeit [GHO08] einer vollständigen KBE-Lösung für Rollenfördererstrecken²⁵⁷.

4.2.1.3 Prinzipielle Lösungssynthese und automatische Konstruktion

Mit der MeK3 – rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen – können für eine geforderte Funktion Lösungen generiert werden. Die SyLö-app²⁵⁸ ist dazu ein Wissensspeicher für die förderer-technische Hauptfunktion transportieren und baut auf die o.a. und unter Kap. 3.4.3 angegebenen Wissensquellen auf. Bild 4.26 zeigt Screenshots des Arbeitens mit der SyLö-app.

Von einer vorgegebenen Transportaufgabe ausgehend (Durchsatz, Grundgeometrie, Spezifikation der Ladehilfsmittel – siehe Bild 3.16) können über

²⁵⁶ Bezeichner:

- L ...Fördererlänge
- v ...Fördergeschwindigkeit [m/s]
- μ ...Gesamtreibungszahl $0,03 < \mu < 0,06$ []
- m_{LG}' ...Streckenlast Fördergut [kg/m]
- m_{LF}' ...Streckenlast der drehenden Rollenteile [kg/m]
- η_A ...Wirkungsgrad der Antriebseinheit []

²⁵⁷ In Abgrenzung insbesondere der vollständigen KBE-Umsetzung mit den in Kap. 6.13 ff. erwähnten Vor- und Nachteilen ist hier und in Kap. 4.2.2 der wissenschaftsgestützte Ansatz fokussiert auf:

- Wissenswiederverwendung, -weiterentwicklung und -speicherung extern des CAD.
- Generierung von Prinzipialösungen für Neu- und Anpassungskonstruktion, nicht KBE einer Variantenkonstruktion.
- Schnelle erste Planung (KBL und neue Varianten für Lösungsprinzipien KBSD/KBE, s. auch Sortiersysteme KBx in Kap. 4.3.2).

²⁵⁸ Sie unterstützt das methodische Entwickeln (MeK2) von Neukonstruktionen in der Phase des Konzipierens (nach [VDI 2221]) und erzeugt eine bewertbare Lösungsvielfalt. Die SyLö-app baut dabei nicht auf abstrakte, allgemeine technische Prinzipien auf, sondern verwendet bewährte Prinzipien bereits technisch realisierter Lösungen.

die einzelnen IDs Varianten von Förderermodulen erzeugt werden, die dann bis hin zu den Details des Antriebs parametrierbar sind. Die Unterstützung der methodischen Entwicklung durch die SyLö-app reicht somit vom ersten prinzipiellen Konzipieren bis hinein in das Entwerfen einer Neukonstruktion oder auch einer Anpassungskonstruktion, wenn gleich mit der Spezifikation der Details begonnen wird. Die so erzeugten Varianten können zur Bewertung verglichen werden²⁵⁹. Einzelne mit der SyLö-app generierte Module können endlich zu einer Förderstrecke zusammengefasst werden²⁶⁰.

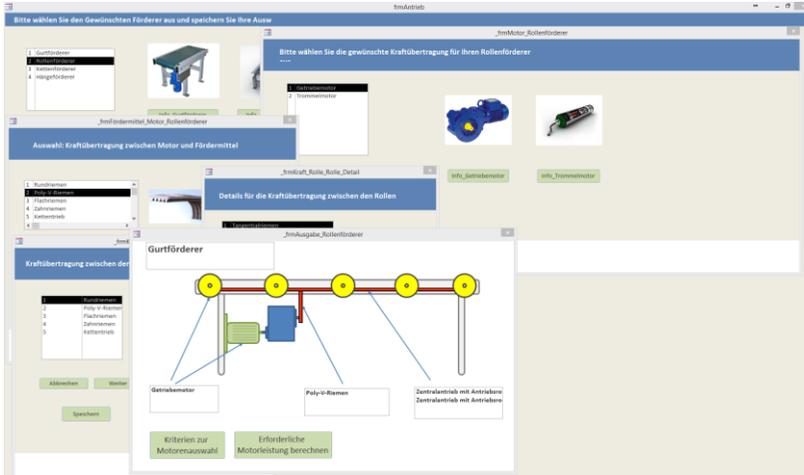


Bild 4.26: Detail-Spezifizierung/Parametrierung der Funktion „Transportieren“ mit der SyLö-app zu einem Rollenförderer (prinzipielle Technologieauswahl s. Bild 3.16)

Während Mek3 mit der SyLö-app und den elektronisch-automatisierten Morphologien Lösungsvielfalt im Konzipieren von Neukonstruktionen erzeugen kann, ist mit Mek5 (KBx) und hier speziell dem KBE eine Automatisierung der Varianten- und Wiederholkonstruktion möglich.

Da der Rollenförderer ja größtenteils im Baukastensystem ausgeführt wird [WIE11], eignet er sich besonders für KBE als Objekt „Maschine“ des KBx. Bild 4.27 zeigt ein KBE-Beispiel eines Rahmenprofils eines Schwerlast-Rollenförderers mit Kettenübertrieb. Die Konstruktionssteuerung ist in einem Tabellenkalkulationsprogramm ausgeführt (MS Excel®) und konfiguriert bzw. parametrisiert eine 3D-CAD Baugruppe (hier in PTC Creo). Aus den Grundberechnungsansätzen (s. Kap. 4.2.1.2) wird mit einem Auslegungswerkzeug die Konstruktion so weit ausgelegt, dass sie den Anforderungen entspricht. Dabei ist der Datenfluss ausgehend von den logistischen Anforderungen hin zu den konstruktiven Detaillierungen gerichtet.

²⁵⁹ Ergänzend auch am Beispiel Bandförderer siehe Bild 6.113 und Bild 6.114.

²⁶⁰ Darüberhinaus bieten die elektronisch-automatisierten Morphologien der Mek3 weitere, unaufwendiger als mit der SyLö-app erstellbare, Lösungsgenerierungsmöglichkeiten, die hier noch abstrakter als in der SyLö-app formulierbar sind.

Tabelle 15: Wissensmethoden von MeW1 am Beispiel Rollenförderer

Instrument von MeW1	Beschreibung
<p>Auslegungswerkzeuge im Engineering, 2-Ausl</p>	<p>EXCEL-Parametrierung Bild 4.27. Implizite Wissensspeicher, mit denen Berechnungswissen anwendbar wird. Sie können zur Steuerung von KBx-Modellen dienen (MeK5).</p>
<p>Rechnergestützte Bereitstellung u. Synthese v. prinzipiellen Lösungen MeK3, 3-MeK3</p>	<p>Es können neuartige prinzipielle Lösungsmöglichkeiten für geforderte Funktionen aus Wissensspeichern erzeugt (konzipiert) werden, s. Kap. 4.2.1.3.</p>
<p>Knowledge-based Engineering KBx MeK5, 4-MeK5</p>	<p>Es ist Wissen verarbeitbar und für Variantenkonstruktion einsetzbar, s. Kap. 4.2.1.3.</p>
<p>Taxonomien, 9-Tax.</p>	<p>Es kann rasch eine strukturierte Übersicht über Funktionen und konstruktive Ausprägungen visualisiert werden. Die Darstellungsweise ist hierarchisch und Mehrfachzuordnungen sind nicht möglich, dazu dienen die Ontologien und matrixbasierten Methoden, s. Kap. 4.2.1.1.</p>
<p>MindMaps, 8-MiMa.</p>	<p>Es kann Wissen erzeugt, gespeichert, verteilt und angewandt werden, allerdings in einer geringen Detailtiefe, um das Instrument MindMap nicht zu überfrachten. Sehr oft wird sie als Protokollinstrument von Brainstorms in allen Phasen des Entwickelns eingesetzt. Bild 2.19 zeigt für den Rollenförderer eine technikorientierte Systematik in MindMap-Form. Unterstützt kann die Erstellung von MindMaps von einfachen Zuordnungstabellen bzw. DMMs werden (Bild 4.28), die ebenso keine Quantifizierung und Formalisierung der Abhängigkeiten im Wissen (wie bspw. matrixbasierte Methoden und Ontologien) gestatten.</p>
<p>Cambridge-Advanced-Modeller (CAM), 12-Matr.CAM, [OCE14a]</p>	<p>Es steht ein Instrument zur Erstellung von Ontologien und v.a. DSM zur Verfügung. Bild 4.32 und die Inhalte der DSM sind damit erzeugt. Wissen kann damit erzeugt werden, da komplexe Zusammenhänge durch umfangreiche Analysen der Matrizen errechnet und visualisiert werden können²⁶².</p>
<p>Wiki-Systeme, 10-Wik.</p>	<p>Wikis sind weitverbreitete und Multi-user-taugliche Wissensspeicher um Wissen zu verteilen und anzuwenden. Sie können die unterschiedlichsten Bestandteile beinhalten (Begriffe, Attribute, Werte, Beziehungen) und für ihren praktischen Einsatz existieren viele Software-Produkte.Bild 4.29 zeigt Wissensdetails um den Rollenförderer und den Antrieb der einzelnen Rollen mittels Kettenübertrieb als Bestandteil eines Wiki-Systems.</p>
<p>Ontologiedarstellungen, 7-Ont.,</p>	<p>Sie dienen der Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Anwendung von Wissen (Bild 4.30). Die Beziehungen zwischen den einzelnen Wissensobjekten der Ontologie sind dabei vorrangig. Ihre Art ist in den gängigen Editoren (s. Protégé [ST14] Bild 4.30) spezifizierbar aber nicht mit mathematischen Zusammenhängen beschreibbar. In dieser</p>

²⁶² S. auch Kap. 6.12.2.3.

	Lücke setzt die xKBE-app für die Beziehungsgestaltung um Kontext KBx an.
<p style="text-align: center;">Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen – xKBE-app, 5-MeW2</p>	<p>In MeW2 kommen Ontologien für KBx zum Einsatz. Deren Relationen (Beziehungen) sind mathematisch formalisierbar, weisen einen steuernden Konnex zu CAD auf und mittels einer Multi-Layer-Technik können Layer (Gruppen) von Beziehungen gleicher Art erstellt und selektiv bearbeitet werden. Dadurch kann Wissen effektiv erzeugt und gespeichert werden. Die Zusammenhänge in einem technischen System (dem Rollenförderer) können nach Bild 3.38 in eine Ontologie mit der xKBE-app übertragen werden. <u>Bild 4.31</u> visualisiert die Zusammenhänge. Durch die Möglichkeit von gefilterten Sichten auf das Ganze ist in der xKBE-app die selektive Entwicklung von Beziehungen leichter möglich, als in herkömmlichen Ontologieeditoren. Die bidirektionale Schnittstelle zum CAD ist einzigartig und neuartig.</p>
<p style="text-align: center;">Komplexitätsbeherrschung mit matrixbasierten Methoden, 11-Matr.,</p>	<p>Sie ermöglicht die Beschreibung und Analyse umfangreicher technischer Systeme, deren Zusammenhänge ohne weitere Hilfsmittel nicht erfassbar sind. Somit wird in erster Linie Wissen erzeugt und angewandt, wenn die Beziehungen der Objekte des Wissenssystems interessieren. Für den Rollenförderer können Module durch das Clustern einer DSM neu definiert und abgegrenzt werden. Daraus ist auch eine Reihenfolge für das zeitliche Fällen von Konstruktionsentscheidungen ableitbar. Im Kontext des KBx kann die DSM für Parameterinstanzen von Teilen und Baugruppen (v.a. Geometriegrößen) herangezogen werden, um die gegenseitigen, steuernden Abhängigkeiten darzustellen und bei deren Entwicklung und Analyse dienlich zu sein. Die Parameter-Based DSM wird in der Literatur durch sog. Sequencing umgeformt, das eine Neuordnung unter Vermeidung von Rückführungen darstellt. Für den Einsatz im KBx ist das Ziel das Aufzeigen von (Nicht)Abhängigkeiten von Konstruktionsparametern, wozu das Clustering optimal geeignet ist [DSM14b]. Dabei werden Module (Cluster) innerer Abhängigkeit gebildet, die zum Rest minimal abhängig sind. <u>Bild 4.32</u> zeigt die DSM von Parametern einer Rollenfördererstrecke erstellt mit der Software CAM [OCE14a]. Die Beziehungsdarstellung mittels DSM ist für das KBx ein übersichtliches Werkzeug²⁶³.</p>
<p style="text-align: center;">Kategorisierung mit dem SetVisualiser, 13-SetV., [OCE14b]</p>	<p>Dadurch lassen sich Mehrfachzuordnungen einzelner Objekte zu Kategorien erfassen. Mit Euler-Diagrammen (aus der Gruppe der Mengendiagramme) kann dies grafisch erfolgen. Sie liefern einen groben Überblick der Parameterabhängigkeiten für die weitere Verarbeitung (Bild 4.33).</p>

²⁶³ Doch ist es nicht ohne weiteres möglich, in der DSM weitere Klassen und mathematische Beziehungen der Abhängigkeiten abzubilden. Als Visualisierungsmittel wird die DSM aber in der Endausbauversion der xKBE-app vertreten sein. [P3]

Rollenfördereigenschaften	Stützarm	Stützenprofil	Stützenmaterial	Stützenfuß	Kraftübertragungsaart	Seitenprofil	Achsen-durchmesser	Achsenlagerung	Rollenabichtung	Rollenmaterial	Rollenbefestigung	Rollenabstand	Rollen-schmieser	Antriebsart	Antriebsleistung
Geforderte Förderlänge															
Förderbreite	✓	✓	✓	✓	✓			✓							✓
Fördergewicht	✓	✓	✓	✓				✓							✓
Fördergeschwindigkeit					✓										✓
Form des Stückgutes						✓									
Empfindlichkeit des Stückgutes						✓									
Montageuntergrund	✓	✓		✓											
Verfügbare Leistung					✓										✓
Hygienische Anforderungen (Lebensmittel)	✓				✓										✓
Umgebungsatmosphäre			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Auslastung des Förderers															✓
Staudruck															✓

Bild 4.28: Projektion von Anforderungen an einen Rollenförderer auf dessen Eigenschaften – Zuordnungstabelle in Form einer DMM

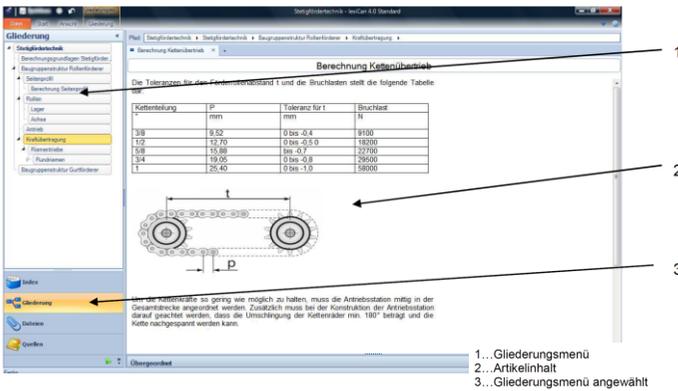


Bild 4.29: Wissen um einen Rollenförderer in einem Wiki-System (lexi.Can® [WIK14b])

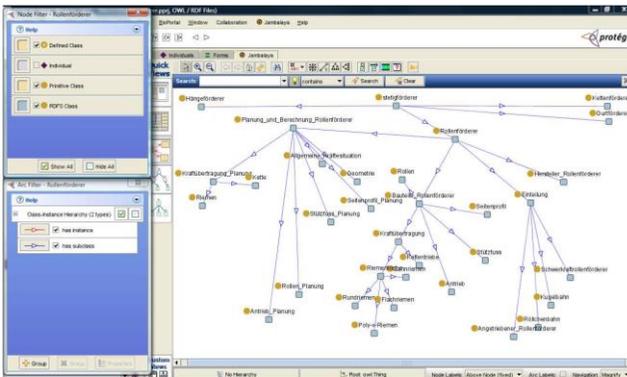


Bild 4.30: Ontologie eines Rollenförderer in „Protégé“

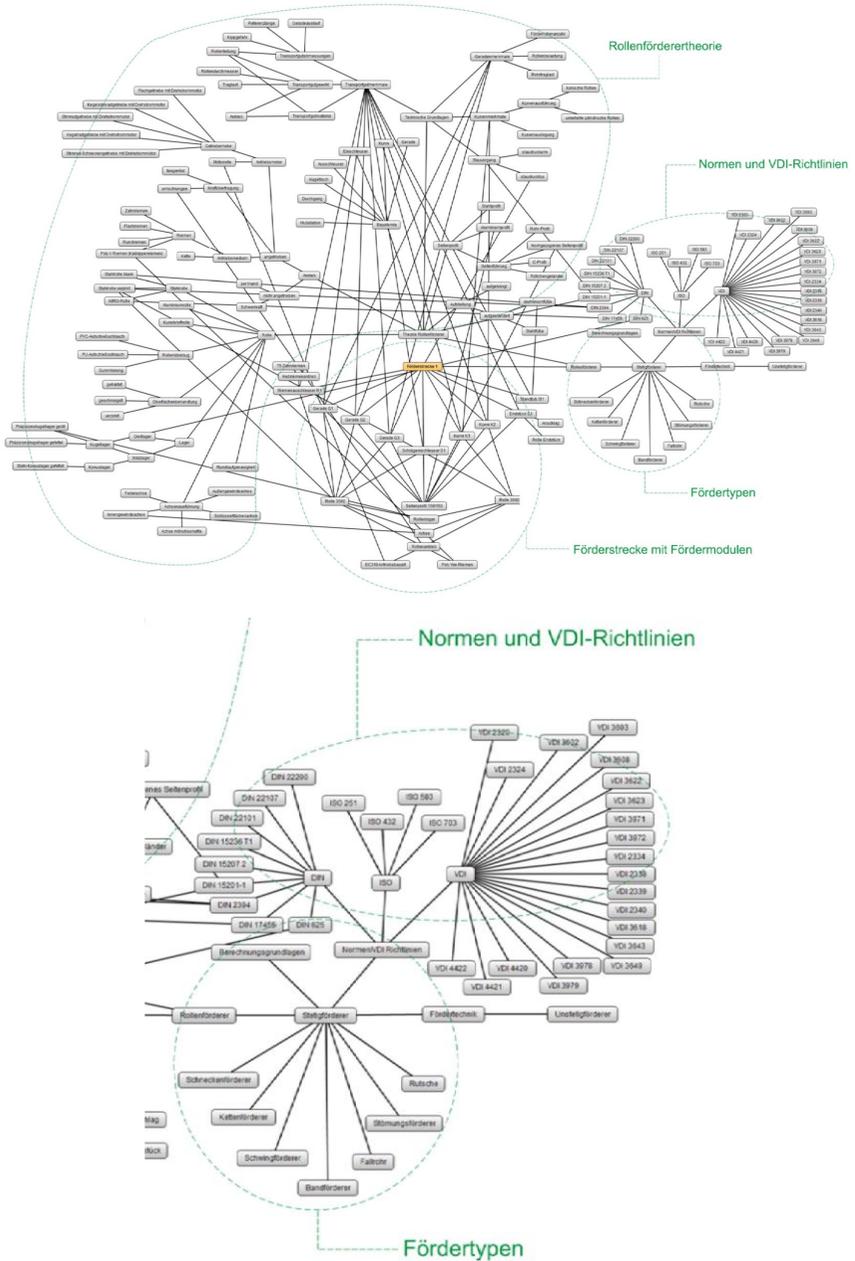


Bild 4.31: Ontologie einer Förderstrecke mit Rollenförderermodulen in xKBE-app mit Bezug zur Systematik von Fördertypen, VDI-Richtlinien und entwicklungstheoretischem Kontext

PARAMETER-DSM der ROLLENFÖRDERERSTRECKE

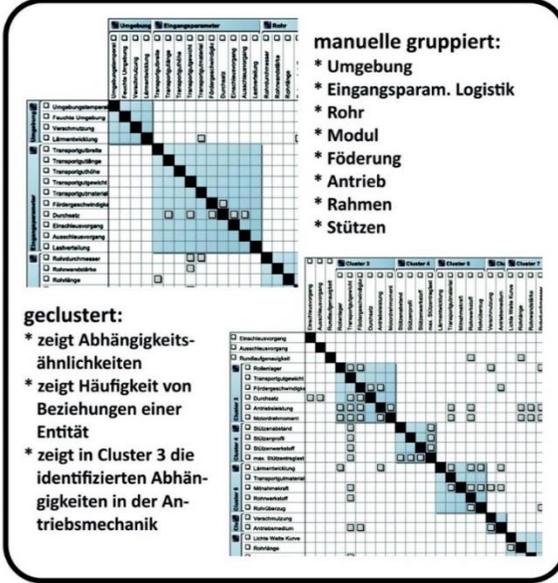


Bild 4.32: Parameter-DSM eines Rollenförderer mit dem „CAM“ [P3]

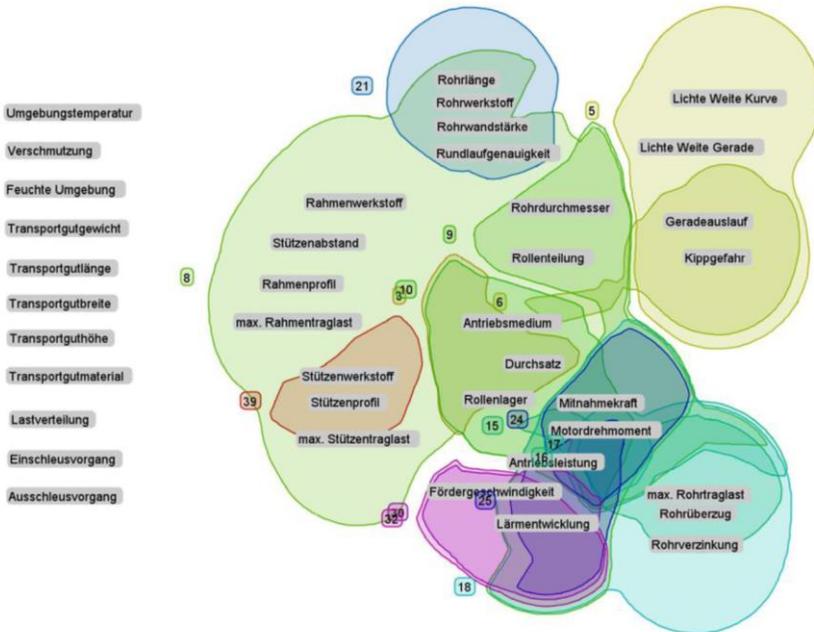


Bild 4.33: Euler-Diagramm von Parametern eines Rollenförderers mit dem SetVisualiser

4.2.3 MKS des Bewegungsverhaltens eines Ladehilfsmittels - CAE

MeB1 bietet eine Auswahlhilfe für den Einsatz von CAE-Berechnungstechniken an Komponenten, Baugruppen, Maschinen und Anlagen der Technischen Logistik – s. Kap. 3.5.1. Für die Auslegung, Optimierung und Nachrechnung von Neu-Anpassungs- und Variantenkonstruktionen kommt mit [VDI 2211] und Bild 3.27 CAE in den Phasen „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ zum Einsatz. Die „A-Berechnungsmethoden“ (nach [VDI 2211]) sollen im Konstruktionsprozess wegen ihrer Aufwendigkeit vermieden werden und so sind B- und C-Berechnungsmethoden einzusetzen.

Für den Rollenförderer stellen sich thematisch unterschiedlichste Aufgaben, die mit CAE berechnet werden können. Nach Bild 3.27 kann daraus ausgewählt werden und im folgenden wird „Funktion optimieren“ einer im Stadium „Ausarbeiten“ befindlichen Konstruktion näher dargestellt, wozu MKS als CAE-Berechnungswerkzeug verwendet wird.

Untersuchungsziele am Rollenförderer sind dann exemplarisch:

- Erstellung erster Grundmodelle für die Stückgut-Stetigfördertechnik - Basisdynamik. Ausgehend von Prinzipstudien wird ein valides Modell erstellt (s. dazu auch „Ergebnisse“).
- Untersuchung der dynamischen Wechselwirkungen Ladehilfsmittel – Förderer in unterschiedlichen Betriebszuständen; Bildung von Lastkollektiven.
- Optimierungen am Förderer (Rollenabstand, Antriebs-Geschwindigkeitsprofile, Energiehaushalt).

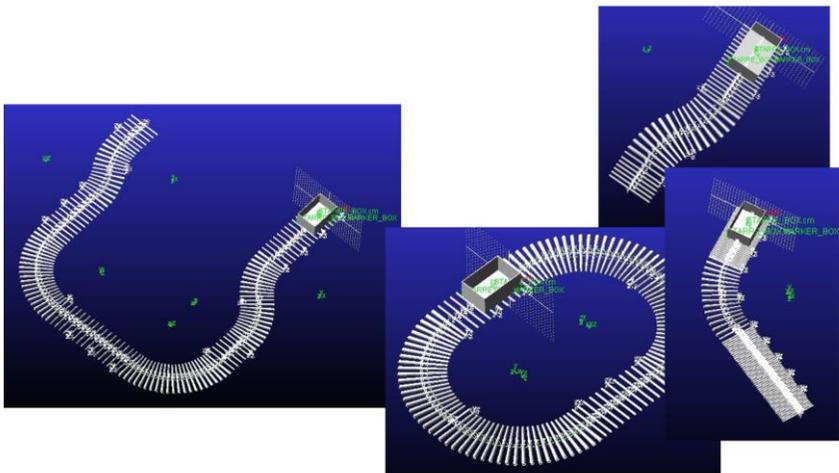


Bild 4.34: MKS Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke; Varianten erzeugt mit Skript-Technik in MSC.ADAMS

Die **Modellbildung** berücksichtigt die Untersuchungsziele und bildet den Rollenförderer aus einer Synthese von einzelnen, validen Submodellen zu

Gesamtmodellen ab²⁶⁴. Die Rollenfördererstrecke wird vorerst ohne Ein- und Ausschleusung dynamisch abgebildet und kann schrittweise um weitere Funktionen des Materialfluss' erweitert werden – induktive Modellbildung. Die Skript-Technik von bspw. MSC.ADAMS hilft zur effizienten Erstellung unterschiedlichster geometrischer Anordnungen der Strecke, Bild 4.34. Sie stellt ein Vorgehen nach MeB3 mit simulation-templates (Makros) dar.

Durch die Erweiterung des MKS mit flexiblen Körpern (FE-Vernetzung des Ladehilfsmittels und Analyse der Kontaktkräfte Ladehilfsmittel-Rollen) gelangt man zur flexMKS. Damit sind nicht nur dynamische Größen, wie bspw. das Verrutschen von Gütern im Ladehilfsmittel in dynamischen Extremzuständen errechenbar. Zusätzlich können durch eine schrittweise überlagerte FE-Analyse auftretende Spannungen und Verformungen von als flexibel definierten Körpern (modal reduziert) ermittelt werden, Bild 4.35. Obwohl der Rechenaufwand dazu ungleich höher als für die Starrkörper-MKS ist, bietet dieser Modellierungsansatz Vorteile. Dazu gehört neben der Analysemöglichkeit (PostProcessing) der auftretenden Spannungen und Verformungen auch das geänderte Bewegungsverhalten von flexiblen Körpern. Durch das Einwirken von Kräften kann der flexible Körper²⁶⁵ seine Geometrie ändern, was v.a. im Bereich von elastischen Nachgiebigkeiten wenig steifer Materialien zu berücksichtigen ist. Daraus resultiert ein gegenüber dem Starrkörper geändertes dynamisches Verhalten. Im Bereich nicht formstabiler Transportgüter, wie bspw. Textilien, müssen nichtlineare Ansätze verwendet werden, die mit der full-flex Technologie, nicht aber mit der modalen Reduktion, modellierbar sind. Gerade hier ist die Berücksichtigung der Formänderung relevant für die Aufgaben mit dem CAE.

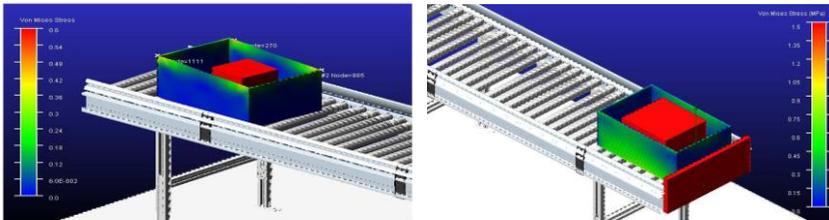


Bild 4.35: flexMKS Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke mit Fahrt gegen Anschlag; Vergleichsspannung im Ladehilfsmittel

Ergebnisse der Modellbildung und Simulation eines Rollenförderers mit MKS geben Aufschluss über die Modellgüte und Abbildungsmöglichkeiten dynamischer Vorgänge am Rollenförderer. Bild 4.36 stellt den zeitlichen Wegverlauf eines simulierten Ladungsträgers auf einer Rollenförderergeraden Messdaten gegenüber. Mit den ermittelten und iterativ angepassten Parametern des MKS-

²⁶⁴ Als Grundmodelle dienen die in Kap. 6.8 und 6.8.2ff. dargelegten Funktionsprinzipien, mit denen sich der Rollenförderer modellieren lässt.

²⁶⁵ In MSC.ADAMS modal reduziert [MSC10], in RecurDyn bspw. auch nodal bzw. full-flex modelliert [REC08].

Modells gelingt eine genügende Übereinstimmung zwischen virtuellem Modell und Prüfstand²⁶⁶.

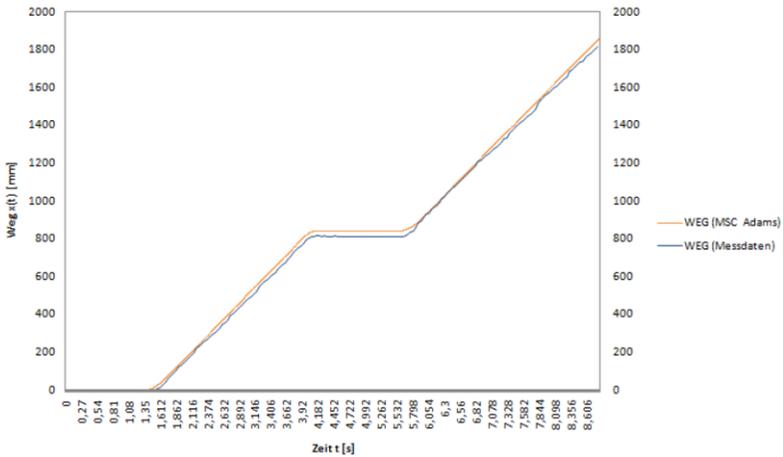


Bild 4.36: Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke, Abgleich Simulation - Messung

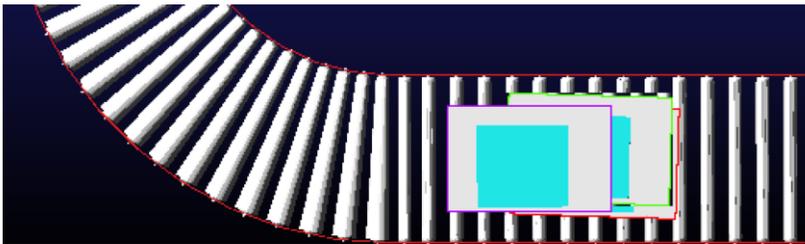


Bild 4.37: Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke, Einfluss der CAD-Importgeometrie auf das Bewegungsverhalten²⁶⁷

Bild 4.37 verdeutlicht die Unterschiede im Bewegungsverhalten, wenn die Rollen des Förderers mit unterschiedlichen CAD-Modellen importiert werden bzw. nativ im MKS erzeugt werden. Insbesondere im Fall der 3D-Kontakte spielt die Kontaktgeometrie der beiden Körper und ihre Diskretisierung eine ebenso große Rolle, wie die Parameter selbst (s. auch Bild 4.37). Daher ist der Abgleich mittels Versuch eine unabdingbare Voraussetzung für aussagekräftige Modelle, wenn nicht nur qualitative Trend-Aussagen sondern quantifizierbare Bewertungsgrößen erzeugt werden sollen.

²⁶⁶ Besonderes Augenmerk sei auf die Übernahme von Parametern aus der Literatur gerichtet. Da stets die modellbildnerischen Einflüsse der beschreibenden Mathematik zu betrachten sind, können Parameter nicht beliebig aus allgemeinen Literaturquellen übernommen werden. Insbesondere im Fall der 3D-Kontakte spielt die Kontaktgeometrie der beiden Körper und ihre Diskretisierung eine ebenso große Rolle, wie die Parameter selbst (s. auch Bild 4.37). Daher ist der Abgleich mittels Versuch eine unabdingbare Voraussetzung für aussagekräftige Modelle, wenn nicht nur qualitative Trend-Aussagen sondern quantifizierbare Bewertungsgrößen erzeugt werden sollen.

²⁶⁷ Rot: Parasolid-Import, grün: Vollkegel im MKS, violett: Hohlkegel im MKS

Ladungsträgerlänge voneinander ab. Mittels Versuch kann zugunsten der richtigen Geometriemodellierung entschieden werden.

Weiterführende Modelle und Analysen mit CAE am Rollenförderer können sein:

- Eine Kombination der Modelle der Förderstrecke (s.o.) mit weiteren Grundmodellen der Funktionen „Ein- und Ausschleusen“²⁶⁸
- Daraus eine Funktionsoptimierung der Ein- und Ausschleusmechanismen.
- Erhöhung der Funktionssicherheit des Förderers durch Simulation mit diversen Fördergutspektren in unterschiedlichen Betriebszuständen
- Über das Themengebiet „Funktion optimieren“ darüberhinaus (vgl. MeB1):
 - „Nichtlineare Materialien beherrschen“ mit FEM (s.o. Anmerkung zu Textilien und weiteren nicht formstabilen Gütern)
 - „Leichtbau“ mit FEM und Lasten aus MKS, oder Kopplung zu flexKMS.
 - „Betriebsfestigkeitsrechnung“ ausgewählter Teile v.a. des Antriebsstrangs mit Lastkollektiven aus MKS-Lastprofilen
 - „Schallentwicklung beherrschen“ mit Beschleunigungsspektren an emittierenden Komponenten des Förderers aus MKS

Der Einsatz von CAE für die o.a. Analyseziele kann als neuartig angesehen werden und ist in der Literatur bisher nicht verbreitet. Insbesondere die Modellbildung mit flexMKS, aber auch Ansätze mit DEM (s. MeB1 – Kap. 3.5.1), sind innovativ und rasch zielführend für eine virtuelle Produktentwicklung in der Stückgut-Stetigförderertechnik.

4.2.4 Nutzen des Methodeneinsatzes

Mit **MeK3** werden der Funktion „transportieren“ Lösungsprinzipien zur Bewertung bereitgestellt die zur Technologieauswahl führen. Einzellösungen sind zu Modulen zusammenfassbar.

Mit **MeK5** wird ein simultaneous engineering zwischen logistischer Planung und konstruktiver Realisierung möglich (MeK1), da durch das KBx schnell umfangreiche Variantenstudien erzeugt werden können²⁶⁹.

Mit **MeB1** wird für „Funktion optimieren“ die geeignete CAE-Technik ausgewählt und darin Modelle gebildet. **MeB3** liefert mit der Makrotechnik eine Vorgehensweise für einfache Bedienbarkeit komplexer CAE-Modelle.

²⁶⁸ Nach Tabelle 6 – Kap. 2.2.13.3 – Submodellsynthese zu gesamten Förderern.

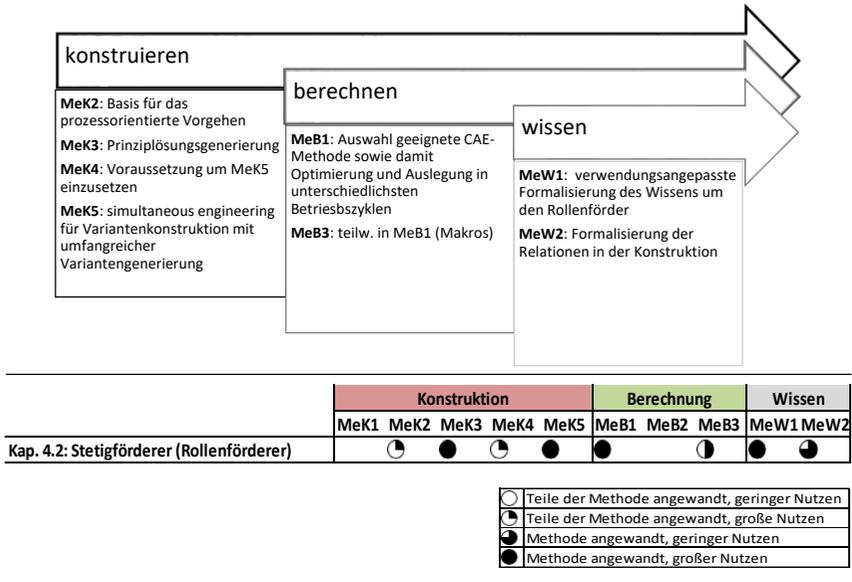
²⁶⁹ **MeK4** ist Voraussetzung für das KBx, um konfigurier- und parametrierbare CAD-Modelle zu erhalten. Gedanklich ist MeK5 somit auch MeK1 zuzuordnen, die das simultaneous engineering von Logistik und Entwicklung propagiert.

MeK2 ist die Basis für den Einsatz der Methoden aus den drei Themenkreisen konstruieren, wissen und berechnen und impliziter Hintergrund für ein prozessgesteuertes Vorgehen.

Mit **MeW1** wird auf unterschiedlichste Weise das Wissen um den Rollenförderer je nach Verwendungszweck formalisiert bzw. erzeugt, um es zu speichern, verteilen oder anzuwenden.

MeW2 detailliert den Umgang mit Wissen in Bezug auf Wissen um die (Detail)konstruktion.

Einen abschließenden, zuordnenden Überblick über den Methodeneinsatz, die Verwendung der Schlüsselpublikationen und die Position der Methoden im PEP gibt Bild 4.38 wieder.



Engineering in der Technischen Logistik											
Methoden und deren Ziele											
Vorgehen nach [VDI 2221]	Phase	Produktplanung PEP-Vorgänger (Start)	Aufgabe klären	Konzeption			Entwurf		Ausarbeitung		Fertigung PEP-Nachfolger
Arbeits-schritte	Ergebnis	1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsansätzen und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten Ausführungs- u. Nutzungsangaben	Produktionsumsetzung		
Haupt- und Nebenziele in jeweiliger PEP-Phase											
P3: Kfz in der Technischen Logistik; Jahrbuch LOGISTIK										MeK2	MeB1
P4: xKBE for material handling equipment; MHWK										MeK4	MeK5
P7: Methoden zur effizienten Anwendung und Verfeinerung von Simulation in der Technischen Logistik; ITI										MeB1	MeB2

Bild 4.38: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Analyse und Entwicklung eines Rollenförderers, Einordnung Schlüsselpublikationen [P3], [P4], [P7]

4.3 Beispiel Sortertechnik

„Insbesondere durch den in den letzten Jahren stark wachsenden Onlinehandel werden an Sortiersysteme hohe Anforderungen bezüglich des Durchsatzes und der Sortierfähigkeit verschiedenster Güter gestellt. ... Neben dem Durchsatz bestimmt auch die Art des zu sortierenden Gutes wesentlich das Sortiersystem. Für gut sortierfähige Stückgüter wie Pakete bis hin zu forminstabilen Beuteln und Gütern mit Bändern bieten die Hersteller Lösungen an.“ [VDI 3619g]

Viele technische Besonderheiten kennzeichnen diesen hochdynamischen einer konstruktiv komplexen Anlage²⁷⁰. Die Ziele der Ausführungen mit den Methoden dieser Arbeit hier sind erweiternd zum Stand der Literatur zu sehen. Sie begegnen den technischen Trends und Herausforderungen von Sortierprozessen in der Distributionslogistik wie folgt²⁷¹:

- Wissensbasierte Anlagenplanung für rasche Angebotslegung
- Leistungssteigerung und Platzreduktion in der Konstruktion
- Beherrschung der Dynamik diverser Güter und Anlagenzustände

²⁷⁰ „Die Funktion „Sortieren“ ist in vielen Prozessschritten der logistischen Prozesskette enthalten und beeinflusst in starkem Maß das Erreichen der logistischen Ziele wie Nullfehler-Strategie, hoher Servicegrad, kurze Durchlaufzeit, hohe Termintreue usw. ... Eine optimale Sortierleistung und Sortierqualität kann nur erreicht werden, wenn die Sortierqualität an die Besonderheiten des Sortiergutes angepasst ist und wenn die Schnittstellen des Sortiersystems zu vor und nachgeschalteten logistischen Prozessschritten optimal ausgelegt sind.“ [VDI 3312]

„Neben der Betrachtung des Durchsatzes in Bezug auf die Geschwindigkeit und Schalenteilung spielt bei der Sortierung von großen Mengen an Stückgütern mit geringem Gewicht auf eine große Anzahl von Endstellen häufig auch der Platzbedarf der Anlage eine wesentliche Rolle. Für diese Anwendungen bieten sich Sorter an, die zwei Förderplatzelemente, d.h. Schalen oder Quergurte, auf einem Fahrwagen besitzen. Durch die doppelte und unabhängige Nutzung der Elemente verdoppelt sich der nominale Durchsatz des Sorters.“ [ARN06]

Neuartige Konstruktionen wie doppelstöckige Sorter oder eine Ausschleusung auf mehreren Ebenen tragen den steigenden Leistungsanforderungen Rechnung. Die Beherrschung der mechanisch-dynamischer Vorgänge dabei ist essentiell, um die Anlagen effizient zu betreiben.

[VDI 3312] bietet eine Klassifizierung von Sortern nach dem lasttragenden Element an. Ausgehend vom Fördersystem über das lasttragende Element wird in einer Taxonomie bis hin zum Ausschleusmechanismus konstruktiv differenziert.

[VDI 3312] und v.a. [VDI 3619] fokussieren nicht auf die mechanischen Bewegungsvorgänge im/am Sorter und im/am Transportgut. Dies führt [JH12] weiter aus, indem grundlegende physikalische Ansätze und die Wirkprinzipien beschrieben werden. [WIL98] und [DRO95] untersuchen mit Ingenieurmethoden die Auslegung und Gestaltung von Antriebssystemen bzw. Vorgänge an Kippelementen an Stückgutsortieranlagen.

²⁷¹ Besonderheiten bei Spezialanwendungen – wie Briefsortierung, Gepäcksortierung usw. – sind mit ähnlicher Vorgehensweise beherrschbar. Ergänzend zu der am Institut aktuellen richtungsweisenden Forschung zur Vereinzelung s. [FWJ13] und Kap. 6.8.3 und Bild 6.53 sowie die Methodik mit DEM in Kap. 6.8.7.

4.3.1 Konstruktion²⁷²

Mit MeW1 kann die MindMap als Wissenswerkzeug in der konstruktiven Phase „Aufgabe klären“ (nach [VDI 2221]) identifiziert werden. Ihre Bestandteile sind Begriffe, die in dieser frühen Entwicklungsphase einen Über- und Einblick in konstruktive Ausprägungen geben und in die Phase „Konzeption“ hineinreichen. Die MindMap ist ihrer Natur gemäß inhaltlich nicht vollständig und gibt nur die Begriffe, nicht aber die Attribute, Werte und Beziehungen zwischen Wissensobjekten wieder.

Bild 4.39 gibt konstruktive Ausprägungen der Sorter-Varianten in einer bekannten Gliederung²⁷³ wieder und kann zur prinzipiellen Konzeption eines neu zu entwickelnden Verteilförderers herangezogen werden. In der Phase der Aufgabenklärung lassen sich so einzelne konstruktive Lösungen übersichtlich überblicken und nach den Forderungen der Aufgabenstellung frühzeitig ausschließen.

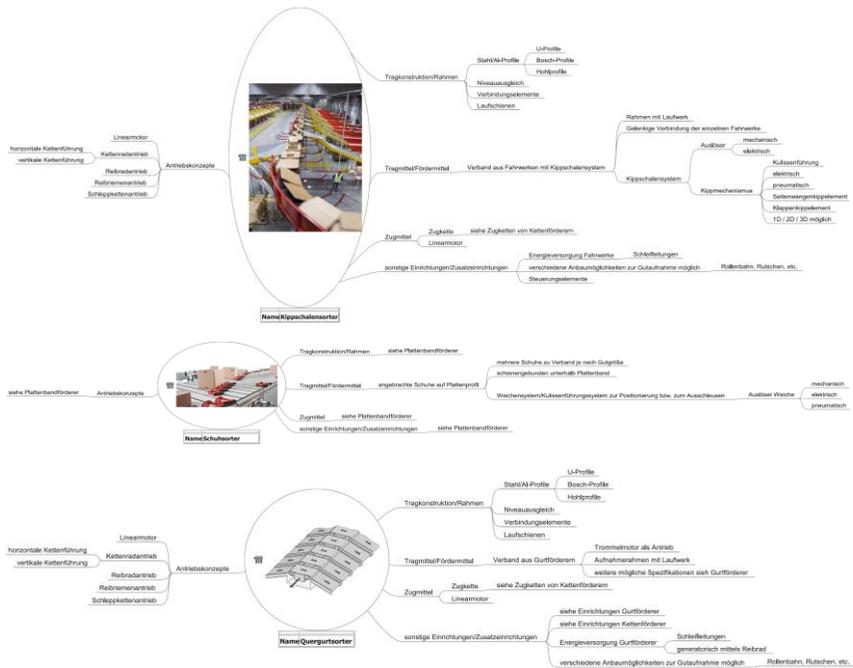


Bild 4.39: MindMaps des Grundaufbaus von Kippschalen- Schuh- und Quergurtsortern

²⁷² Für die Erarbeitung von Ergebnissen dieses Abschnittes danke ich meinen Bacheloranden Thomas Wagner, Mark Reiterer und Gerhard Robier im Rahmen des Bachelorprojekts 2012.

²⁷³ Die Gliederung der in Bild 4.39 dargestellten MindMaps von Verteilförderern erfolgt nach dem in [JH12] vorgestellten Ansatz in: Tragkonstruktion/Rahmen, Tragmittel/Fördermittel, Zugmittel, Antriebskonzepte, sonstiges.

Anknüpfend an die MindMaps zur **Aufgabenklärung** und ersten Konzeption ist mit MeK3 und dem automatisierten morphologischen Kasten eine Variantengenerierung von Prinziplösungen möglich. Dabei sind Ausschlusslogiken in der Morphologie hinterlegt, um nur physikalisch wirksame Varianten weiter zu detaillieren. Die Module Antrieb, Gutaufnahme, Fördermittel und Ausschleusmechanismus einer Sortieranlage müssen die in Bild 4.40 angegebenen Hauptfunktionen erfüllen. Daraus sind dann schrittweise Varianten durch Spezifikation von Wirkprinzipien zu den geforderten Funktionen generierbar²⁷⁴. Nicht mögliche weitere Varianten werden durch die Logik durchgestrichen dargestellt, gewählte Ausprägungen sind grün. Mit der dem morphologischen Kasten nachgeschalteten Nutzwertanalyse können die generierten Varianten rasch und einfach nach unterschiedlichen Kriterien bewertet und zur weiteren Detaillierung ausgewählt werden.

Modul	Funktion	Variante				
Antrieb	Energie zur Verfügung stellen	Elektrische Energie Leistung	<input type="checkbox"/>	Elektrische Energie	<input type="checkbox"/>	Potentielle Energie
	Umwandlung in mechanische Energie	Mechanische Wandlung Elektronmotor	<input checked="" type="checkbox"/>	Strom	<input type="checkbox"/>	Gravitationsenergie
	Übertragen der mechanischen Energie auf das System	Formschluss Kontaktpunkt	<input checked="" type="checkbox"/>	Verbrennungsmotor	<input type="checkbox"/>	Reibliche Energie
Gutaufnahme	Gut auf vorgegebenen Ort der Gutaufnahme bewegen	Formschluss Kontaktpunkt	<input checked="" type="checkbox"/>	Formschluss Schleppschneckenantrieb	<input type="checkbox"/>	Formschluss Schleppschneckenantrieb
	Gut für Transport Führer führen	Griffschluss Durch Reibung wird Gut fixiert	<input type="checkbox"/>	press. gleiten	<input type="checkbox"/>	Handanlenkung
Fördermittel	Gut über Fördermittel von A nach B bewegen	Mechanische Bewegung Reibschnecke - Gut mit Reibtrichterbewegung zum Fördermittel	<input type="checkbox"/>	durch Einschleusung gelangt das Gut mit einer Reibtrichterbewegung auf die Gutaufnahme	<input type="checkbox"/>	Gravitationsenergie
	Betätigen des Ausschleusens	Elektronmotor betätigt den Ausschleusmechanismus	<input type="checkbox"/>	Durch Führung wird Gut in Bahngelände	<input type="checkbox"/>	Reibliche Energie
Ausschleusmechanismus	Kontakt mit Gut aufnehmen	Formschluss Kontaktstelle mit der das Gut durch Formschlussbewegung wird in Kontakt und anschließend bewegt	<input type="checkbox"/>	Reibtrichter - Gut ohne Reibtrichterbewegung zum Fördermittel	<input type="checkbox"/>	Reibliche Energie
	Ausschleusen als Vorgang selbst	Formschluss Gut wird durch Verteilförderer anschließend über Tragmittel hinweg	<input type="checkbox"/>	Reibtrichter betätigt	<input type="checkbox"/>	Reibliche Energie
	Gut verlässt Verteilförderer	Formschluss Gut verlässt Verteilförderer durch Gleitkontakt	<input type="checkbox"/>	Kinetische Energie im System wird über kinematische Zusammenhänge genutzt	<input type="checkbox"/>	Reibliche Energie

Funktion	gewählte Variante	Kriterium Energieverbrauch		
		Gewichte	Note	Gewichte*Note
Energie zur Verfügung stellen	Elektrische Energie Strom	45	5	225

Bild 4.40: Auszug aus automatisiertem morphologischen Kasten (nach MeK3) und nachgeschaltete Nutzwertanalyse für die Lösungsprinzipwahl eines Sorters

Im Fortschreiten des methodischen Entwicklungsprozesses nach [VDI 2221] kommt es nach der Auswahl der Lösungsprinzipien zur **Gliederung in Module** und der modularen Struktur, bevor Vorentwürfe erstellt werden können. Zwei Module des Gesamtsystems werden dazu beleuchtet; die allgemeine Gestaltung des Fördermittels, das das Trag- und Zugmittel eines noch näher zu spezifizierenden Verteilförderers bildet und die Gestaltung des Kippmechanismus¹ eines Kippschalen-Verteilförderers.

Der Einsatz des paarweisen Vergleiches als Element der MeK2 ermöglicht am Beispiel der Beurteilung der Funktionalität einzelner Varianten des Fördermittels eine objektive Beurteilung. Unter Aspekten, wie bspw. „Funktionalität“ in Bild 4.41, werden die einzelnen konstruktiven Realisierungsvarianten paarweise verglichen. Weitere Aspekte sind Wartung, Energieaufwand und Kosten. Für die Ermittlung des Gesamtranges bezüglich eines Aspektes (siehe Tabelle in Bild 4.41) einer Variante, werden die Einzelränge jeder Bauart aus dem paarweisen Vergleich herangezogen und aufsummiert.

²⁷⁴ Nicht unbedingt sequentiell von oben nach unten im Morphologischen Kasten, da die Ausschlusslogik ein „Springen“ zulässt.

Der Gesamtrang unter Einbindung aller Aspekte (siehe Tabelle 5, roter Hintergrund) wird schlussendlich aus den Gesamträngen der einzelnen Aspekte ermittelt. Die Anzahl der Varianten (hier 4507) bedingt den Einsatz von Software zur Durchführung und Übertragung der Einzelergebnisse aus dem paarweisen Vergleich in die Summenbildung.

Ein weiteres Modul des Kippschalensorters ist der Kippmechanismus mit dem Kipptrieb. Hier stehen den unterschiedlichsten konstruktiven Lösungen und Lösungsprinzipien verschiedene Antriebsarten zur Verfügung. Matrixbasierte Methoden sind geeignet, eine Funktionszuordnung abzubilden. Bild 4.42 zeigt eine solche Zuordnungstabelle als DomainMappingMatrix, die mögliche Kombinationen von Antrieben mit Mechanismen angibt²⁷⁵.

Fördermittel (Funktionalität)	Fördermittel (Funktionalität)								
	Rollenkette	Rollenförderkette	Zahnriemen	Gummiblockkette	2D / Fahrwagen als Kette	Kreuzgelenkkette	Steckbolzenkette	3D / Fahrwagen als Kette	autonomes Fördermittel
Rollenkette	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Rollenförderkette	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Zahnriemen	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Gummiblockkette	1	0	1	1	-1	0	-1	-1	0
2D / Fahrwagen als Kette	1	0	1	1	1	-1	1	0	0
Kreuzgelenkkette	1	1	1	1	1	1	0	-1	-1
Steckbolzenkette	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1
3D / Fahrwagen als Kette	1	1	1	1	0	0	1	0	0
autonomes Fördermittel	1	1	1	1	0	1	1	0	0
Summe	7	2	7	2	-4	-5	1	-5	-6
Rang	8	6	8	6	4	2	5	2	1

Variante	Fördermittel	Fördermittelantrieb	Fördermittelführung	Kipptrieb	Kippmechanismus	Kippmechanismen	Summe aus Komponentierung/Funktionalität	Gewichtung Funktionalität	Rangsumme der Komponenten Wartung	Gewichtung Wartung	Rangsumme der Komponenten Energieaufwand	Gewichtung Energieaufwand	Rangsumme der Komponenten Kosten	Gewichtung Kosten	Summe aus Gesamträngen der Bewertungen	Gesamtwertung
1	Rollenkette	Stehender Antrieb Linearmotor	Kettenführung	Weiche	2D feste Kippachse	Einfachschalig	6,1	4735	3,7	2362	2,9	1736	2,0	22	2449	2562
2	Rollenkette	Stehender Antrieb Linearmotor	Kettenführung	Weiche	2D feste Kippachse	Doppelschalig	5,5	4585	4,0	3164	2,9	1736	2,4	130	2627	3021
...
846	Gummiblockkette	Stehender Antrieb Reibradtrieb	Zahnriemenführung	ungesteuert	wechselnder Kippachse	Einfachschalig	5,5	4608	3,2	1283	2,5	541	2,3	95	1857	1230
847	Gummiblockkette	Stehender Antrieb Reibradtrieb	Zahnriemenführung	ungesteuert	wechselnder Kippachse	Doppelschalig	5,0	4254	3,7	2528	2,5	541	2,8	391	2122	1750
...
1481	2D / Fahrwagen als Kette	Stehender Antrieb Schneckenwelle	U-Profil	Zahnstangenführung	2D feste Kippachse	Einfachschalig	4,4	3383	2,5	193	3,0	1856	3,4	1167	1761	1019
1482	2D / Fahrwagen als Kette	Stehender Antrieb Schneckenwelle	U-Profil	Zahnstangenführung	2D feste Kippachse	Doppelschalig	3,9	2189	3,0	719	3,0	1856	3,9	2286	1758	1009
...

Bild 4.41: Paarweiser Vergleich und Summe der Bewertungsergebnisse eines Aspekts (Funktionalität: Auszug) von Varianten des Fördermittels eines Sorters

²⁷⁵ Die Verarbeitungsverfahren für die Matrizen (Banding und Clustering der DSM) sind im quasi trivialen Fall der Zuordnung von Bild 4.42 nicht einzusetzen. Sie dienen dann der Beherrschung von großen Baugruppenstrukturen mit unzähligen Modulen und Submodulen, um Abhängigkeiten aufzuzeigen (s. auch Kap. 2.2.12.2). Die Auswirkungen der unterschiedlichen Kippmechanismen und die (Rück)wirkungen der Antriebe sind Gegenstand von Untersuchungen des CAE in der Phase „Ausarbeiten“. Kap. 4.3.3.3 und Kap. 6.8.6 gibt Einblick in die Modellbildung und Simulation dazu und stellt ausgewählte Erkenntnisse dar.

		Kippmechanismus				
		2D feste Kippachse	2D verschiebbare Kippachse	2D wechselnde Kippachse	3D feste Kippachse	3D verändernde Kippachse
Kippantrieb	Weiche	X	X		X	X
	Kulissenführung	X	X			
	Zahnstangenführung	X	X			
	Zylinder	X		X		

Bild 4.42: Zuordnungstabelle in Form einer DMM der Antriebe zu Mechanismen

Der folgende Abschnitt behandelt Möglichkeiten der Effizienzsteigerung des Konstruktionsprozesses mit automatischer Konstruktion KBx, wenn es sich um eine Varianten- und Wiederholkonstruktion handelt, und nicht neue Ansätze im Rahmen der Neukonstruktion verfolgt werden, wie in diesem Abschnitt dargestellt.

4.3.2 KBx mit KBSD und KBL:

Mit MeK5 ist die Eignung einer konstruktiv-entwickelnden Aufgabe für KBx, also die differenzierte automatische Konstruktion feststellbar.

Die Arbeiten in [P11] und [SCH16] geben Einblick in die automatische Konstruktion von Sortiersystemen. Exemplarisch wird hier die Maschinendimensionierung mit KBSD und das Anlagenlayouting mit KBL dargestellt. Beide KBx-Ansätze greifen ineinander, (Bild 4.43).

Mit **KBSD** kann eine Vordimensionierung der Sortieranlage durchgeführt werden. Ziel der Ansätze ist dabei, die im KBL gelayoutete Grundgeometrie der Anlage soweit mit konstruktiven Details (teil)automatisiert aus Geometriegenerierung und Datenbanken zu detaillieren, dass daraus maschinentechnische Berechnungen der Leistungsdimensionierung erstellt werden können. Dazu kommen die Berechnungsgrundlagen von [JH12] und [VDI 3619] zum Einsatz. Für die CAE-Analyse einzelner Vorgänge, wie bspw. des Kippens der Kippaschen, liefern die KBSD-CAD-Baugruppen reduzierte Geometriemodelle. Mit KBSD werden die Varianten von konstruktiven Entwürfen (s. Kap. 4.3.1) bezüglich technischer Merkmale aus den Berechnungsergebnissen rasch vergleich- und bewertbar. Das KBSD ist somit im Bereich der Anpassungs- und Variantenkonstruktion zu sehen und unterstützt den methodischen Entwicklungsprozess im „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“.

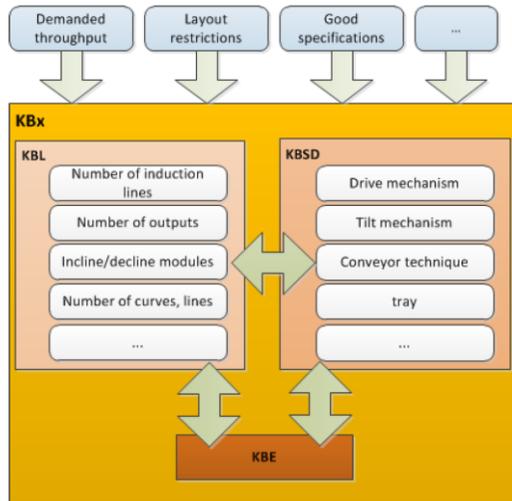


Bild 4.43: KBSD-KBL Interaktion am Beispiel Sortiersystem [P11]

Bild 4.43 zeigt das Zusammenwirken von KBSD und KBL. Mit den Eingangsgrößen bzw. Forderungen der Anlage bzgl. Durchsatz, Layout und Güter wird der Einfluss des Layoutings auf die Gestaltung einiger mechanischer Komponenten der Anlage sichtbar. Diese können wiederum aus dem KBE, der gänzlich automatisierten Geometriegenerierung stammen, oder sie werden in den für die Berechnungsoperationen notwendigen Detailtiefen des KBSD ebendort erstellt. Mit der Berücksichtigung der Gesamtanlage aus dem KBL sind im KBSD dann auch diskrete Entscheidungen bspw. bzgl. der Anzahl zu installierender Teilantriebe prüfbar. Im KBL sind die Hauptparameter der Anlagengestaltung zufolge der o.a. Forderungen die Anzahl von Einschleusungen, Endstellen und die Geometrie.

KBL unterstützt die Anlagenplanung dahin, dass durch das idealerweise drag&drop von materialflusstechnischen Anlagenobjekten nicht nur ein Layout sondern ein 3D-CAD-Modell generiert wird. Dabei sind relevante Informationen der verbauten Teile und Materialien im CAD verfügbar hinterlegt, um daraus in einer frühen Planungsphase haltbare Preise für Angebote zu kalkulieren. Für die Angebotserstellung, beinhaltet [VDI 3619g] auch eine Checkliste für Kunden von Sortieranlagenherstellern, da technische Kenntnisse dazu nötig sind. In der Abstimmung mit den planenden Ingenieuren können so schnell Lösungsvarianten für gegebene materialflusstechnische Parameter erarbeitet werden. KBL kann hier aufgrund der Größe und Komplexität der Anlagen v.a. für die Variantenkonstruktion eingesetzt werden.

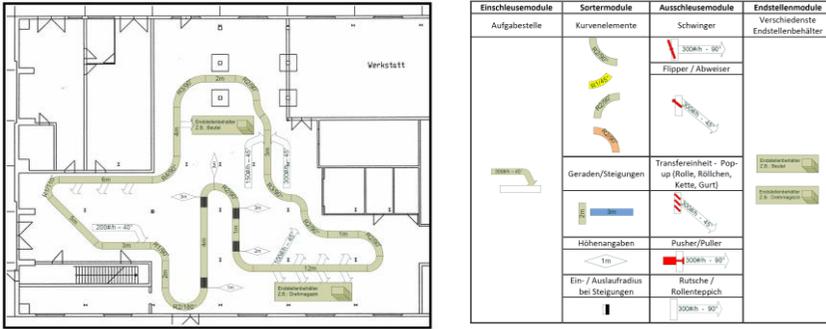


Bild 4.44: KBL-Beispiel: Layoutvariante und Objekte des KBL

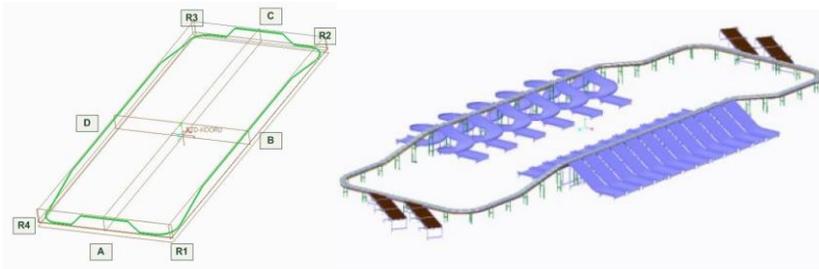


Bild 4.45: KBL-Layoutlinienzug und generierte 3D-Geometrie [SCH16]

Bild 4.44 zeigt Ergebnisse prototypischer Versuche von KBL für Sortieranlagen. Hinter den grafischen KBL-Objekten, die per drag&drop verknüpfbar sind, liegen reale 3D-CAD-Geometrien, die sich dadurch zu einem Layout logisch verbinden lassen. Neben dem Ergebnis der 3D-Geometrie, die durch methodisch erzeugte Baugruppen konfigurierbar ist, werden angebotsrelevante Daten (Materialstücklisten) in einem frühen Planungsprozess verfügbar.

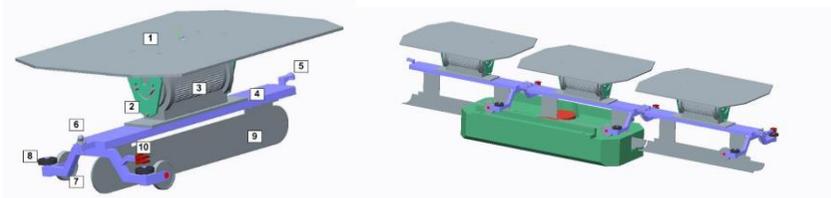


Bild 4.46: KBSD-Sorterwagen zur Antriebsberechnung u. CAE-Grobgeometrieexport [SCH16]

Technisch kann ein solcher KBL-Prozess in jedem modernen high-end CAD-System umgesetzt werden, wenn unterstützend Software zur Berechnung und Bedienerführung (GUI) herangezogen werden. Der Sorter-Loop nach Bild 4.44

liegt dann im CAD abstrahiert als 3D-Linienzug vor, der durch die Objekte des KBL zu realen Maschinen detailliert wird (Bild 4.45). Eine weitere Automatisierung einzelner Objekte der Anlage ist bis hin zu einem KBE Ansatz möglich, für die Anlagenbeschreibung in der Layoutingphase genügt jedoch eine KBSD-Geometriedetailtiefe (Bild 4.46).

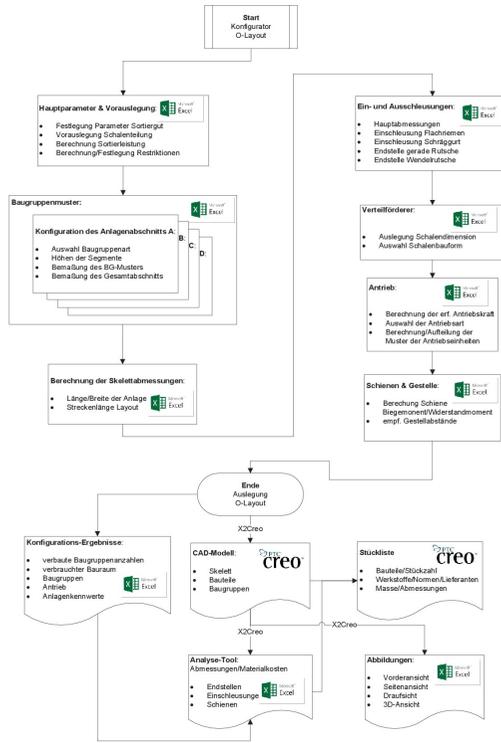


Bild 4.47: KBL-/KBSD-Prozess für eine Sortieranlage [SCH16]

Die technische Funktionsweise des KBL-/KBSD-Systems ist in Bild 4.47 dargestellt.

Bild 4.48 zeigt in einem Prozessablauf, wie das Zusammenwirken von KBL und KBSD zur Angebotserstellung einer Variante ablaufen kann und stellt somit eine Zusammenschau der Checkliste für die Angebotserstellung [VDI 3619g] (Schritt 1) mit der Angebotserstellung durch KBSD/KBL dar.

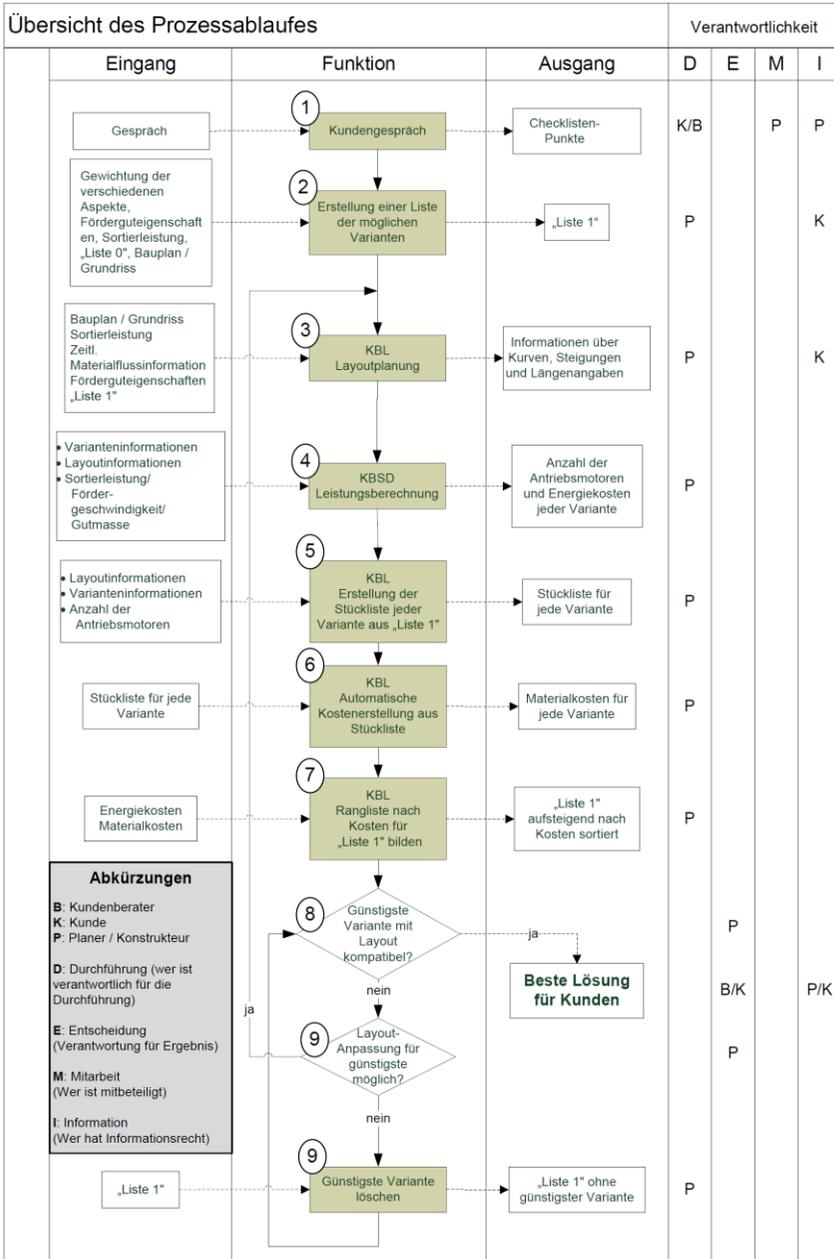


Bild 4.48: Prozess einer KBL/KBSD-Sortieranlagengestaltung

4.3.3 CAE²⁷⁶

Die Mehrkörpersimulation mit flexiblen und starren Körpern ermöglicht die Analyse des Bewegungsverhaltens von Transportgütern auf Sortieranlagen und jenes derer selbst als virtual engineering. Durch die zunehmende Leistungssteigerung der Sortierprozesse und die immer diverseren Transportgüter müssen Anlagen in Kombinationen vieler unterschiedlicher Zustände und Güter sicher beherrscht werden. Dies alles am Prüfstand, oder gar am Kunden, auszutesten ist weder kosten- noch erkenntnisorientiert. Der folgende Abschnitt zeigt erste MKS-Erkenntnisse mit den Methoden dieser Arbeit (Auswahl mit MeB1, Modellbildung und Simulation²⁷⁷ und MeB3) am Beispiel der Sortiertechnik. Dabei werden unterschiedliche Modellbildungsziele verfolgt:

- Zur Antriebsdimensionierung: Verständnis, Beherrschung von Betriebszuständen und Optimierung mechanischer Detailvorgänge (Fahrwerk).
- Zur Funktionsverbesserung (Prozesssicherheit): Verständnis, Beherrschung von Betriebszuständen und Optimierung kombinierter Vorgänge (Ein- Ausschleusen).

4.3.3.1 Varianten von Transportgütern

Vor der Betrachtung der mechanisch-dynamischen Vorgänge an und mit Sortieranlagen, müssen Modelle für die handzuhabenden Transportgüter gebildet werden. Es treten nicht nur unterschiedliche Betriebszustände der förder- und sortiertechnischen Anlagen auf, sondern insbesondere sind die Transportgüter von größter Diversität. Vom formstabilen Kleinladungsträger bis zum folierten Textil (sog. „flats“) müssen Güter mit unterschiedlichsten mechanischen Eigenschaften sicher gehandhabt werden.

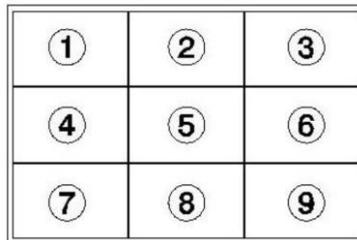


Bild 4.49: Mögliche Schwerpunkts-Einzel-Gutpositionen im Ladehilfsmittel Kleinladungsträger – 9 Sektoren für MKS-Simulation

²⁷⁶ Für die Mitarbeit bei der CAE-Modellerstellung geht Dank an meine Bacheloranden: Franz Michael Eberhard, Christoph Kreis, Emanuel Kerschbaumer, Peter Geiblinger, Alexander Schmid, Patrick Teufel, Gerd Staudacher und Manuel Ulbing im Rahmen ihrer Bachelorprojekte von 2011 bis 2014.

²⁷⁷ Details zur Modellbildung in Kapitel 6.8.3 und dazu die theoretischen Grundlagen in Ergänzung zu Kap. 2.2.8.

Für alle CAE-Analysen von dynamischen Vorgängen an Sortern ist die Kenntnis des Betriebsverhaltens in diversesten Extremkonfigurationen interessant. Neben der Variation der fördertechnischen Parameter des Verteilförderers (Geschwindigkeit und Beschleunigungsverhalten) ist vor allem die Wechselwirkung mit den unterschiedlichsten Gütern zu analysieren. Dazu werden nach der u.a. Aufstellung die folgenden mechanischen Grundparameter der Transportgüter in allen Analysen unabhängig variiert, um so ein breitestmögliches Gutspektrum abzubilden²⁷⁸. Ausgehend von drei verschiedenen Klassen von Gütern ergibt dies alle möglichen Kombinationen aus der u.a. Tabelle 16:

Tabelle 16: Transportgutkategorien für die MKS-Simulation an Sortieranlagen

TRANSPORTGUT-KATEGORIE	Reibungskoeffizient []	Gutposition im Ladehilfsmittel	Masse [kg]
Ladehilfsmittel (LHM):	0,02 – 0,5	9 „Standorte“ und bis zu 9 Einzelgüter (s. Bild 4.49)	0 – 50
Formstabilisiertes Einzelgut	0,02 – 0,5	-	0 – 50
Flexibles Einzelgut	aktueller Forschungsgegenstand, noch keine Erkenntnisse, Ansätze mit flexMKS (modal reduziert und nodal) sowie DEM (s. Kap. 6.8.3) oder MTT 3D von RecurDyn [FUN13].		

4.3.3.2 Fahrverhalten von Kippschalensortern:

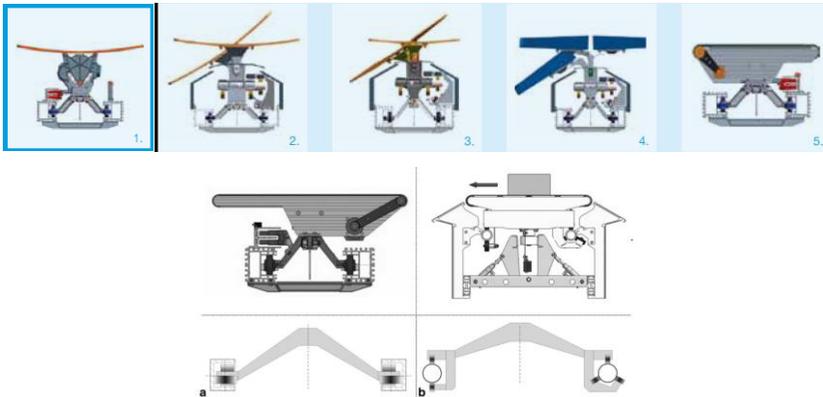


Bild 4.50: Kippschalensorterrfahrwerke – Auszug Produktprogramm [BEU15] oben und Führungsvarianten unterschiedlicher Fahrwagen (a U-Profil, b Rundprofil) [JH12] unten

²⁷⁸ Umfassende Simulationsstudien mit verallgemeinerbaren Aussagen müssen natürlich nach den gültigen Prinzipien von bspw. DoE statistisch abgesichert sein [SBH10]. Die schwerpunktmäßigen Betrachtungen hier genügen diesen Ansprüchen noch nicht.

Verteiltörderer mit durchgängigen Trag- und Zugmitteln können in geschlossenen Umläufen angeordnet sein. „Ein Großteil der Verteiltörderer basiert auf dem Prinzip Kette als Zugmittel. Es sind vertikale und horizontale, zwei- und dreidimensionale Kettenführungen möglich. Entsprechend ergeben sich Linien- oder Ringtopologien.“ [JH12] Die einzelnen Fahrwagen können in unterschiedlichen Profilen formschlüssig geführt werden, s. Bild 4.50.

Der Verteiltörderer ist gesamt ein Verbundsystem der einzelnen Fahrwagen mit deren Tragorgan, dessen Verhalten von den einzelnen Wagen bestimmt wird. Folglich ist die Betrachtung eines einzelnen Fahrwagens sinnvoll, um induktiv auf das Gesamtverhalten schließen zu können. Untersuchungsziele am und mit dem Fahrwerk des Sorterfahrwagens (Bild 4.51) mit MKS sind:

- Einfluss der Geometriemodellbildung (Importprozesse) auf das Fahrverhalten am Schienenfahrwerk und der Simulationsabgleich
- Bestimmung von Reibungs- Spurführungs- und ggf. Zwangskräften bei geometrischen Störungen an den Schienen
- Virtuelles DoE für spurkranzgeführte Fahrwagen

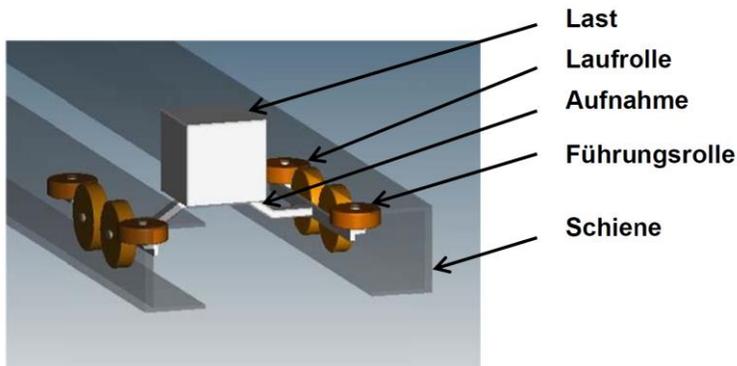


Bild 4.51: Sorterfahrwagen in U-Profil-Führung – MKS-Modell in MSC.ADAMS

Mit dem MKS-Modell können erste Erkenntnisse zu den wirkenden Kräften gewonnen werden und die Auswirkungen von Design- und Antriebsänderungen untersucht werden. Von Interesse sind dabei besonders Kräfte in außergewöhnlichen Betriebssituationen wie bspw. Notstopps mit Leer- und Vollast oder das Verhalten des Wagens bei Diskontinuitäten der Führungskanäle. Kritisch ist in der Modellierung die richtige Abbildung und Diskretisierung der CAD-Kontaktgeometrien²⁷⁹. [JH12] und [WIL98] führen Berechnungsgrundlagen zur Berechnung von Antriebsleistungen an Verteiltörderern ein. Diese dienen dem Abgleich mit den MKS-Ergebnissen und es konnte bereits eine gute Übereinstimmung erreicht werden.

²⁷⁹ s. auch Bild 4.37 und Anmerkung dort. Optimale Import-Szenarien nach MSC.ADAMS haben sich dabei mit der Verwendung von Parasolid-Geometrien ergeben. Andere Geometrieformate weisen eine zu grobe und nicht beeinflussbare Diskretisierung stetiger Flächen beim Import in MSC.ADAMS auf, dass es bei bspw. Rollbewegungen kreisrunder Körper auf Ebenen Flächen zu hohen Kraftspitzen kommt.

Von den Kranlaufrädern [KPS75] der Fördertechnik, und natürlich den Schienenfahrzeugen, ist das spurkranzgeführte Rad analytisch bekannt. Im Sinne des virtual engineering ist es mittels CAE einfach möglich, die rollengeführten Fahrwagen des Sorters, mit ihren vielen Lagerungen, durch spurkranzgeführte Räder zu ersetzen um die Auswirkungen bzw. die grundsätzliche **Möglichkeit des Einsatzes von Spurkranzrädern für Fahrwagen von Verteilförderern** zu prüfen. Bild 4.52 zeigt den Fahrwagen von Bild 4.51 mit Spurkranzrädern. Eine erste Machbarkeitsanalyse im CAE soll dies beispielhaft prüfen. Ein klassischer Newton'scher Ansatz mit Coulomb'scher Reibung²⁸⁰ ist geeignet, die Modellbildung im Vergleich zur Analytik darzustellen. Die Ergebnisse dienen dem Abgleich mit jenen aus MKS mit MSC.ADAMS, die auf den gleichen physikalischen Grundlagen beruhen, jedoch durch die numerische Lösung und Diskretisierung der Geometrien zu verifizieren sind²⁸¹.

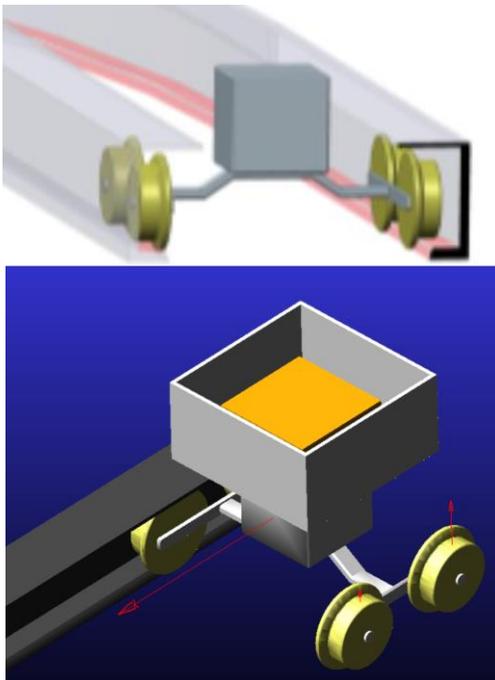


Bild 4.52: Sorterfahrwagen spurkranzgeführt, leer und mit Ladung
– MKS-Modell in MSC.ADAMS

²⁸⁰ Die bekannten Theorien des Rad-Schiene-Kontaktes von Kalker, Carter, Johnson und Vermeulen, die jeweils erweiternd auf die Hertz'sche Theorie aufbauen differenzieren zwischen drei Schlupfarten (Längs- Quer- und Bohrschlupf) und Haft- und Gleitgebieten (Überblick in [POL11]). Sie sind aber aufgrund des geringen Kontaktdruckes des Sorterfahrwagens im Vergleich zum Schienenfahrzeug oder Kranlaufrad nicht für die Modellbildung oder deren analytischen Abgleich geeignet (s. auch [VOL97]).

²⁸¹ Methoden der Verifikation und Validierung s. Kap. 6.9.3.1.

Bei Einprägung einer Zugkraft im MKS-Modell, die der installierten Leistung des Verteilförderers entspricht und die über die einzelnen Fahrwagen in deren Anlenkpunkten eingebracht wird, ergibt sich eine optimale Übereinstimmung der dynamischen Grundgrößen zwischen Analytik und MKS. Auch nach längeren Simulationszeiten stimmen die Endgeschwindigkeiten, die sich aufgrund der Reibverhältnisse einstellen, und die zurückgelegten Wege überein.

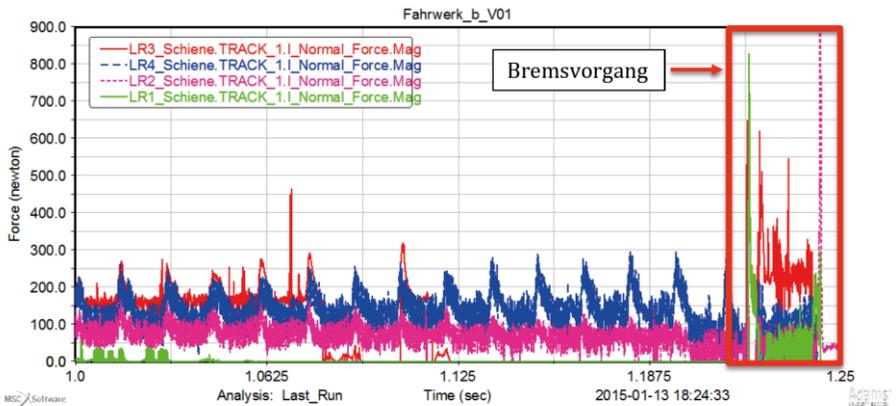


Abbildung 6.25: Bremsverlauf Räder Szenario 3

Bild 4.53: Radkontaktkräfte zu den Schienen bei Kurvenfahrt und beim Bremsen

Bild 4.53 zeigt Dynamikergebnisse des Modells beim Durchfahren einer Kurve und eines Bremsvorganges darin. Die kurveninneren Räder sind aufgrund der Fliehkraft entlastet (LR1 und LR2) und aufgrund des starren Fahrwagens ist LR1 infolge der Verlagerungsbewegungen der konischen Räder teilweise sogar kontaktkraftfrei. Die Einleitung eines Bremsvorganges bei 1,2 s durch Blockieren der Räder verlagert den Wagen innerhalb der Schienen derart, dass das vordere kurvenäußere LR3 eine Lastspitze erhält und die anderen Räder weitestgehend gleich belastet bleiben. Die Schwankungen der Radkräfte vor 1,2 s sind einerseits aus dem Sinuslauf des Fahrwagens aber auch aus dem o.a. Geometrieimport begründbar. Weitere Ziele zur Modellverbesserung können die feinere Diskretisierung der Geometrie sowie ein flexibler Wagen sein, bevor vom Einzelwagen auf einen Verteilförderer synthetisiert werden kann. Grundsätzlich ist mit dem so erweiterten MKS-Modell eines Sorterfahrwagens aufgezeigt, wozu eine Modellbildung und Simulation bei richtiger Auswahl durch MeB1 dienen kann. Ob eine Konstruktion mittels spurkranzgeführter Räder technisch und ökonomisch sinnvoll ist, ist natürlich Beurteilungsgegenstand weitreichenderer Betrachtungen.

4.3.3.3 Zufördern und Einschleusen auf Sorter

„Die Frage der Stückgutzuführung oder Einschleusung auf Stetigförderer ist nicht nur in der Sortierung, sondern generell in der gesamten Materialflusstechnik sehr komplex. Systeme unterschiedlicher Eigenschaften müssen miteinander verbunden werden und die Stückgüter mit minimalen Beanspruchungen und

Übergabezeiten vom einen zum anderen System wechseln. ... Durchsatz lässt sich durch Hinzunahme einer zweiten Einschleusstelle nicht verdoppeln.“ [JH12]. Daher ist besonderes Augenmerk auf die Beherrschung dieser hochdynamischen Vorgänge zu legen. Dazu ist die Modellbildung und Simulation mit MKS ein probates Mittel, um umfangreiches virtuelles Design of Experiment durchzuführen.

Mit MeB1 kann dafür die MKS mit bspw. MSC.ADAMS als probat gefunden werden (Dynamikberechnung von Prinziplösungen mit einer B-Methode). Im Folgenden werden zwei automatisierte Einschleusarten auf Verteilförderer von Sortieranlagen betrachtet, die beide dem Prinzip Winkeleinschleusung zuzurechnen sind. Die Hochgeschwindigkeitseinschleusung [OFF08] hier als Kombination von form- und kraftschlüssigen Beschleunigungseinrichtungen für Stückgüter und eine konventionelle Winkeleinschleusung mit Riemen bzw. Gurt. Die Herstellung der richtigen Orientierung der Güter wird hier noch nicht betrachtet, ist im MKS aber abbildbar.

Die Modellbildung und Simulation an den Sortieranlagen verfolgt die allgemeinen Ziele nach Antriebsdimensionierung und Funktionsverbesserung, Optimierung mechanischer Detailvorgänge und Verbesserung der Prozesssicherheit durch Verständnis und Beherrschung diversester Betriebszustände (s. Beginn Kap. 4.3.3). Die Schaffung einer Modellbasis valider Submodelle ist ein Ziel aller CAE-Ansätze, um aus diesen gültige Gesamtmodelle zu erstellen. Die Modellbildung mit MKS der **Hochgeschwindigkeitseinschleusung** (modifiziert bspw. wie [OFF08]) hat folgende Ziele im Detail:

- Funktionsprüfung des neuartigen Prinzips
- Spezifikation von Geschwindigkeitsprofilen und Abstimmung der einzelnen Antriebe
- Analyse und Beurteilung der wirkenden Kräfte auf die Güter
- Visualisierung des Vorganges

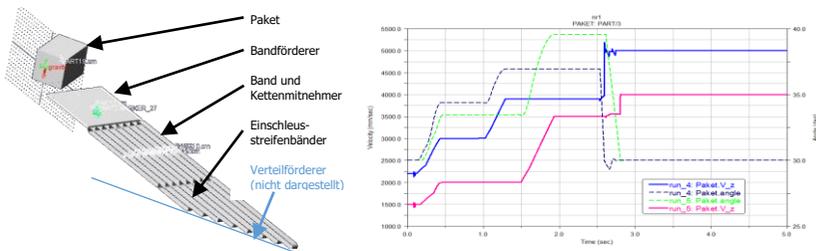


Bild 4.54: Hochgeschwindigkeitseinschleusung in MKS (MSC.ADAMS) und Bewegungsergebnisse

Abgebildet wird ein Paket (formstabiles Einzelgut) mit den Variationsmöglichkeiten entsprechend Zeile zwei von Tabelle 16²⁸². Die Ergebnisse in Bild 4.54 zeigen das kinematische Verhalten (V_z) und die

²⁸² Die Modellbildung der Riemen, Bänder und Ketten erfolgt mit den Modellansätzen und Grundfunktionen von Kap. 6.8.4.

Orientierung (angle) des Pakets bei seiner Bewegung auf der Einheit. Es zeigt sich, dass die Verdrehung des Pakets stark von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Förderbändern abhängt. Die Mitnehmer gleichen diese Verdrehungen später wieder aus, wenn eine maximale Geschwindigkeit nicht überschritten wird und ausreichend Strecke mit den Mitnehmern zur Verfügung steht. Mit höherer Beschleunigung (blaue Kurven, run_4 im Vergleich zu run_5) stellt sich der geforderte Endwinkel des Pakets von 30° erst später am Kettenmitnehmer ein.

Mit einem breiten Gutspektrum (s. Kap. 4.3.3.1) können die einzelnen Antriebe nun schrittweise aufeinander abgestimmt werden und so der Prozess betriebssicherer gestaltet werden. Neben den kinematischen Zielgrößen kann natürlich auch je Situation der Energieverbrauch u.ä. zur Bewertung der Konfigurationen herangezogen werden²⁸³.

Die Modellbildung der **konventionellen Winkelschleusung** erfolgt nach einem analytischen Modell in 2D, das numerisch gelöst wird ([P11] und [JW10]) und einem 3D-MKS-Modell [JW10]. Die Ziele dabei sind:

- Aufzeigen von Unterschieden in der Modellbildung; prüfen ob eine 2D-Modellierung genügt.
- Abstimmung und Optimierung antriebstechnischer und geometrischer Parameter bei diversesten Gutkonfigurationen (Masse, Reibung, Lastverteilung – s. Tabelle 16 mit einem Paket als formstabilem Einzelgut)

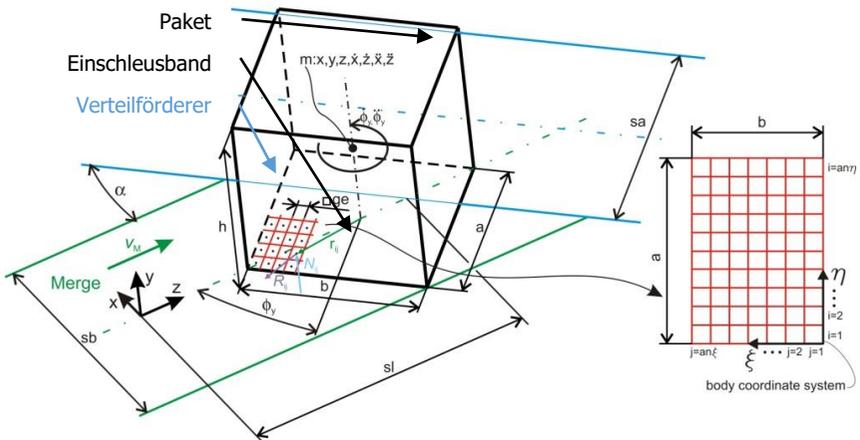


Bild 4.55: Analytische Modellbildung der Winkelschleusung [P11]

Durch das Definieren von eindeutigen Aufstandspunkten, kann das Kontaktverhalten zweier durch ebene Flächen begrenzter Körper performant

²⁸³ In MSC.ADAMS kommt hierzu die skripted Simulation zum Einsatz, um selektiv und sensorgesteuert Kontakte des Pakets zu den einzelnen Bändern an- und abzuschalten. Sie ist eine Umsetzung der MeB3. Nur so ist die Abbildung unterschiedlicher Bandförderer, ohne aufwendige manuelle Erstellung der flexMKS-Modelle, möglich (s. Kap. 6.8.4).

abgebildet werden²⁸⁴. Bild 4.55 zeigt die Zusammenhänge, die Details und die Entsprechungen der Bezeichner sind [P11] zu entnehmen. Die Berechnung der analytischen, beschreibenden Gleichungen erfolgt numerisch in der Umgebung MATLAB/Simulink. Dafür wurde ein GUI angefertigt, um mit dem Grundgedanken der template-driven simulation nach MeB3 eine einfach bedienbare Umgebung, für mit den Simulationsdetails nicht Vertraute, zu schaffen. Die Vorgehensweise dazu ist einer nach [VDI 2211] klassifizierten A-Berchnungsmethode zuzurechnen, die erheblichen Aufwand und Detailwissen benötigt. Mit dem GUI Bild 4.56 wird daraus im Sinne der MeB3 eine C-Methode; Details zur Modellbildung und zur Bedienung (GUI) zeigen Bild 4.55 und Bild 4.56.

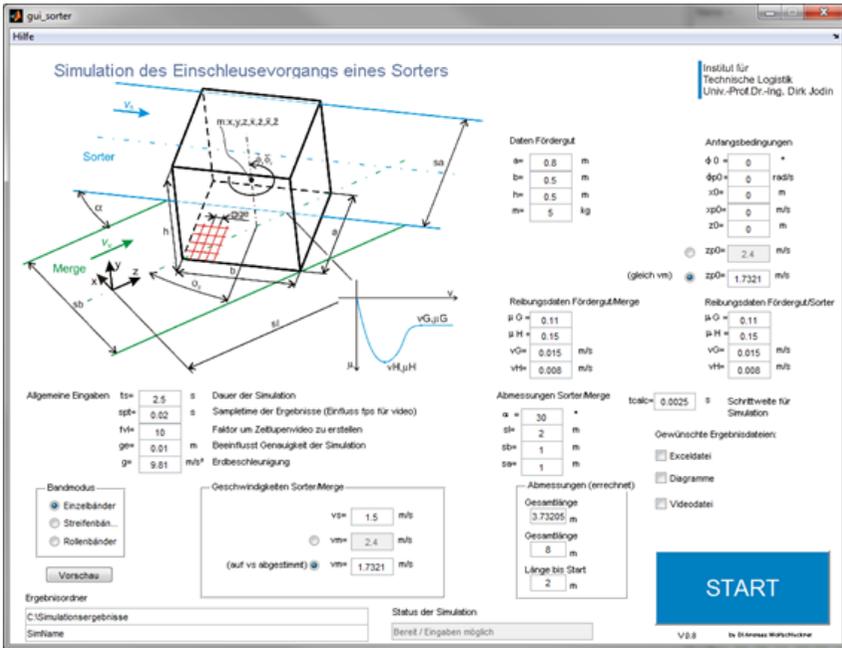


Bild 4.56: GUI der template-driven simulation mit MeB3 der Winkeleinschleusung [P11]

Die Betrachtung des Vorganges der Winkeleinschleusung mittels MKS²⁸⁵ (eine B-Methode nach [VDI 2211]) ist insbesondere für die Abbildung von Bändern und Riemen nicht ohne weiteres möglich. Bild 4.57 zeigt das Modell in MSC.ADAMS im Status des Pre-Processings. Das zufördernde Band ist genauso wie der

²⁸⁴ Die Aufstandspunkte sind in Form von Kalotten in definierbaren Bereichen des Paketbodens angebracht. Dadurch sind eindeutige Kontaktpunkte festgelegt, die für die analytische Modellbildung als auch die automatische Kontaktbildung geeignet sind. Diese Definition ist in der analytischen Modellbildung präzisierbar und es können mehrere Aufstandspunkte modelliert, bzw. deren Positionen variiert werden.

²⁸⁵ Modellbildnerische Grundlagen s. Kap. 6.8.

Verteilförderer als ebene Unterlage modelliert²⁸⁶, da nur die Platzzuordnung des Pakets auf dem Verteilförderer interessiert und dessen weitere Detaillierung wie Abbildung der Kippschalen,... nicht relevant für die Analyse des Platzierungsvorganges ist.

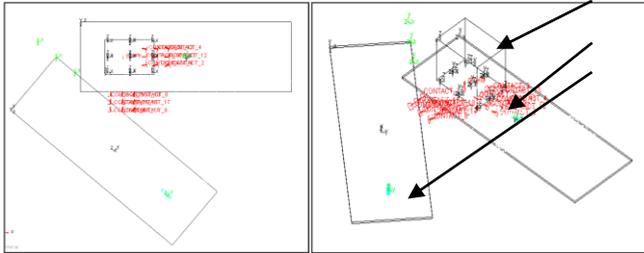


Bild 4.57: MKS-Modellbildung der Winkeleinschleusung in MSC.ADAMS [P11]

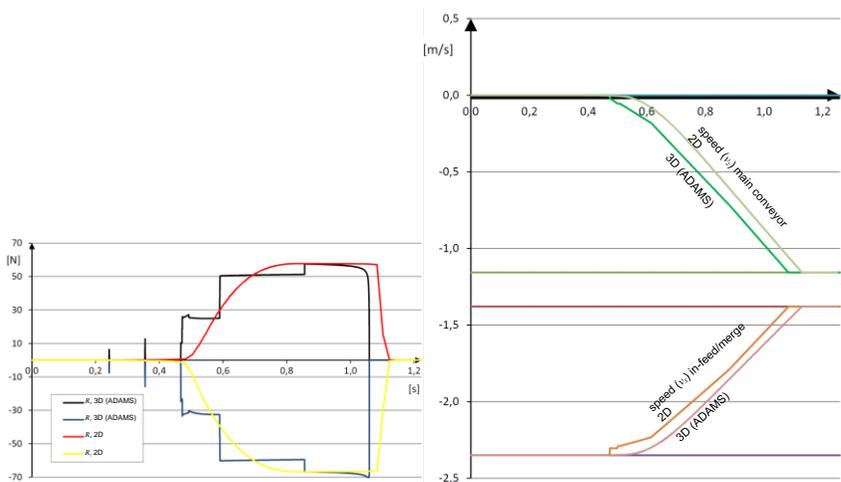


Bild 4.58: Reibkräfte und Geschwindigkeitskomponenten des einzuschleusenden Pakets mit analytischem Ansatz (2D) und MKS-Modellbildung (3D) [P11] – 0,05 s zeitversetzt.

Zu betrachtende Größen, mit denen das Verhalten des auf den Verteilförderer einzuschleusenden Pakets beurteilbar ist, sind die wirkenden Kräfte, insbesondere die Reibkräfte, und die Geschwindigkeitskomponenten des Pakets (Bild 4.58). Das eingeschleuste Paket zeigt in allen Simulationsumgebungen das gleiche Verhalten, wengleich zufolge der analytischen Modellbildung ein gleichmäßiger Verlauf der beiden wirkenden Reibkräfte ausgemacht werden

²⁸⁶ Die Übergabe von einem Band auf das nächste ist durch positionsgesteuertes Kontaktan- und abschalten aufwendig mittels scripting gelöst. Die laut Bild 4.57 somit offensichtlich ineinander eindringenden Bänder Einschleusband und Verteilförderer sind in diesem Überlappungsbereich als kontaktfrei.

kann. Die Unstetigkeiten im MKS folgen aus dem diskreten An- und Abschalten der Einzelkontakte der Aufstandspunkte (s. Fußnote 286). Die dargestellten Geschwindigkeitskomponenten zeigen den Einschleusvorgang mit Zunahme der Paketgeschwindigkeit in Richtung des Verteilförderers (grün) ab 0,5 s. Auffallend ist der spätere Beginn des Einschleusvorganges im 2D-Modell, trotz identer mechanischer Parameter. Aus Darstellungsgründen sind die parallelen Verläufe um 0,05 s zeitversetzt dargestellt. Mittels umfangreicher Parametervariationen der Güter als auch der Antriebe wurden beide Modelle miteinander verglichen. Für die Betrachtung des Einschleusvorganges kann das 2D-Modell mit ausreichender Aussagegüte herangezogen werden, um die Dynamik des Vorganges zu beschreiben. Durch die Implementierung einer einfach zu bedienenden Lösung in MATLAB/Simulink mittels des GUIs ist ein effizienteres Weiterarbeiten mit demselben möglich, als das 3D-MKS-Modell änderbar wäre.

Weitere Aktoren wie Pusher kommen auch im Zuführen bei der Einschleusung zum Einsatz. Deren Modellbildung ist nach ihrer Hauptfunktion, dem Ausschleusen im folgenden Kapitel, zu entnehmen.

4.3.3.4 Ausschleusen von Förderern

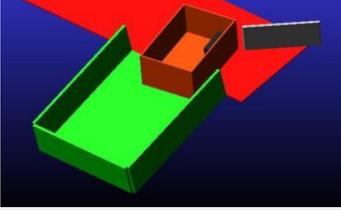
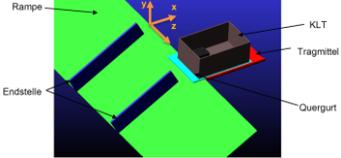
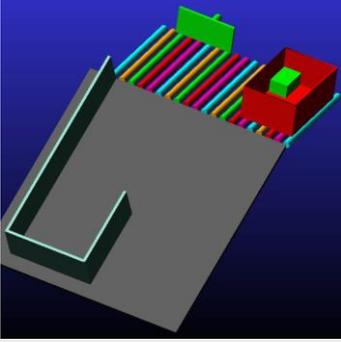
Modellbildung und Simulation, meistens mit MKS, bietet ein virtuelles Versuchsfeld zur Beherrschung des Ausschleusvorgangs von Sortern²⁸⁷ und Förderern. Die in Tabelle 17 dargestellte Modellbasis zeigt die den Technologien zugeordneten Modelle und Details der Modellbildung von Ausschleusemechanismen²⁸⁸. Mit Gesamtmodellen aus Einschleusung, Förderer und Endstelle ist das Verhalten der Güter im gesamten Bereich eines Verteilförderers bzw. Sortiersystems simulierbar. Beim Ausschleusen werden folgende Ziele verfolgt:

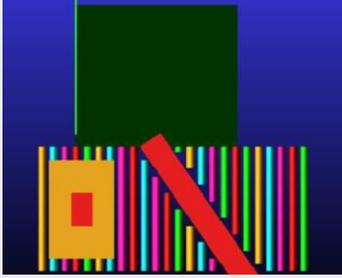
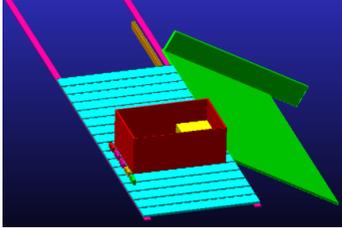
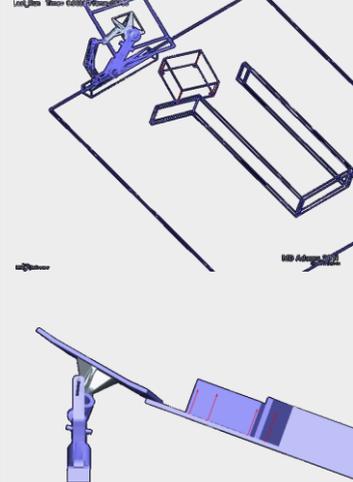
- Endstellen-Geometrie- bzw. Platzminimierung mit unterschiedlichsten Gutarten
- Abstimmung und Optimierung der dynamischen Bewegungsmuster der Ausschleusemechanismen

²⁸⁷ „Die Beherrschung des Ausschleusvorgangs in die Endstelle ist darüber hinaus auch für die Optimierung und Leistungssteigerung des Gesamtsystems von großer Bedeutung. Droste hat die Bewegungsverläufe der Ausschleusung vom Kippschalensorter untersucht ... , Böcker hat sich auf die Bahnkurven auf der Sorterrutsche konzentriert ... , Schmidt auf die rotierenden Schalen des Drehsorters“ [JH12], Sekundärliteratur der erwähnten Autoren ebendort.

²⁸⁸ Die Ergebnisdarstellung an allen Technologien der Simulationen würde den Rahmen hier sprengen; detailliert wird folgend noch der Kippschalensorter.

Tabelle 17: MKS-Modelle (MSC.ADAMS) für Ausschleusvorgänge

Technologie	Bild (MSC.ADAMS)	Beschreibung MKS-Modell (Modellbildung und Analysemöglichkeit)
Flipper		<p>Behälter auf Bandförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Flippermechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
Quergurtsorter		<p>Behälter auf bewegtem Tablar mit Bandförderer zur Ausschleusung mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
Pusher		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Pushermechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
Bandabweiser		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Flipper- und Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>

<p>Gurtransfer</p>		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
<p>Schuhsorter</p>		<p>Behälter auf Bandförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der bewegten Schuhe und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
<p>Kippschalensorter</p>		<p>Kippschalensortewagen mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Kippmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p> <p>Aufstandskräfte als rote Vektoren an den vier vorgegebenen Aufstandspunkten (Kalotten) des Pakets</p> <p>[P11]</p>

Für die Parameter der Modellbildung des Ausschleusens von einem **Kippschalensorter** sind Kategorien bildbar, die beim Variieren der einzelnen DoE-Durchläufe die Übersicht ermöglichen. Es sind dies:

- Dynamik: Reibwerte (Gut-Kippschale und Gut-Endstelle), Geschwindigkeit des Verteilförderers, Schwenkgeschwindigkeit und Bewegungsprofil des Kippmechanismus'.
- Transportgut: Variation von Transportgutgröße, -masse und -art nach Tabelle 16. Weiters kann die Position des Transportguts auf der Kippschale in vier Sektoren variiert werden.
- Endstelle: Neigungswinkel, Öffnungswinkel und vorhandene Lenk- und Leitbauten.

Analysiert wird die „Treffsicherheit“ des Transportguts in die Engstelle bei möglichst minimalen geometrischen Dimensionen derer und möglichst hoher Dynamik des Vorganges mit allen möglichen und sinnvollen Kombinationen aus den zu variierenden Systemparametern.

Bild 4.59 zeigt das Verhalten eines ausgeschleusten bzw. abgeworfenen Pakets von einem Kippschalensorter in eine Endstelle. Die roten Vektoren stellen Kraftwirkungspfeile dar und man erkennt eine Berührung am oberen Leitblech der Endstelle im Übergangsbereich. Im dargestellten Geschwindigkeitsverlauf (absolut) ist die Berührung als ein Verzögerungsvorgang aufgrund der wirkenden Reibung erkennbar. Auffallend ist die geringe Breite der Endstelle, die lediglich 15% größer als die größte Paketdiagonale ist. In allen variierten Konfigurationen hat das Paket die so dimensionierte Endstelle sicher getroffen.

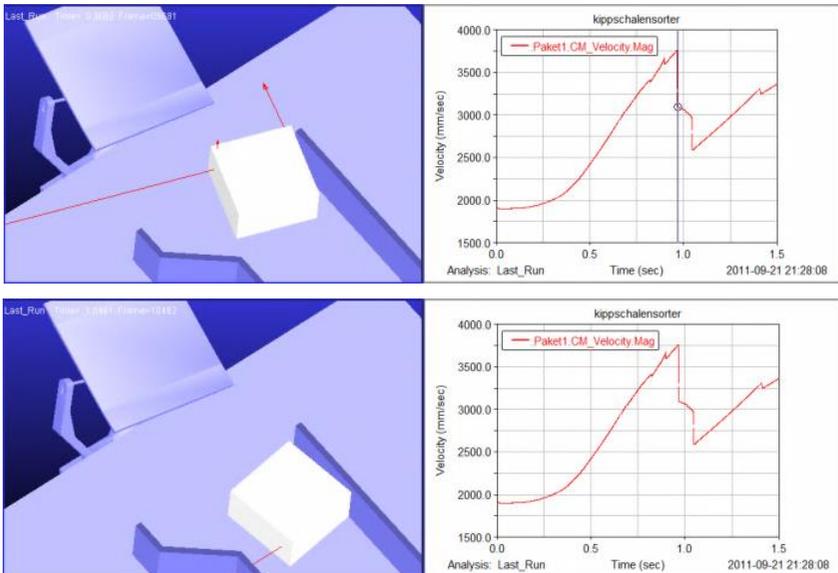


Bild 4.59: MKS-Modell des Abwurfs von einem Kippschalensorter in eine Endstelle in MSC.ADAMS [P11]

Mit ansteigender Reibung kann es zu verzögerten Bewegungen kommen und bei entsprechend hoher Geschwindigkeit des Verteilförderers wird das Treffen in die Endstelle immer kritischer. Bild 4.60 zeigt die Ergebnisse der Variation der Reibungsparameter. Es kann ein sicheres Ausschleusen auch mit hohen Reibwerten (rote Kurve Bild 4.60 mit $\mu_{\text{parcel/tray}} = 0,55 \dots$) festgestellt werden. Mehrfache Berührung gegenüber der einfachen von Bild 4.59 ist dabei nicht ausgeschlossen.

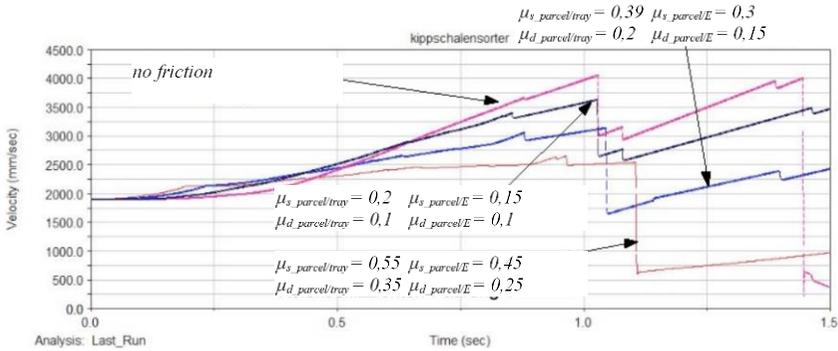


Bild 4.60: Absolutgeschwindigkeiten des in die Endstelle ausgeschleusten Pakets bei unterschiedlichen Reibungsverhältnissen [P11]

Die Modellbildung und Simulation mit MKS ist ein sehr probates Mittel zur Beherrschung diverser und hochdynamischer Vorgänge insbesondere des Ein- und Ausschleusens. Die Ausführungen sollen einen ersten grundlegenden Schritt dokumentieren und die Bearbeitbarkeit des Feldes mit den Methoden der Arbeit darlegen.

4.3.4 Nutzen des Methodeneinsatzes

Mit **MeK2** konnte das Vorgehen in der Neuentwicklung bei Sortieranlagen umrissen und geeignete Methoden dazu identifiziert werden. Diese sind v.a. die Nutzwertanalyse und der paarweise Vergleich als Methoden des methodischen Entwickelns bei der Prinzipiölungssuche und Modularisierung. Ein enger Konnex besteht zu den Methoden von MeW1 über die DMM.

Mit **MeK3** und der automatisierten Morphologie wird Wissensgewinn und die Prozessbeschleunigung des Auffindens neuer prinzipieller Lösungskombinationen erreicht.

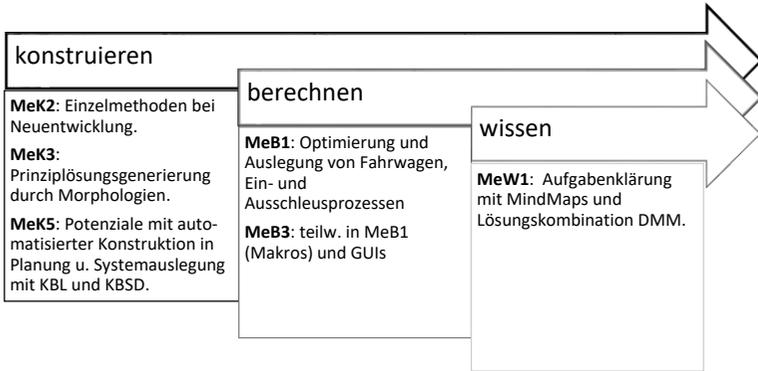
Für die automatisierte Konstruktion mittels **MeK5** und KBSD bzw. KBL wurden mögliche Entwicklungsaufgaben von Wiederhol- und Variantenkonstruktionen identifiziert, die auf planerischer Ebene schon früh technische Details und Kosten zusätzlich liefern können (KBL) bzw. bei der Systemauslegung zu vereinfachten Modellen führen (KBSD).

Schwerpunktmäßig sind die CAE-Methoden am Beispiel Sortertechnik dargelegt. Mit **MeB1**, der Modellbildung und Simulation, ist ein breites virtuelles Analysefeld identifizierbar, das vom Fahrverhalten einzelner Fahrwagen bis zu den hochdynamischen Ein- und Ausschleusvorgängen reicht. Gezeigt wurde neben der Simulationsauswahl auch mit den ausgewählten Werkzeugen erzielte Ergebnisse.

Aufgrund der komplexen Bedienung der Simulationswerkzeuge kann mittels **MeB3** ein niederschwelliger Zugang zur Simulation (Einschleusung und Bahngenerierung) ermöglicht werden.

MeW1 wurde zur Identifizierung und Anwendung ihrer Methoden im Bereich der Aufgabenklärung und Konzeption eines Sortiersystems in Form von MindMaps und DMMs eingesetzt.

Einen abschließenden, zuordnenden Überblick über den Methodeneinsatz, die Verwendung der Schlüsselpublikationen und die Position der Methoden im PEP gibt Bild 4.61 wieder.



	Konstruktion					Berechnung			Wissen	
	MeK1	MeK2	MeK3	MeK4	MeK5	MeB1	MeB2	MeB3	MeW1	MeW2
Kap. 4.3: Sortertechnik	●	●			●	●		●	●	●

○	Teile der Methode angewandt, geringer Nutzen
◐	Teile der Methode angewandt, große Nutzen
●	Methode angewandt, geringer Nutzen
●	Methode angewandt, großer Nutzen

Engineering in der Technischen Logistik												
Methoden und deren Ziele												
Vorgehen nach [VDI 2221]	Phasen Arbeits- schritt Ergebnis	←	Aufgabe klären		Konzeption			Entwurf		Ausarbeitung		→
		Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung Anforderungs- spezifikation	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen Funktionsstrukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen Prinziplosungen	4. Gliedern in realisierbare Module modulare Strukturen	5. Gestalten der maßgebenden Module Vorentwürfe	6. Gestalten des gesamten Produkts Gesamtentwurf	7. Ausarbeiten Ausführungs- u. Nutzungsangaben Produkt- konzeption	PEP: Nachfolger		
Titel		Haupt- und Nebenziele(n) in jeweiliger PEP-Phase									Haupt- u.	Neben- Methode
P3: Kfz in der Technischen Logistik; Jahrbuch LOGISTIK		Wissensverknüpfung und Funktionsdemo wRBE-app; Anwendung als Rollenförderer Entwicklungsmethoden für die Technische Logistik (Übersicht)									Ma102	MeW1
P4: xKBE for material handling equipment; IMERC		Beispiele Kfz: Klassifizierungsdemo mit Kfz; Grundzüge wRBE-app Anwendung KBE, KBSD, KBL an Selbstvermel, RBD und Lagersystem (Übersicht)									Ma104 Ma105 Ma109	MeW2
P11: Sorter CAE 2x (aufbauend); ICMA S		Modellbildung u. Optimierung Kippschalenort; Einsatzfreudung Kfz-Beispiele für Sortiersysteme Morphologie u. Struktur Abhängigkeiten in Sortieranlagen									Ma101 Ma102 Ma103 Ma104 Ma105	MeB2

Bild 4.61: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Analyse und Entwicklung von Sortiersystemen, Einordnung Schlüsselpublikationen [P3], [P4], [P11]

5 Erreichte Ziele und Wirkung mit den Ansätzen und Methoden der drei Themenkreise – Zusammenschau

In Abschnitt 2.3 wurde v.a. mit Bild 2.36 eine Forschungslücke aus Abweichungen des Standes des Engineerings in der Technischen Logistik und in den identifizierten Trendsetter-Branchen dargestellt. Mit den drei Themenkreisen „konstruieren“, „berechnen“ und „wissen“ wurden Ansätze erzeugt, aus denen Methoden bzw. Methodiken für das Engineering in der Technischen Logistik entwickelt wurden, um die vorhandene Forschungslücke zu schließen. Somit ist die Zielerreichung v.a. in der Wirksamkeit der Methoden zu sehen, inwiefern sie die aufgezeigten Lücken schließen können. Als **Kernergebnisse dieser Arbeit** können dazu dargestellt werden:

- **10 Methoden bzw. Methodiken**, deren Einsatz aus formulierten Prämissen und daraus abgeleiteten Ansätzen als wirksam für das Engineering in der Technischen Logistik gerechtfertigt ist²⁸⁹
 - Es existieren viele allgemeine Methodenwerke zum „Engineering“ – Projektion und Aufzeigen konkreter Nutzen für die Situation in der Technischen Logistik.
 - Zugehörige Software-Tools:
 - xKBE-app (MeK5)
 - VDI-app (MeK2)
 - SyLö-app (MeK3)
- Aufbereitung der **Theorie des Engineerings der Technischen Logistik** in Kap. 2 und vertieft im Lehranhang Kap. 6
- Das **Einordnungsmodell für Methoden des Engineerings** in der Technischen Logistik und weitere Entwicklung und Darstellung neuer Methoden aus neuen Prämissen.
- Das **Vorgehen zur Entwicklung von Methoden** mit den Prozessen P-A und AW-M zufolge identifizierter Prämissen.

Die Methoden und deren Ziele mit dem nötigen Nutzen und Aufwand sowie den Vor- und Nachteilen sind, neben der inhaltlichen Detaillierung, in den Methodenfactsheets in Kap. 3.4ff. detailliert dargestellt. Die folgende Zusammenschau stellt eine Bewertung mit Ausblick je Themenkreis dar und fasst die Wirkungen zur Zielerreichung zusammen

In Abschnitt 5.2 wird die Vernetzung der Methoden untereinander gezeigt und die erzielte Wirkung im Methoden-Einordnungsmodell visualisiert. Abschließend wird der Zusammenhang und die Verwendung der Methoden in den eigenen Schlüsselpublikationen und –projekten aufgezeigt.

²⁸⁹ S. Prozess P-A mit Bild 2.31 und Prozess AW-M mit Bild 3.3.

5.1 Wirkung und Zielerreichung in den Themenkreisen

5.1.1 TK 1 – konstruieren

Die Methoden und Methodiken des Themenkreis' „konstruieren“ versuchen in erster Linie, die umfangreichen Erkenntnisse aus der Forschung zu methodischer Entwicklung und (integrierter) Produktentwicklung für das Engineering der Technischen Logistik selektiv verwendbar zu machen, Tabelle 18 stellt Wirkung und den Bezug zur identifizierten Lücke dar.

Tabelle 18: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeK1 bis MeK5

Themenkreis „konstruieren“: Methoden MeK1 bis MeK5	
Wirkung	Es entsteht (simultan) Klarheit bzgl. logistischer und technischer Anforderungen.
	Breitere Lösungsvielfalt kann systematisch in Betracht gezogen werden und somit wird umfangreiches (externes) Erfahrungswissen herangezogen.
	Durch prozessorientiertes Vorgehen bleiben keine Tätigkeiten unbeachtet und bei wiederholtem Durchlaufen steigt die Effizienz gesamt.
	Die Lösungsauswahl erfolgt begründet und dokumentiert.
	Immer komplexer werdende Produkte und immer breitere Produktstrukturen können systematisch beherrscht werden.
	Synergien für ähnliche Aufgaben werden geschaffen.
	Klarheit bzgl. sinnvoll zu automatisierender Konstruktionstätigkeiten entsteht.
	Konstruktive Routinetätigkeiten erfolgen automatisiert und prinzipielle Lösungen werden ebenso automatisiert bereitgestellt.
	Neue Ansätze zur Verbindung planerischer und produktentwickelnder Tätigkeiten werden gedacht (simultaneous engineering und frontloading).
	Eine differenzierte, phasen- und objektkategorisierte Betrachtungsweise (vgl. Einordnungsmodell) bringt Klarheit und Struktur in den Aufgaben und ermöglicht die Auswahl der passenden Methoden.
Bezug zur Lücke (Bild 2.37)	Um spezifische Kundenlösungen zu erzeugen, können mit MeK1 und MeK3 im Falle von Neuentwicklungen und mit MeK5 im Falle von Variantenkonstruktionen frühstmöglich in Begleitung der logistischen Planung angepasste Lösungen erzeugt werden.
	Um dem 2D-CAD Einsatz entgegenzuwirken, steht mit MeK4 ein „CAD-Konstruktionshandbuch“ zur Verfügung. Es stellt den programmspezifischen und von den CAD-Software-Herstellern verbreiteten Unterlagen angepasste und übergeordnete Vorgehensweisen bewertet zur Seite.
	Die langen Produktlebensdauern benötigen gut dokumentierte Entwicklungsschritte, um bei Überarbeitung, durch meist nicht mehr dieselben Bearbeiter, effizient zu gestalten. Hier helfen neben Methode MeK4 v.a. auch jene des Themenkreises „wissen“.
	Damit Varianten- und Anpassungskonstruktionen nicht nur aus Projektadaptierungen entstehen, hilft MeK2 bei der Modul- und Baureihenbildung. Mit MeK4 sind die nötigen CAD-Modelle auch effizient änderbar.
	Die vorherrschende projektzentrierte Entwicklung kann mittels Konstruktionsmethodik und MeK2 zu einer losgelösten F&E, nach Maßgabe ökonomischer Kapazitäten, entwickelt werden.
	Damit Produktmanager rasch und treffsicher mit Kunden gemeinsam Anlagen planen können, steht mit dem KBL und Methode MeK5 ein wissensbasiertes Konstruktionswerkzeug zur Verfügung.

5.1.2 TK 2 – berechnen

Die Methoden und Methodiken des Themenkreis' „berechnen“ sind spezifischer als jene von „konstruieren“ und versuchen nicht nur die konkreten Software-Werkzeuge der Trendsetter den Entwicklungsaufgaben in der Technischen Logistik zuzuordnen sondern auch Prozesse der einfachen (Wieder)verwendung bereitzustellen; Tabelle 19 stellt Wirkung und den Bezug zur identifizierten Lücke dar.

Tabelle 19: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeB1 bis MeB3

Themenkreis „berechnen“: Methoden MeB1 bis MeB3	
Wirkung	<p>Ein Überblick über diverse unterschiedliche Modellbildungs- und Simulationskonzepte nach Anwendungsfall und Konstruktionsphase wird bereitgestellt.</p> <p>Wirkung Modellbildung und Simulation (CAE) allgemein – durch MeB1 passend ausgewählt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Virtuelle Entwicklung simultaneous engineering in der Konstruktion wird ermöglicht. • Funktion von Produkten durch rechnerische Absicherung wird verbessert. • Berechnungsqualität gegenüber den teilweise veralteten Auslegungswerkzeugen und Normen (s. „Quellen“ bei MeB2) wird erhöht. • Breitere Variationsmöglichkeiten der Produktgestaltung wird abgedeckt. <p>Akzeptanz für Simulation durch Beispiellösungen und best practice wird gesteigert.</p> <p>Simulation kann einfacher und mit geringerem Einschulungsaufwand eingesetzt werden.</p> <p>Verbesserte analytische Berechnungsmethoden (C-Methoden) stehen zur Verfügung bzw. neue werden geschaffen.</p> <p>Mit den erstellten analytischen C-Methoden bzw. den template-driven-Simulationslösungen wird Berechnung ermöglicht, wo bisher ggf. gar keine stattfand.</p>
Bezug zur Lücke (Bild 2.37)	<p>Um die Produktentwicklung und –sicherung über Prüfstandsversuche, die zeitaufwendig, teuer und nicht variationsbreit sind, zu virtualisieren, kann mit MeB1 das geeignete CAE-Werkzeug ausgewählt werden.</p> <p>Das Vorhandensein bzw. die Aktualität von Normen und Berechnungsregelwerken ist in der Technischen Logistik nicht vergleichbar mit bspw. der Kraftfahrzeugtechnik. Damit die, durchaus in einzelnen Unternehmen und Forschungsinstituten durchgeführten, CAE-Berechnungen verfügbar gemacht werden können bieten MeB2 und v.a. MeB3 Lösungswege an.</p> <p>Mit CAE-Prozessketten²⁹⁰ können im Rahmen der CAE-Werkzeugauswahl mit MeB1 erfolgreiche Berechnungs- und Nachweiskonzepte der Trendsetter übernommen werden.</p> <p>Die Variationsmöglichkeit von Berechnungen mit CAE (DoE) ermöglicht eine systematische Analyse vieler Komponenten der Materialflusstechnik, wozu das Werkzeug mit MeB1 ausgewählt und die Ergebnisse mit MeB2 und MeB3 verwendbarer eingesetzt werden können.</p>

²⁹⁰ s. Kap. 6.9 und 6.10.1.2

5.1.3 TK 3 – wissen

Die Methoden und Methodiken des Themenkreis' „wissen“ versuchen, das Wissen, das im Konstruktionsprozess und bei der Erstellung automatischer Konstruktionen entsteht zu erfassen, zu speichern und damit der Anwendung zuzuführen bzw. zuführbar zu machen um daraus ggf. auch neues Wissen zu generieren; Tabelle 20 stellt Wirkung und den Bezug zur identifizierten Lücke dar.

Tabelle 20: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeW1 und MeW2

Themenkreis „wissen“: Methoden MeW1 und MeW2	
Wirkung	Durch gezielte Wissenswiederverwendung wird Entwicklungszeit verkürzt und die kann Vielfalt gesteigert werden.
	Fehler können durch Wissensinsatz vermieden werden.
	Es kann entschieden werden, ob, womit und mit welchem Aufwand Wissen im Konstruktionsprozess gemanagt werden soll.
	Ein Überblick über einfache aber effizient einsetzbare Werkzeuge des Wissensmanagements liegt vor.
	Wissen für KBx-Lösungen kann erzeugt und aus KBx-Lösungen wiederverwendet werden.
	Nichtpersonal gespeichertes Wissen liegt explizit vor und ist einfach verfügbar.
Bezug zur Lücke (Bild 2.37)	Wissen aus unterschiedlichsten Wissensspeichern wird zusammengeführt.
	Die Akzeptanz und Motivation zum Einsatz von Wissensmanagement in der Konstruktion wird durch best practice Beispiele und einfach zugängliche Methoden gesteigert.
	Der projektzentrierten und teilweise impliziten Wissensspeicherung kann durch den Einsatz von mit MeW1 ausgewählten Werkzeugen gezielt zu einer expliziten Wissensspeicherung im Querschnitt entgegengewirkt werden.
	Im Falle kleiner Entwicklungsabteilungen kann das in wenigen Personen konzentrierte Wissen durch MeW1 allgemein und personenunabhängig aufbereitet werden.
	Dem Allround-Entwickler kleiner Entwicklungsabteilungen hilft MeW1 und im Falle automatischer Konstruktionen MeW2, Überblick über vielfach diverse Gebiete zu erhalten, insbesondere dann, wenn diese nur selten tangiert werden.
	Für die in der Branche üblichen stets spezifisch kundenangepassten Angebote stehen mit MeW1 Wissensspeicher auch für Kundenrelationen zur Verfügung.
Bezug zur Lücke (Bild 2.37)	Im Falle der Bearbeitung von Angeboten mit KBx-Lösungen ist das darin enthaltene Wissen mit MeW2 nicht nur gespeichert sondern dafür auch neues entwickelbar, da die wissenstechnischen Zusammenhänge der Objekte transparent werden.
	Mit MeW2 können zu Übersichtszwecken in CAD-Baureihen-Konstruktionen Wissenszusammenhänge (bspw. Parameterstufungen) extrahiert und dargestellt werden.

5.2 Die Methoden im PEP – Zusammenschau

5.2.1 Positionierung sowie Vernetzung und Abhängigkeit der Methoden

In vielen Bereichen des Engineerings der Technischen Logistik wird nicht nur der Einsatz einer Methode, sondern eine Kombination bzw. parallele Verwendung derselben sinnvoll sein. Beispielhaft einzusehen ist dies in den synoptischen Beispielen des Abschnitts 4.

Um über den Einsatz und die ev. parallele Verwendung der Methoden entscheiden zu können sind die Informationen in den Factsheets Kap. 3.4ff. unter der Überschrift „Prozessphasen“ dienlich. Einen besseren Überblick stellen allerdings die angegebenen Bilder dieses Abschnitts dar, die die Querbeziehungen der Methoden untereinander (Bild 5.1) und deren Positionierung im PEP (Bild 5.2) visualisieren.

Man erkennt in den **Querbeziehungen** eine starke Konzentration im Bereich der automatisierten Konstruktion, da die KBx-Methodik quasi originär auf die Unterstützung durch die Beziehungsentwicklung und –dokumentation mit MeW2 aufbaut. Ebenso starke Beziehungen gehen von MeK2 aus.

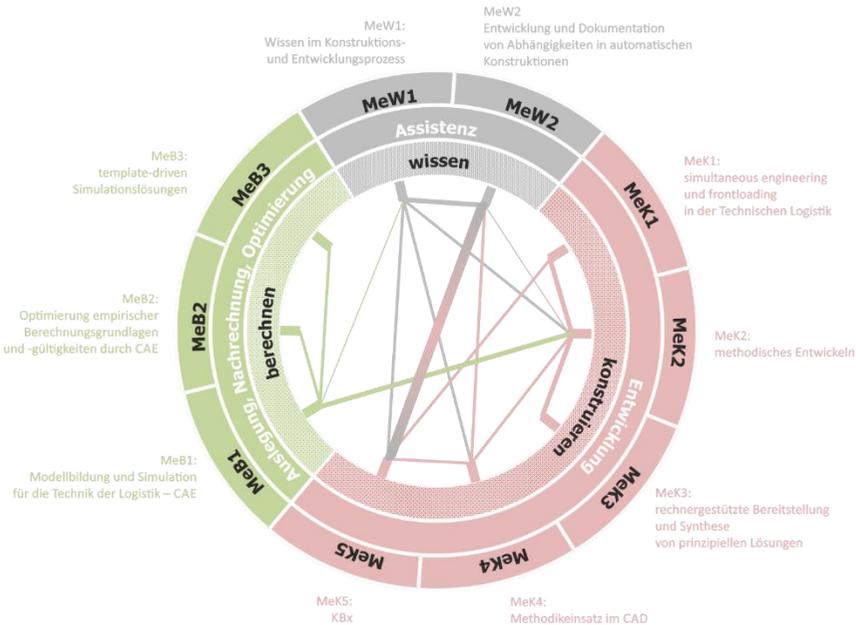


Bild 5.1: Vernetzung und Abhängigkeit der vorgestellten Methoden – Querbeziehungen

Von den Simulationstechniken, die mit MeB1 passend ausgewählt werden können gehen Beziehungen zu deren effizientem Einsatz mit MeB2 und MeB3

aus. Die Beziehung zu MeK2 ist in der Konstruktionsmethodik integral vorhanden, da die einschlägigen Vorgehensmodelle (s. Kap. 2.2.11.1) stets Simulationswerkzeuge dem Konstruktionsprozess zur Seite stellen, allerdings nicht immer in der detaillierten Auswahlmöglichkeit wie MeB1. Da MeW1 unterschiedliche Lösungen vorschlägt, das Wissen im Entwicklungsprozess zu erfassen und wiedernutzbar zu machen, gehen von ihr Beziehungen zu vielen weiteren Methoden aus. Soll bedeuten, wenn man eine CAD-Lösung mit bspw. MeK4 methodisch erstellt, bietet MeW1 eine Auswahlmöglichkeit, das dabei entstandene Wissen mit einer geeigneten Methode von MeW1 zu erfassen und dokumentieren.

Die **Positionierung der Methoden im PEP** (Bild 5.2) zeigt für die dort einsehbare Phasenzuordnung der Konstruktionsarten²⁹¹ einige Konzentrationen der Methoden. Sie sind am anschaulichsten anhand der unterschiedlichen Konstruktionsarten erläuterbar.

Engineering in der Technischen Logistik												
Methoden und deren Ziele												
Vorgehen nach [VDI 2221]	Phase	Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	Aufgabe klären		Konzeption		Entwurf		Ausarbeitung		-> Fertigung PEP: Nachfolger	
	Arbeitsschritt		1 Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Einbauen in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten Ausführungs- u. Nutzungsangaben			
Ergebnis		Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produkt dokumentation				
Konstruktionsart	Neukonstruktion											
	Anpassungskonstruktion											
	Variantenkonstruktion											
	Wiederholkonstruktion											
konstruieren	MeK1 MeK2 MeK3 MeK4 MeK5	Konstruktionsmethoden										
		simultaneous engineering und Ironloading in der Technischen Logistik	methodisches Entwickeln									
			rechnergestützte Bereinstellung u. Synthese v. Lösungsprinz.				Methodikeinsatz im CAD					
			autom. Konstr. (KBE, KBSD, (KBL) + KBx)									
berechnen	MeB1 MeB2 MeB3	Berechnungs-/Auslegungs/ Optimierungsmethoden										
		Modellbildung und Simulation für die Technische Logistik - CAE										
		Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und -gütigkeiten										
wissen	MeW1 MeW2	Wissensmethoden										
		Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess										
		Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in autom. Konstruktionen										

Bild 5.2: Methoden im PEP

Bei Variantenkonstruktion, die einen Großteil des projektbasierenden Entwicklungsaufwandes in der Branche ausmachen, kommt der Nutzen der automatischen Konstruktionen voll zum Einsatz, die MeK5 mit MeK4 und MeW2 hauptsächlich verwenden.

Bei Anpassungskonstruktionen muss vor allem sichergestellt werden, dass durch die zwar gleichbleibenden Lösungsprinzipien, aber deren veränderte Kombination und Geometrie ein Funktionieren gewährleistet ist. Dazu dienen vor allem die Methoden des Berechnens mit MeB2 und MeB3 die Simulationsmethoden aus MeB1 verwenden. Die Modelle dafür sind effizient mit MeK4 oder ggf. mit der automatischen Konstruktion (KBSD) erzeugbar.

Neukonstruktionen verwenden ergänzend zu den oben angegebenen Methoden vorwiegend die Prinzipien zur Lösungsfindung und deren Berechnung mit MeK3

²⁹¹ Da Wiederholkonstruktionen keine eigentliche Änderung an der Konstruktion darstellen werden sie hier nicht weiter erläutert.

und MeB1. Überlappend dazu ist hier mit MeK1 das simultaneous engineering mit der Planung von besonderer Wichtigkeit, da aufgrund der längsten Entwicklungszeit für Neukonstruktionen hier Zeit eingespart werden kann, die besser genutzt zur Verfügung steht.

Alle Konstruktionsarten können MeK2 und MeW1 verwenden, um einerseits methodisch zu entwickeln und andererseits das dabei entstandene Wissen zu erfassen.

5.2.2 Wirkung der Methoden – dargestellt im Methodeneinordnungsmodell

Das Methodeneinordnungsmodell stellt nach Kap. 3.3 auf den vier Ebenen der Technischen Logistik in den zwei verbleibenden Dimensionen folgendes dar (Details s. Kap. 3.3):

- Einerseits wird die mögliche **Beschleunigung des PEP durch die Methoden** (PEP Fortschreiten im Konstruktionsraum, ausgehend vom Anforderungsraum mündend dann in den Produktionsraum) in Abszissenrichtung dargestellt.
- Andererseits ist die **Wirkung der Methoden hinsichtlich Lösungsverbreiterung bzw. deren Konkretisierung** in Tiefenrichtung dargestellt.

Das Einordnungsmodell dient somit der übersichtlichen und einfachen Darstellung und Erklärung der Wirkung der unterschiedlichen Methoden. Für die Methoden MeK2, MeB1 und MeB1, die ja Auswahlempfehlungen bestimmter weiterer Methoden und somit Methodiken sind, wird die Wirkung der mit MeK2, MeB1 und MeB1 wählbaren Methoden dargestellt. Dies ist in den folgenden Abbildungen mit der Unterüberschrift „Methodik“ gekennzeichnet. Da das Modell webbasiert dreidimensional betrachtbar ist (drehen, zoomen, filtern einzelner Methoden,...), sind die folgenden Bilder lediglich eine papiergebundene Momentaufnahme.



Bild 5.3: QR-Code der Webadresse des interaktiven Methodeneinordnungsmodells [MET15]

Es kann durch das interaktive Modell das **Augenmerk auf eine konkrete Tätigkeit im PEP gerichtet** werden (bspw. Lösungsvielfalt erzeugen einer Maschine in der Konzeptionsphase einer Neukonstruktion). Durch Einblenden aller Methoden und Betrachtung der Tiefendimension in der entsprechenden Phase auf der Maschinenebene, ist sofort ein Überblick über alle für diese Tätigkeiten wirksamen Methoden vorhanden. Die volle Wirkungsweise der Darstellung erschließt sich somit erst bei Interaktion mit dem 3D-Methodeneinordnungsmodell²⁹² (Bild 3.10), aufrufbar durch den QR-Code aus Bild 5.3.

²⁹² Herzlicher Dank für die softwaretechnische Umsetzung des Methodeneinordnungsmodells ergeht an meinen Kollegen DI Alexander Ortner-Pichler.

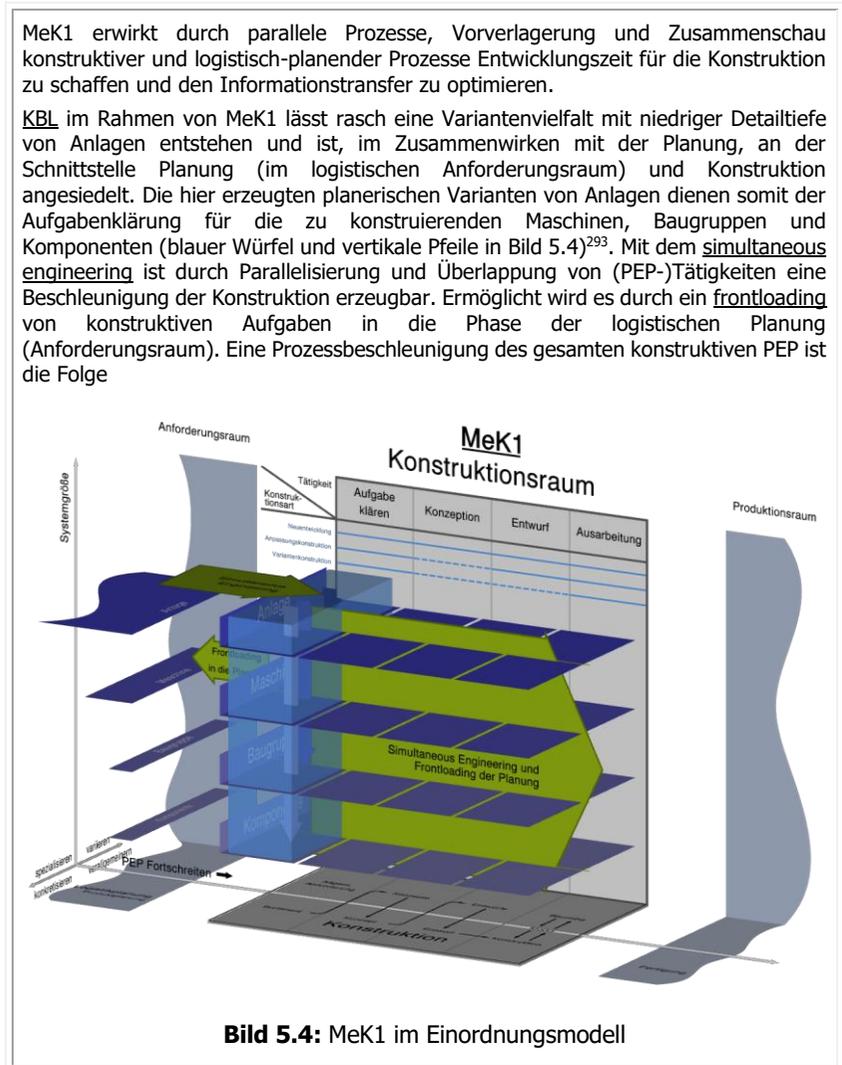
5.2.2.1 TK 1 – konstruieren

MeK1

simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik

MeK1 erwirkt durch parallele Prozesse, Vorverlagerung und Zusammenschau konstruktiver und logistisch-planender Prozesse Entwicklungszeit für die Konstruktion zu schaffen und den Informationstransfer zu optimieren.

KBL im Rahmen von MeK1 lässt rasch eine Variantenvielfalt mit niedriger Detailtiefe von Anlagen entstehen und ist, im Zusammenwirken mit der Planung, an der Schnittstelle Planung (im logistischen Anforderungsraum) und Konstruktion angesiedelt. Die hier erzeugten planerischen Varianten von Anlagen dienen somit der Aufgabenklärung für die zu konstruierenden Maschinen, Baugruppen und Komponenten (blauer Würfel und vertikale Pfeile in Bild 5.4)²⁹³. Mit dem simultaneous engineering ist durch Parallelisierung und Überlappung von (PEP-)Tätigkeiten eine Beschleunigung der Konstruktion erzeugbar. Ermöglicht wird es durch ein frontloading von konstruktiven Aufgaben in die Phase der logistischen Planung (Anforderungsraum). Eine Prozessbeschleunigung des gesamten konstruktiven PEP ist die Folge



²⁹³ Eine weitere KBL Wirkung ist mit MeK5 als Anlagendetaillierung in der Ausarbeitungsphase möglich und dort dargestellt.

MeK2

methodisches Entwickeln

Da MeK2 eine Methodik ist und unterschiedlichste Methoden vereint bzw. deren Auswahl empfiehlt, muss die Wirkung der mit MeK2 auswählbaren Methoden differenziert dargestellt werden, realisiert durch vier unterschiedliche Farben, entsprechend den Methodenkategorien von MeK2 (Kap. 2.2.11.1).

Grundsätzlich beschleunigt methodisches Entwickeln den PEP auf allen Größenebenen (Bild 5.5). Entwicklungsunterstützende Methoden dienen dem Konkretisieren in den Spätphasen des PEP (subsumierend hier v.a. Modellierungsmethoden). Analyse- und Zielvorgabemethoden dienen in allen Phasen dem Spezialisieren und Konkretisieren. Methoden zum Generieren von Lösungsideen dagegen verbreitern die Lösungsvielfalt in den Phasen Konzeption und Entwurf. Bewertungsmethoden dienen wiederum der Konkretisierung unterschiedlicher Lösungen in den Phasen Konzeption bis Ausarbeitung.

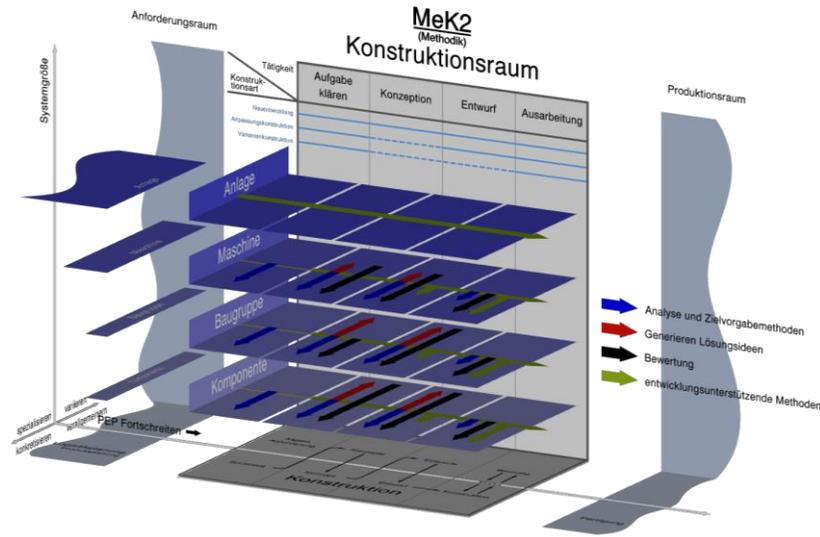


Bild 5.5: MeK2 im Einordnungsmodell

MeK3

rechnergestützte Bereitstellung von Lösungsprinzipien

Die Wirkung von MeK3 ist mit Bild 5.6 im Bereich der Konzeption von Neukonstruktionen in einer erhöhten Variantenvielfalt von Lösungsprinzipien für v.a. Baugruppen, aber auch Komponenten und Maschinen zu sehen. Durch die teilweise Automatisierung dieser Tätigkeit kommt es zu einer Beschleunigung im PEP zur folgenden Phase „Entwurf“.

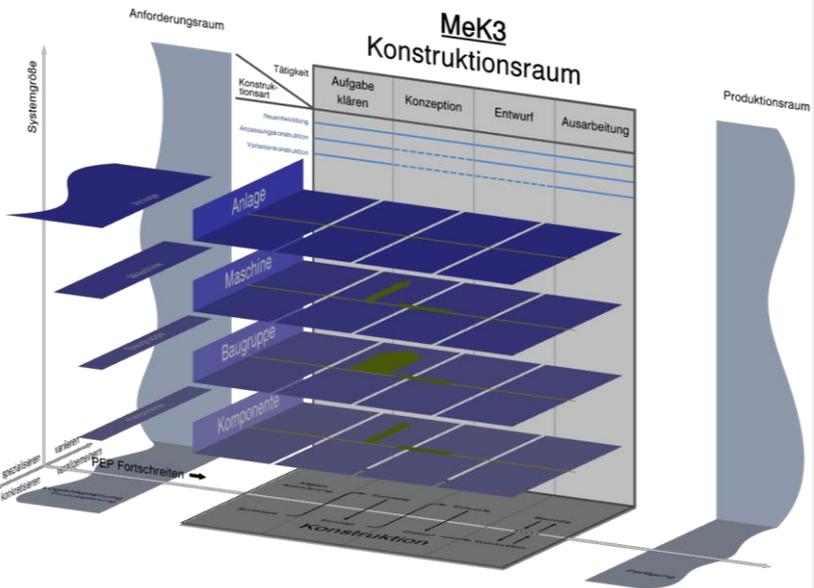


Bild 5.6: MeK3 im Einordnungsmodell

MeK4 methodisches CAD

MeK4 (Bild 5.7) kann in der Neukonstruktion am Ende der Konzeption erste Prinziplösungen im Konkretisieren beschleunigen²⁹⁴. In einer späteren PEP-Phase muss für Anpassungs- und Variantenkonstruktionen zwischen den beiden prinzipiellen Vorgehen mit MeK4, bottom-up und top-down, unterschieden werden. Mit bottom-up ist bei kleinen CAD-Modellen der Ebenen Komponenten und Baugruppen eine Beschleunigung der Variantenbildung möglich. Bei kleinskaligen CAD-Modellen kann auch der PEP hin zum Ausarbeiten beschleunigt werden. Bei gesamten Anlagen ist top-down die maßgebende Strategie. Der Prozess, heraus aus einem Variantenreichtum des Entwurfes über spezielle ausgearbeitete Lösungen (Module) hin zu Baureihen, wird iterativ oftmals durchlaufen (S. Flusspfeile am Grund des Methodeneinordnungsmodells). MeK4 berücksichtigende CAD-Modelle sind hier effizient.

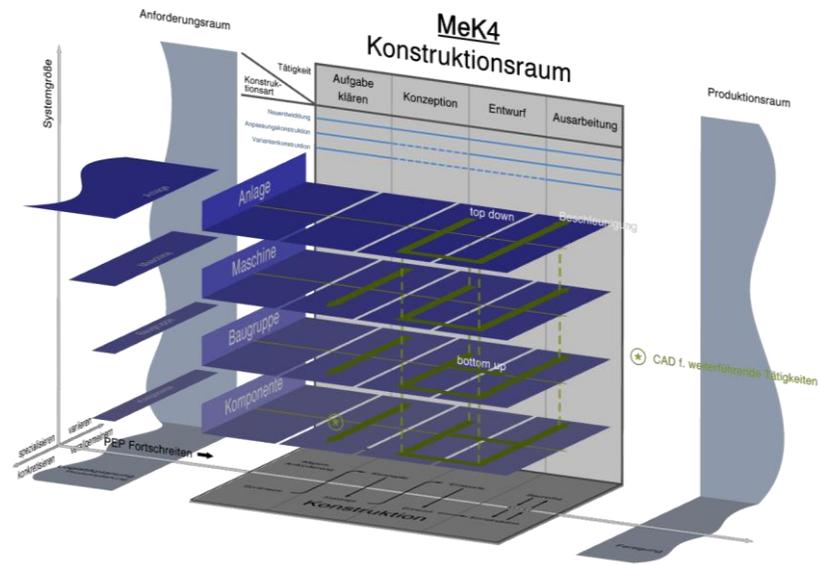


Bild 5.7: MeK4 im Einordnungsmodell

²⁹⁴ Gekennzeichnet mit „CAD f- weiterführende Tätigkeiten“ v.a. im Bereich Komponenten bis Maschine. Bspw. sind die methodischen CAD-Daten hier grundlegend für Geometriegrundmodelle bspw. als Funktionsmuster im rapid prototyping oder als CAE-Geometriemodell (mit MeB1 im Themenkreis „berechnen“).

MeK5

automatische Konstruktion KBx (KBE, KBSD und KBL)

Für MeK5 ist KBx (Bild 5.8) ist in dessen Ausprägungen (KBE, KBSD und KBL) zu differenzieren. Mit KBE kann die Variantenvielfalt ausgearbeiteter Komponenten und Baugruppen hin zu Baureihen (im Ausarbeiten) erhöht werden. KBSD dient im Entwurf und Ausarbeiten von v.a. Maschinen und teilweise auch Baugruppen und Anlagen der Variation der Entwürfe. Einerseits um diese geometrisch rasch weiter zu detaillieren und andererseits um Geometriemodelle für angeschlossene entwicklungsunterstützende Prozesse (v.a. Berechnung und Simulation) bereitzustellen. Eine Beschleunigung des PEP ist die Folge. Mit KBL ist nach MeK5 ein Produktspektrum ganzer Anlagen, in der KBL-eigenen Detaillierungstiefe, als Verallgemeinerung erzeugbar. Eine weitere KBL Wirkung ist mit MeK1 im Aufgabenklären durch Variantenerzeugung. Für alle KBx-Ansätze ist im Stadium „Aufgabe klären“ nach deren Einsatzmöglichkeit und der Sinnhaftigkeit der Konstruktionsautomatisierung rechtzeitig zu differenzieren (blauer Kubus).

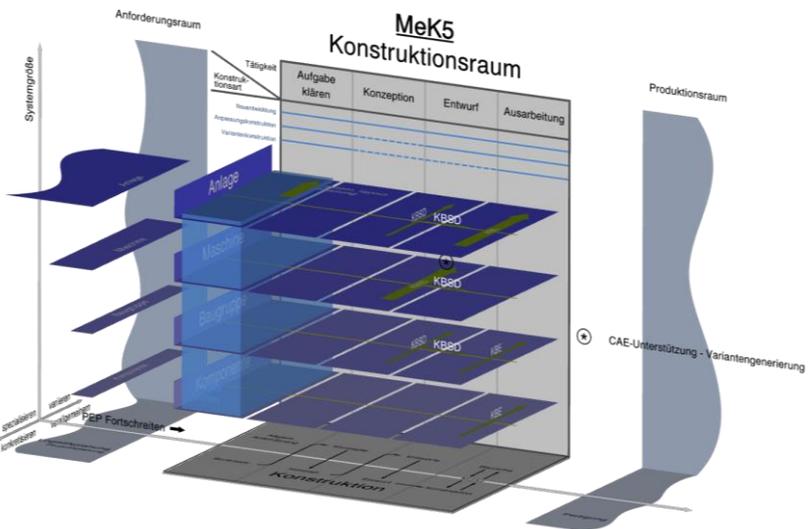


Bild 5.8: MeK5 im Einordnungsmodell

5.2.2.2 TK 2 – berechnen

MeB1

Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik – CAE

MeB1 stellt aus unterschiedlichsten Sichten eine Hilfe für das Definieren und Auswählen/Bearbeiten einer Berechnungsaufgabe dar und ist somit eine Methodik zur Auswahl von Methoden. Im Methoden-Einordnungsmodell (Bild 5.9) ist nun die Wirkung der Berechnungswerkzeuge dargestellt, die mit MeB1 erwähnt werden können. Durch das CAE kommt es i.A. zu einer Beschleunigung am Ende des Entwerfens und in der Ausarbeitung (virtual Engineering)²⁹⁵. CAE bewirkt weiters eine Konkretisierung konstruktiver Lösungen dahingehend, als die Funktionsqualität damit gesichert werden kann. Dies zeigt sich auf den Ebenen Komponente, Baugruppe und Maschine jeweils am Ende der Phase Konzeption und Entwicklung und durchgehend in der Ausarbeitung. Mit Design of Experiments (DoE) kann Lösungsvielfalt virtuell erzeugt und abgesichert werden. Konstruktive Entwürfe können in verschiedensten Varianten effizient analysiert werden und die Funktionsqualität entwickelter Baureihen kann in jeder nötigen Ausprägung gesichert werden.

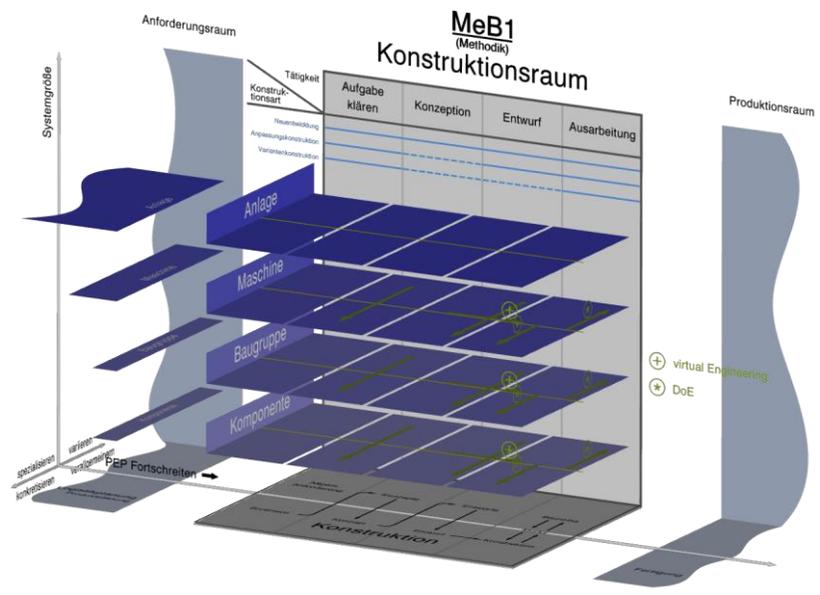


Bild 5.9: MeB1 im Einordnungsmodell

²⁹⁵ Virtuelle Produktentwicklung, s. auch Kap. 6.9.2

MeB2 und MeB3

Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und –gültigkeiten durch CAE sowie template-driven Simulationslösungen

MeB2 und MeB3 haben die Grundintention, Simulation so einfach und unaufwendig wie möglich nutzbar zu machen. Während MeB2 aus Simulationserkenntnissen analytische C-Methoden erzeugt, bringt MeB3 dem Nutzer Simulation in einem quasi gesicherten Ausmaß nahe, eingeschränkt in der Variationsmöglichkeit darin, schwerwiegende Modellierungs- und Parametrierungsfehler zu begehen. In diesem Sinne ist die Wirkung von sowohl MeB2 und MeB3 jener von MeB1 gleich, wenn auch in abgeminderter Form, wie Bild 5.10 im Vergleich mit Bild 5.9 erkennen lässt.

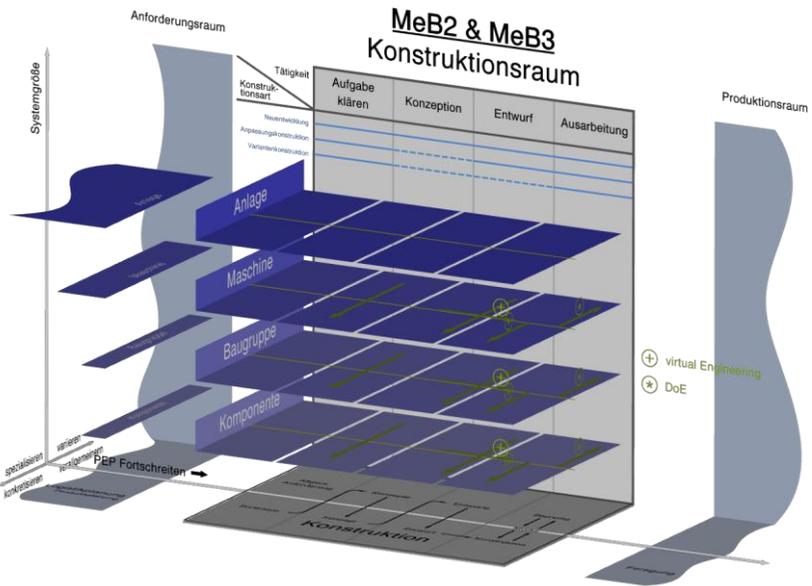


Bild 5.10: MeB2 und MeB3 im Einordnungsmodell

5.2.2.3 TK 3 – wissen

MeW1

Wissensbereitstellung im Konstruktions- und Entwicklungsprozess

Die Wiederverwendung von Wissen ist das Hauptmotiv von MeW1 und führt durch den effizienten Wissenswiedereinsatz mit den Werkzeugen, die mit MeW1 ausgewählt werden können, zu einer Prozessbeschleunigung in allen Phasen und auf allen Ebenen (Bild 5.11). Ebenso kann sowohl Vielfalt als auch Spezialisierung effizienter erzeugt werden, wenn das Wissen dazu bereitgestellt wird.

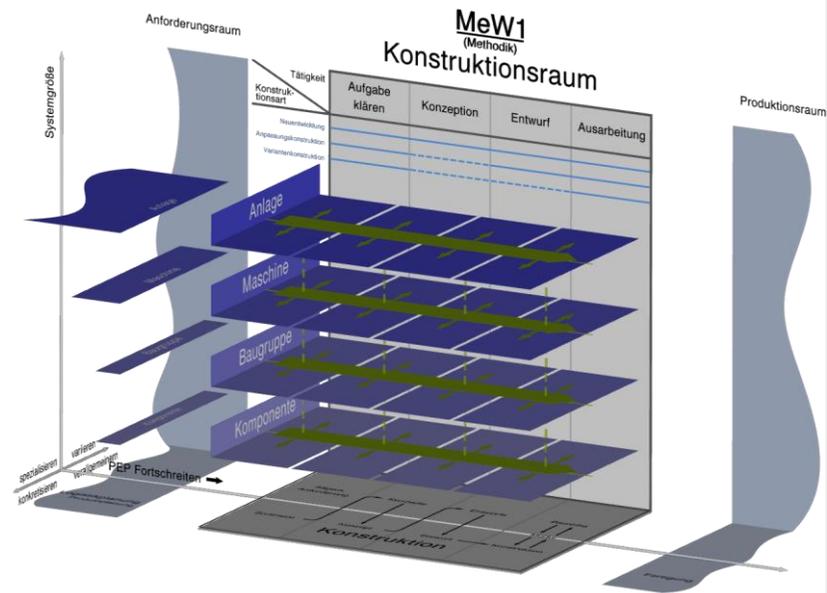


Bild 5.11: MeW1 im Einordnungsmodell

MeW2

Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in Konstruktionen

MeW2 unterstützt relevant die automatisierte Konstruktion mit MeK5, in der Wissensverwaltung und der Erzeugung von Relationen in virtuellen technischen Objekten. Somit kommt es zu einer Effizienzsteigerung der mit MeK5 erzielbaren Wirkung und die Wirkungspfeile von Bild 5.8 verstärken sich (blaue Pfeile in Bild 5.12 zusätzlich zu den grünen Bild 5.8), bzw. die Wirkungen von KBx werden beschleunigt. Dies ist nicht gesondert dargestellt und es sei für Bild 5.12 auch auf Bild 5.8 verwiesen²⁹⁶.

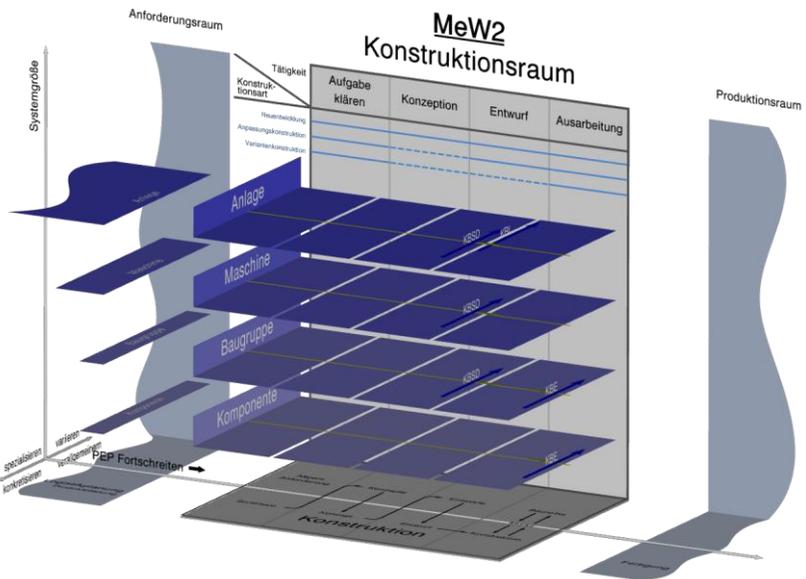


Bild 5.12: MeW2 im Einordnungsmodell

²⁹⁶ Eine bessere Darstellung der Wirkung ist im interaktiven Methodeneinordnungsmodell ersichtlich [MET15].

5.3 Einsatz der Methoden in Forschung und Lehre²⁹⁷

Für den **Einsatz der Methoden in der Lehre** werden unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt:

- Inhaltlich-theoretisch:
strukturiertes und zugeordnetes Aufzeigen neuartiger Ansätze zum Engineering in der Technischen Logistik
- Inhaltlich-praktisch:
Einsatz konkreter Methoden in konstruktiven Projekten und Abschlussarbeiten (Beispiele dazu s. unter den Fußnoten im Kap. 4)
- Didaktisch:
 - Festigen von theoretisch erlangtem Wissen, bspw. Wissen um die Konstruktionsmethodik, durch konstruktionsbegleitende Verwendung der entwickelten Apps (VDI-app, SyLö-app, xKBE-app - Kap)
 - Verständnis für die Phasen des Konstruierens und des dazu geeigneten Methodeneinsatzes mit dem interaktiven 3D-Methodenmodell
 - Verständnis über die Erhebung und Verarbeitung von den Prämissen hin zu den Methoden mit den Prozessen P-A und AW-M

Die folgenden Lehrveranstaltungen an den angegebenen Universitäten verwenden oder verwendeten direkt Material aus dem Lehranhang bzw. eine oder mehrere Methoden dieser Arbeit:

- TU Graz 2015:
KU CAD, VU CAE, 3D-CAD-Maschinenkonstruktion, Modellbildung und Simulation in der Antriebstechnik, Bachelorprojekt Maschinenbau, Masterarbeit
- TU Graz vor 2015:
Antriebstechnik, Laborübung und Laborprojekt,
- LFU Innsbruck 2015:
Maschinenbau und Konstruktionstechnik, CAD Praktikum
- Gast-Lehrveranstaltungen an den folgenden Universitäten
 - KIT 2008: CAD und CAE im Maschinenbau, Dynamische Analyse eines Elektrokettenzuges (Gastvorträge)
 - TU Dresden 2013: Entwicklung von Materialflusstechnik (in VO Materialflusslehre)
 - TU München 2014: Simulation in der Fördertechnik (in VO Maschinensystemtechnik)

Folgend kann über die angegebenen Schlüsselpublikationen und –projekte der **Einsatz der Methoden in der Forschung** abgeleitet werden.

²⁹⁷ Weiterführende Ausführungen sowie ein detailliertes Aufzeigen des Fachgebiets „Fördertechnik“ und der Einsatz in Forschung und Lehre an der TU Graz sind dem Habilitationsantrag zu entnehmen und auszugsweise in Kap. 9 wiedergegeben.

5.3.1 Schlüsselpublikationen und -projekte

Den Prämissen, die den Ausgangspunkt der beiden Teilprozesse P-A und AW-M zur Methodendefinition bilden, liegen verschiedenste Quellen zugrunde. Dies sind neben den in Kap. 2.3 angegebenen vor allem die hier gelisteten Schlüsselpublikationen und –projekte aus der eigenen Erfahrung der vergangenen Jahre. Der Übersicht geschuldet sind diese mit dem in Bild 5.13 angegebenen Kürzel bezeichnet. Ebendort ist eine Kurzbeschreibung der 20 einzelnen Vorhaben mit Quellenangabe des Volltexts dazu einsehbar. Einen im Rahmen der Arbeit ausreichenden Über- und Einblick in die Detailinhalte liefert ebenso Bild 5.13.

Art: Theorie, Anwendung	Untersuchungsobjekt(e)	Hauptergebnis	weitere Ergebnisse	Lit.
P1: Kettenzugschwingung; KONSTRUKTION	Anwendung: Rundstahlkettenzug	Beschreibung (Simulation) der Dynamik am Kettenzugsystem		[P1]
P2: Polygoneffekt; KRANFACTAGUNG	Theorie: Rundstahlkettenzug	Neue Theorie des Polygoneffekts zufolge realer Kraft- und Lastverhältnisse		[P2]
P3: Kbx in der Technischen Logistik; Jahrbuch LOGSTIK	Theorie, Anwendung: Möglichen mit Kbx und Variantenanalyse an div. Objekten aus Logistik und Forsttechnik	Funktionsdemonstration xKBE-app, Möglichkeiten mit Variantenanalyse bei Geschleichen	Aufzeigen Fortschritt zu (P4): xKBE IMHRC	[P3]
P4: xKBE for material handling equipment; IMHRC	Theorie, Anwendung: Möglichkeiten mit automatischer Konstruktion in der Technischen Logistik	Definition und Spezifikation von Kbx. Aufzeigen Notwendigkeit von Wissensmanagement dafür (xKBE)	Einsatzbeispiele KBE, KBSD, KBL	[P4]
P5: Regalbediengerät KBE; ICMA5	Anwendung: Regalbediengerät	KBSD (hier historisch noch als KBE spezifiziert, Def. von [P4]: xKBE folgend) zur Modellgenerierung für die Antriebsauslegung von Regalbediengeräten	KBE state-of-the-art	[P5]
P6: Seiltrammel KBE; HF	Anwendung: Seiltrammel eines Schwerlast-Brückenkrans	automatische KBE-Lösung zur Geometriegenerierung von Hubschleppern auf Detaillierungsgrad Fertigungszeichnungen	Anforderungen an xKBE	[P6]
P7: Methoden zur effizienten Anwendung und Verbreitung von Simulation in der Technischen Logistik; ITI	Theorie: logische Gewerke auf Komponenten-Baugruppen und Maschinen-Ebene.	Methoden zur "vorwissenfreien" Verwendung von Simulation	Übersicht "Simulation library for logistics engineering" und Quellen dazu.	[P7]
P8: Seilchwingungen; MHCL	Theorie, Anwendung: Freileitungssell einer Hochspannungslleitung inkl. Armaturen und Isolatorketten	Vorgehensweise, Modellbildung und Ergebnisse der FEM-MKS-Kopplung zur Berechnung hochdynamischer Vorgänge an stehenden Seilen		[P8]
P9: SeilFEM; KONSTRUKTION	Theorie: Seile	Strategie und best practice zur Abbildung des dynamischen Verhaltens von Seilen	Beurteilung der Strategien nach Aufwand für zu berücksichtigende Effekte	[P9]
P10: M-box; logistics research	Anwendung, Theorie: modulare M-box des Physical Internet	Entwicklung diverser Lösungsansätze und Fertigung einer modularen Box für FMCG im Physical Internet		[P10]
P11: Sorter CAE 2x (aufbauend); ICMA5	Anwendung: Vorförderer von Sortiersystemen	Beschreibung (Simulation) der Dynamik an Kippchalensortern und Einschleusmechanismen mit unterschiedlicher Modellbildung	Möglichkeiten mit KBSD und KBL	[P11]
P12: Antriebsimulation Karusselllager; IMHRC	Anwendung: Antriebsstrang eines Karusselllagers	Beschreibung (Simulation) der Dynamik im Antriebsstrang		[P12]
P13: Spielzeitermittlung; F+H	Theorie: Hubbaken-Regalbediengerät	Beschreibung (Simulation) der Bedienzeiten und Durchsatz-/Leistungsberechnung		[P13]
P14: Dynamische Lasten im Vergleich zu EN 818/7; KRANFACTAGUNG	Anwendung: Rundstahlkettenzug	Auslegung von Rundstahlketten im Dauerbetrieb mit analytischen Modellen - aus Simulationen abgeleitet (Regression)	Kritische Beurteilung der maßgebenden Auslegungsnorm EN 818/7	[P14]
Pr1: Teilschnittmaschine MKS	Anwendung: Raupekettenfahwerk einer Teilschnittmaschine	Beschreibung (Simulation) des Zusammenwirkens Kette-Antriebsrad und Optimierung der Zahngemietrien	analytische Auslegungsgrundlagen	[Pr1]
Pr2: Lastumlagerung Hochspannungsisolator-kette	Anwendung: Freileitungssell einer Hochspannungslleitung inkl. Armaturen und Isolatorketten	Erstellung einer template-driven Simulationslösung mit "gesicherten" Eingriffsmöglichkeiten für simulationstrennde Bediener		[Pr2]
Pr3: BioChipFeeding - Hackgutgreifer	Anwendung: Sensorgesteuerter Hackgutgreifer	Lösungsprinzipienübersicht, Konstruktion, Fertigung und Testung des Greifers		[Pr3]
Pr4: Logistikdefinition mobiler Containerumsatzer	Anwendung: Fahrzeuggebundene Manipulationseinrichtung für Container	logistische Planung und Berechnung des Einsatzes der Manipulationseinrichtung in diversen Ländern - Ableitung von Entwicklungszielen	Entwurfs-Konstruktion der Einrichtung	[Pr4]
Pr5: KBE Ventiltriebsteuerkette	Anwendung: Verbrennungskraftmaschine - Nockenventilsteuerkette	KBE-Lösung in vorgegebener Motor-CAD-Methodik zur autom. parametrischen Erstellung und Dimensionierung einer Steuerkette		[Pr5]
Pr6: Varianten- und Geichteilanalyse	Anwendung: Baureihe einer Teilschnittmaschine	Auffinden von geometrischen Gleichheiten untersch. Nummerierung in einem CAD-Datenverwaltungssystem		[Pr6]

Bild 5.13: Schlüsselpublikationen und –projekte

Die folgenden Ausführungen ordnen den Schlüsselpublikationen und –projekten die identifizierten und entwickelten Methoden zu. Insbesondere im Falle der Methodiken MeK2, MeB1 und MeW1 bezieht sich die Zuordnung auf die Darstellung der Wirkung von mit den Methodiken ausgewählten Methoden (Bild 3.5)!

ZIELE UND WIRKUNG

	Konstruktion					Berechnung			Wissen	
	MeK1	MeK2	MeK3	MeK4	MeK5	MeB1	MeB2	MeB3	MeW1	MeW2
Gesamtwirksamkeit Methodiken und Methoden	10	9,5	10	10	9,5	10	10	10	10	10
relative Wirksamkeit Themenkreise	7,25					7,16666666				
Gesamtwirksamkeit nur Methoden	5	4,8	5	5	4,8	5	5	5	5	5
P1: Kettenzugschwingung; KONSTRUKTION						●	◐			
P2: Polygoneffekt; KRANFACHTA GUNG						●	●			
P3: KBx in der Technischen Logistik; Jahrbuch LOGISTIK	◐	◐		●	◐				◐	●
P4: xKBE for material handling equipment; IMHRC	◐	◐		●	●				●	●
P5: Regalbediengerät KBE; ICMaS				◐	●					◐
P6: Seiltrommel KBE; HF				◐	●					◐
P7: Methoden zur effizienten Anwendung und Verbreitung von Simulation in der Technischen Logistik; ITI						●	●	◐		
P8: Seilschwingungen; MHCL						●				
P9: SeilFEM; KONSTRUKTION						●				
P10: M-box; logistics research	●	●	◐							
P11: Sorter CAE 2x (aufbauend); ICMaS	●		◐		◐	●			◐	◐
P12: Antriebssimulation Karusselllager; IMHRC						●				
P13: Spielzeitermittlung; F+H	●	◐								
P14: Dynamische Lasten im Vergleich zu EN 818/7; KRANFACHTA GUNG						◐	●			
Pr1: Teilschnittmaschine MKS						●	◐			
Pr2: Lastumlagerung Hochspannungsisolatorkette						●		●		
Pr3: BioChipFeeding - Hackgutgreifer		●	◐	●	◐	◐				
Pr4: Logistikdefinition mobiler Containerumsetzer	●	●	◐							
Pr5: KBE Ventiltriebsteuerkette				●	●				◐	
Pr6: Varianten- und Gleichteilanalyse		●		◐					◐	◐

◐	Teile der Methode angewandt, geringer Nutzen
◑	Teile der Methode angewandt, große Nutzen
◐	Methode angewandt, geringer Nutzen
●	Methode angewandt, großer Nutzen

Bild 5.14: Methodeneinsatz bei den Schlüsselpublikationen und –projekten (Publikationsmedium in Großbuchstaben nachgestellt)

Bild 5.14 zeigt die in den Schlüsselpublikationen und –projekten eingesetzten, bzw. deren entsprungenen, Methodiken und Methoden. Die relativ größte Wirksamkeit kann eindeutig für die Methodik MeB1 festgemacht werden, wengleich hiermit die Wirksamkeit von CAE an sich und nicht nur des Auswahlprozesses nach MeB1 zu betrachten ist. Betrachtet man die reinen Methoden, also ohne MeK2, MeB1 und MeW1, so sind in absteigender Reihenfolge MeK4, Mek5 und ex aequo MeK1 und MeB2 am wirksamsten.

Die Bewertung des Methodeneinsatzes und dessen Nutzen bezieht sich in erster Linie auf die Hauptergebnisse der einzelnen Schlüsselpublikationen und –projekte. Bild 5.15 ordnet diese noch dem Produktentwicklungsprozess (PEP) zu und charakterisiert jeweils eine zugehörige Haupt- und Nebenmethode. Wenn mehrere Methoden in denselben Phasen zum Einsatz gelangen wurde eine Farbschattierung als Mischfarbe verwendet.

Engineering in der Technischen Logistik									
Methoden und deren Ziele									
Vorgehen nach VDI 2221	Phase	Produktplanung PEP: Vorgänger (Start)	Aufgabe klären	Konzeption	Entwurf	Ausarbeitung		-> Fertigung PEP: Nachfolger	
	Arbeitsschritt		1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module		6. Gestalten des gesamten Produkts
Ergebnis			Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktkonstruktion
Konstruktionsart			Anpassungskonstruktion	Variantenkonstruktion	Wiederholungskonstruktion				
Konstruktionsmethoden									
konstruieren	MaK1	simultaneous engineering und Fortbildung in der Technischen Logistik		methodisches Entwickeln					
	MaK2			rechnergestützte Bezeichnung u. Syntax u. Lösungsprinzip					
	MaK3			Methodikansatz im CAD					
	MaK4 MaK5			autom. Konstr. (KBE, KRSD, KBL = KBL)					
berechnen	MaB1	Berechnungs-/Auslegungs-/Optimierungsmethoden							
	MaB2	Modellbildung und Simulation für die Technische Logistik - CAE							
	MaB3	Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und -größen							
wissen	MeW1	Wissensmethoden							
	MeW2	Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess							
Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in subtr. Konstruktionen									

Ergebnis der Phase	Ideenentwicklung	Anforderungsdefinitionen	Funktionsstrukturen	Prinziplösungen	modulare Strukturen	Vorentwürfe	Gesamtentwurf	Produktkonstruktion	Haupt- u. Neben-Methode
Titel	Haupt- und Nebenziele in jeweiliger PEP-Phase								
P1: Kettenzugschwingung; KONSTRUKTION						Modellbildung eines Kettenzuges			MaB1
P2: Polgoneffekt; KRANFACHTAGUNG						exakte Beschreibung Polgoneffekt mit Berücks. Kraftlage			MaB2, MaB1, MaW1
P3: KBx in der Technischen Logistik; Jahrbuch Logistik 1996				Wissensvisualisierung und Funktionsdiagramm KBE-App; Anwendung am Roboterführer		Entwicklungsmethoden für die Technische Logistik (Übersicht)			MaK4, MaK5, MaW2
P4: x:KBE for material handling equipment; IMHRC						Beispiele KBx			MaK4, MaW2
P5: Regalbediengeräte KBE; ICMAS						Klassifizierungsschemata KBx, Grundzüge KBE-App			MaK5
P6: Seitentrommel KBE; HF						Anwendung KBE, KRSD, KBL an Seitentrommel, RBG und Lagersystem (Übersicht)			MaK5, MaW2
P7: Methoden zur effizienten Anwendung und Verbreitung von Simulation in der Technischen Logistik; ITI				Modellbildungsgrundlagen, Grundmodelle für die Logistik, Sorter-Modellbaukasten		Methoden zum Einsatz und Verbreitung der Simulation			MaK3, MaB2
P8: Seil-schwingungen; MBCL				CAE-Modelle: Seil für Lastumlagerung					MaB1
P9: SeilFEM; KONSTRUKTION				Seilmodelle		Nachweis von dyn. Entlasten Seil			MaB1
P10: M-box; logistics research	techn. Anforderungsdef. aus Logistik u. sim. ang. mit Logikikonzeptentwicklung			methodisches Entwickeln der Funktionen (Verbinden, Modulbildung, ...)		Auslegung Box-Festigkeit			MaK1, MaK2, MaK3
P11: Sorter CAE Zu (aufbauend); ICMAS	techn. Anforderungsdef. aus Logistik			Modell-, Optimierung Kippcharakter, Einseitigkeit					MaK4, MaB1, MaB2
P12: Antriebssimulation Karussellanlage; IMHRC						KBx-Beispiele für Sortersysteme			MaK4, MaW2
P13: Spielzeitermittlung in	Spielzeitermittlung mit Monte-Carlo					Morphologie u. Struktur Abhängigkeiten in Sortieranlagen			MaK1, MaW2
P14: Dynamische Lasten im Vergleich zu EN 19167; KRANFACHTAGUNG						Opt. Momentenverteilung Antriebswelle			MaK1, MaB1
P15: Teleskopmaschine MHC						neues Auslegungschema Kettenrad			MaB2, MaB1
P16: Lastumlagerung Hochspannungsfestortskarte						Opt. Eingriff Turax-Kettenantrieb			MaB1, MaB2
P17: Bio-Chip-Feeding - Hochgeschwindigkeit						Modellbildung, Datenbankerstellung und Opt. für Lastumlagerung			MaB1, MaB3
P18: Logistikdefinition mobiler Containerumsatzer	techn. Anforderungsdef. aus Logistik			methodisches Entwickeln der Hauptstrukturen		Simulation "ohne relevantes Simulationswissen"			MaK1, MaK2
P19: KBE Ventiltriebsteuerketten						verfügbare Steuerkettenkonstruktion			MaK5, MaK4
P20: Varianten- und Gleichheitsanalyse						Software f. Gleichheitsbewertung			MaK2, MaW2

Bild 5.15: Methodeneinsatz bei den Schlüsselpublikationen und –projekten – Zuordnung der Hauptergebnisse zum PEP

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich, auch mit Bild 5.16, die zwei Themenkreise „konstruieren“ und „berechnen“ als gleich wirksam und wirksamer als „wissen“ herausstellen. Die Methodiken/Methoden des Themenkreises „wissen“ sind vor allem begleitend für die KBx-Lösungen wirksam. Weiters ist der Einsatz von Wissensmanagementmethoden von MeW1 in der Praxis v.a. aufgrund erst aufzubauender Akzeptanz nicht so einfach umsetzbar wie Methodiken/Methoden des Konstruierens und Berechnens.

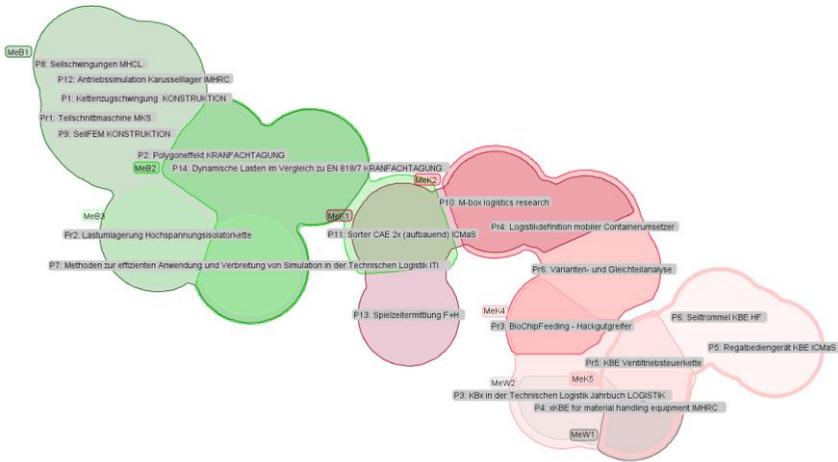


Bild 5.16: Schnittmengendiagramm des Methodeneinsatzes bei den Schlüsselpublikationen und -projekten (nur Gewichtung 3/4-voll und voll aus Bild 5.14 berücksichtigt)

Da die Quellen der Prämissen, hauptsächlich gebildet von den Schlüsselpublikationen und -projekten, eine subjektive Erfahrungssicht des Autors darstellen, sei an dieser Stelle wieder erwähnt, dass die Ergebnisse des Methodendefinitionsprozesses von den Prämissenquellen abhängen und bei anderer Quellenlage zu anderen Methoden führen können. Wohl aber ist die Vorgehensweise an sich als wissenschaftlich exakt und wiederholbar nutzbar einzustufen und zu empfehlen.

6 Lehranhang

Einführende Worte

Der Lehranhang zur Habilitationsschrift „Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik“ erweitert und ergänzt die eigentliche Schrift und dient zwei Hauptzielen²⁹⁸:

- Ausführliche Aufbereitung ingenieurlicher Grundlagen des „Engineerings in der Technischen Logistik“ und Ergänzung der Habilitationsschrift um technische Details zur parallelen Verwendung mit jener.
- Methodisch, didaktische Wissensvermittlung für geometrisch-stoffliche Aufgaben der Produktentwicklung in der Ausbildung zu Maschinenbauingenieurinnen und –ingenieuren an der TU Graz und zur Schulung von im Berufsleben stehenden Konstrukteurinnen und Konstrukteuren.

Folgend dem Ansatz der Habilitationsschrift werden moderne Produktentwicklungsmethoden identifiziert, analysiert, adaptiert und ggf. erweitert, um dem Engineering in der Technischen Logistik zu dienen. Die Klärung von Begriffen und Methoden erfolgt stets im Kontext der Technischen Logistik und wird durch eine umfangreiche Literatursammlung erweitert. Viele Beispiele erläutern die Wirkung der Vorgehensweisen. Die hier eigens für das Engineering in der Technischen Logistik entwickelten zehn Methoden sind Inhalt der eigentlichen Schrift. Eine Bewertung für den konkreten Einsatz in der Technischen Logistik ist ebenso der Habilitationsschrift selbst zu entnehmen, was diesen Lehranhang allgemeiner verwendbar macht und ihn somit auch für Produktentwicklungsaufgaben außerhalb der Technischen Logistik grundlegend verwendbar macht.

Zusammenfassend soll damit dem Engineering in der Technischen Logistik, und auch verwandten Branchen, geholfen werden, eine Theorie-, Methoden-, und Erfahrungslücke hin zu hochentwickelten Branchen zu schließen. Dann wird eine

²⁹⁸ Einen detaillierten Überblick über den Gesamthalt von Habilitationsschrift und Lehranhang gibt das abschließende Kapitel 7.

Mit einem Asteriskus (*) gekennzeichnete Kapitelüberschriften des Kapitels 2.2 verweisen auf ergänzendes und weiterführendes Material im Lehranhang. Zur besseren Verwendbarkeit im parallelen Gebrauch der beiden Einzelwerke folgt die Nummerung des Lehranhangs Kap. 6 jener von Kap. 2.2. So sind beispielsweise weiterführende Informationen zu Kap. 2.2.6 CAx* dem entsprechenden Kapitel 6.7 zu entnehmen. Da der Lehranhang Kap. 6 separat verwendbar ist und die Nummerung beibehalten wurde, kommt es bei einigen wenigen Kapiteln zu einer inhaltlichen Parallelisierung. Weitestgehend deckungsgleich sind somit die Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4 mit den entsprechenden Kapiteln 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3.

Doppelt verwendete Bilder sind im Text immer dadurch gekennzeichnet, dass sowohl auf Kapitel 2 als auch Kapitel 6 verwiesen wird.

Effizienzsteigerung im Engineering und Entwicklungsprozess ebenso möglich wie die (virtuelle) Entwicklung und Optimierung logistischer Technik. Aus der Grundlagendarstellung ist folgend auch weiteres Forschungs- und Entwicklungspotenzial für das Engineering in der Technischen Logistik identifizierbar.

Eine lange Erfahrung mit dem Lehranhang durch seine bereits teilweise Verbreitung des zusammengestellten Materials zeigte und zeigt von seiner Wirkung.

6.1 (Technisches) System

Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System). Die Funktion eines Systems kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Nach ihrem Verhalten werden statische und dynamische Systeme unterschieden. [GÜN14]

Technische Systeme sind künstlich erzeugte geometrisch stoffliche Gebilde, die einen bestimmten Zweck (Funktion) erfüllen und somit Operationen (physikalische, chemische, biologische Prozesse) bewirken. Systeme können anhand ihrer Eigenschaften beschrieben werden. Eine Eigenschaft ist hierbei alles, was durch Beobachtungen, Messergebnisse, allgemein akzeptierte Aussagen usw. von einem Gegenstand festgestellt werden kann. Wichtige kennzeichnende Eigenschaften können zur besseren Hervorhebung mit dem Begriff Merkmal bezeichnet werden. Für technische Systeme fasst die DIN 2330 die Produktmerkmale in drei Hauptgruppen zusammen: Beschaffenheit, Funktion und Relationen (s.u.).

Die Erscheinungsformen von Lösungen technischer Aufgaben sind technische Gebilde die nach [FEL13a] als Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder Einzelteil bezeichnet werden. Diese Bezeichnungen werden je nach Fachgebiet unterschiedlich verwendet, ein Beispiel dafür ist der Begriff Apparat, der sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Elektronik als Fotoapparat mehrfach verwendet wird. So werden auch komplexere Strukturen wahlweise als Anlagen, Maschinen oder gar Geräte bezeichnet, ohne genau zu differenzieren. Die Benennungen sind vielfach Ergebnis historischer Entwicklungen aus unterschiedlichen Einsatzbereichen; für die Technische Logistik wird ein Definitionsversuch in Kap. 2.2.3.3 eingeführt.

Nach [FEL13a] hat die bisherige Diskussion gezeigt, dass eine strenge Einteilung nach Merkmalen nicht immer möglich oder im Hinblick bereits eingeführter Begriffe nicht immer zweckmäßig ist. [[HUB84] aus [FEL13a]] schlägt die Betrachtung technischer Gebilde nach systemtechnischer Betrachtung vor. Die Verwendung dieses Begriffes hat sich mittlerweile in der Technik durchgesetzt und in fast allen Bereichen spricht man vom Technischen System, auch in der Logistik [HNS07], [BHS11] (s. auch Kap. 6.2f.). Nach [[HUB84] aus [VWB+09]] müssen für die Betrachtung technischer Systeme Schlüsselfragen über ihren Zweck, ihre Wirkweise und ihren Aufbau beantwortet werden.

Darüber hinaus wird untersucht, welche Zustände ein technisches System erreichen kann. [EM13] führen als Zweck dieser Betrachtungsweise folgende drei Argumente an:

- Das „Denken in Systemen“ erleichtert die Planung, Entwicklung und Konstruktion sowie den Bau des technischen Systems. Insbesondere ist die Einführung klarer Systemgrenzen von großer praktischer Bedeutung.
- Am gedanklichen bzw. graphisch oder mathematisch dargestellten Modell können die Eigenschaften des technischen Systems frühzeitig erkannt bzw. simuliert werden.

- Die abstrakte Modellierung ermöglicht die Reduktion der Betrachtung auf das Wesentliche.

Ein (technisches) System besteht nun allgemein nach [EM13], [VDI 3633] und [VDI 2221] aus:

- einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft und geordnet (Struktur) sind.
- einer Systemgrenze, die das System von der Umgebung abgrenzt.
- Beziehungen zur Umgebung durch Ein- und Ausgangsgrößen.

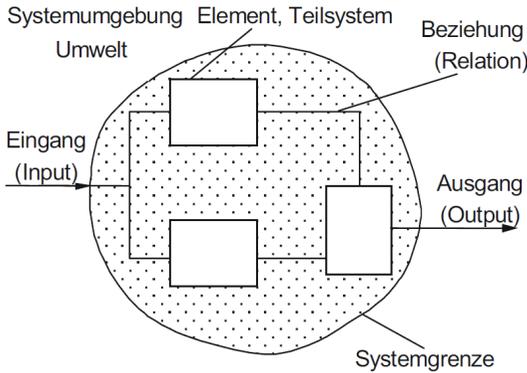


Bild 6.1: Darstellung eines Systems [EM13]

Die Funktion eines Systems kann durch den Unterschied der dem Zweck entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Die Systemelemente können selbst wiederum Systeme sein (Subsysteme), die aus Elementen und Beziehungen bestehen. Jede Abbildung technischer Gebilde als technisches System stellt eine Modellierung dar (vgl. Kap. 6.4). Die o.a. Grundstruktur eines Systems ist Bild 2.7 zu entnehmen. Durch Klassifikation unterschiedlichster Art kann man die Komplexität von Systemen zusammenfassend beherrschen (weitere Ansätze und Klassifikationen im Umgang mit Komplexität der Entwicklungsarbeit von technischen Systemen sind Kap. 6.12 zu entnehmen).

Nach [EM13] können die folgenden drei Hauptmerkmale eines technischen Systems festgehalten werden. Eigenschaften (Merkmale) von technischen Systemen haben eine Bedeutung (Semantik, Qualität) und eine eventuell zahlenmäßige Ausprägung (Quantität).

- Beschaffenheitsmerkmale:
sind Merkmale, die am Produkt selbst festgestellt werden können (z.B. Gestalt, Werkstoff, Farbe, Verbindungsart). Auf diese Merkmale lassen sich alle Eigenschaften (also auch die nachfolgend aufgeführten Funktions- und Relationsmerkmale) zurückführen.
- Funktionsmerkmale:

bezeichnen den gewollten Zweck eines Produkts, wie z.B. das zu übertragende Drehmoment oder den zu messenden Temperaturbereich.

- Relationsmerkmale:
sind Eigenschaften eines Produkts, die erst im Zusammenhang mit anderen Systemen (oder mit dem Menschen) von Bedeutung sind. Beispiele sind Spannungen und Verformungen aufgrund äußerer Kräfte, Geräusche, Passungen, Kosten, Bedienbarkeit oder Umweltbelastung.

Die Identifikation und der Einsatz von Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik bezieht sich in drei vorgestellten Themenkreisen auf:

- „Umgang mit Wissen“: auf die Relationsmerkmale
- „Unterstützung der Konstruktion“ und „Berechnung und Simulation“ auf die Beschaffenheits- und Funktionsmerkmale.

Die Betrachtung von Systemen des Materialfluss' und der Logistik als technisches System ermöglicht die Anwendung vieler technischer Methoden und Regelwerke, die auf diesem Ansatz basieren. Erwähnt sei dazu der große Bereich der Entwicklungsmethodik mit den energetischen, stofflichen und informationstechnischen Umsätzen in einem technischen System .

6.2 Logistik

Die Logistik kann als Wissenschaft von Planung, Steuerung und Überwachung von Material- Personen- und Informationsströmen in komplexen Systemen betrachtet werden [GW11]. Logistik ist aber auch eine Branchenbezeichnung, die von Dienstleistern verwendet wird und alle mit der Logistik befassten Unternehmen einschließt.

Logistik agiert in Netzwerken und verfügt über Organisationsmechanismen die sich aus unterschiedlichen Topologien zusammensetzen. Die Strukturen der logistischen Netze sind als Graphen mit der Graphentheorie oder mit der Systemtheorie als Knoten und Kanten beschreib- und berechenbar. Die Dimensionen der Netzwerke reichen von global über national bis intern. Die Knoten können von Flughäfen über Geschäfte auch einzelne Maschinen sein, und die Kanten sind Flugrouten, Straßen und Förderstrecken. Das logistische Grundprinzip der „sieben r“:

- Die richtige Ware
- zur richtigen Zeit
- am richtigen Ort
- in der richtigen Menge
- in der richtigen Qualität
- zu den richtigen Kosten
- mit den richtigen Informationen

wirft Fragen wie Durchlaufzeitoptimierung der Objekte, Durchsatz und Kapazitätsoptimierung, Wegoptimierung und Tourenplanung auf. Die Systemgrößen der Logistik sind nach [JÜN89] weitestgehend die Themen der zuvor erwähnten Fragestellungen und können mit Kosten, Qualität, Kapazität, Sorten, Wege, Durchlaufzeiten, Bestände, Service und Termine angegeben werden.

Es existieren unterschiedliche Untergliederungen bzw. Systematisierungen der Logistik in Fachdisziplinen, einmal nach

- Beschaffungslogistik
- Produktionslogistik
- Distributionslogistik
- Verkehrslogistik
- Entsorgungslogistik

aber auch nach [PFO00] wie folgt:

- Makrologistik
- Metalogistik
- Mikrologistik
 - Krankenhauslogistik
 - Unternehmenslogistik
 - Industrielogistik
 - innerbetrieblich
 - zwischenbetrieblich
 - Handelslogistik
 - Dienstleistungslogistik
 - Militärlogistik

Die Makrologistik stellt hier eine effiziente Güterversorgung sicher und kann global gesehen werden. Sie benötigt ebenso wie die anderen Bereiche eine leistungsfähige Infrastruktur, geeignete Institutionen und wirksame Gesetze [GUD05].

Die Metalogistik ist zwischen Makro- und Mikrologistik einzuordnen. Sie reicht über die Grenzen von Einzelorganisationen hinaus und beinhaltet eine Kooperation mehrerer Organisationen im Güter- und Informationsfluss. Es kann unterschiedlich kooperiert werden zwischen Unternehmen und der verladenden Wirtschaft. Der Fokus liegt hier auf einzelnen Absatzkanälen zusammenarbeitender Organisationen in makrologistischem Kontext [PFO00].

Die Mikrologistik versorgt einzelne Verbraucher kostenoptimal mit den benötigten Gütern. In der Mikrologistik ist die Unternehmenslogistik und darin die Industrielogistik eine querschnittsbildende Funktion über viele Unternehmensbereiche hinweg. Die Ausführungen zu den Methoden für die Entwicklung von Materialflusssystemen in dieser Arbeit beziehen sich hauptsächlich auf die innerbetriebliche Industrielogistik in Unternehmen und sind daher dem Bereich Mikrologistik zuzuordnen.

Einstufend bewertend kann abschließend aus [GUD05] zitiert werden:

„Neu an der Logistik von heute sind - abgesehen von dem Begriff - die Vielzahl der technischen Lösungsmöglichkeiten, die höheren Geschwindigkeiten, die größeren Kapazitäten sowie die zunehmende Vernetzung. Hinzu kommen die vielfältigen Handlungsmöglichkeiten, die sich aus der Steuerungstechnik, der Telekommunikation und der Informatik ergeben. Neu vor allem aber ist die Erkenntnis, daß die Verkehrsverbindungen, Lager und Umschlagzentren ein Geflecht von Netzwerken bilden, die Unternehmen, Haushalte und Konsumenten in aller Welt mit den benötigten Gütern und Waren versorgen. Diese Erkenntnis hat sich in den letzten Jahren rasch verbreitet und ist heute unter dem modernen Begriff Logistik in aller Munde. Sie ist ein Ergebnis der theoretischen Logistik...“

...Die theoretische Logistik ist aus der Planung für die praktische Logistik sowie aus der Kriegswissenschaft, den Ingenieurwissenschaften und den Wirtschaftswissenschaften hervorgegangen. Sie wurde lange Zeit unter anderen Namen betrieben, wie Materialflusstechnik, Transporttheorie, Verkehrswirtschaft, Materialwirtschaft und Operations Research. Die Theoretiker der Logistik haben zunächst die historisch gewachsenen Fertigkeiten und Geschäftspraktiken studiert, Techniken und Handlungsmöglichkeiten analysiert und Lösungen für aktuelle Probleme entwickelt...

...Eine rein technische oder allein ökonomische Sicht der Logistik verstellt den Blick für das Ganze und verbaut viele Handlungsmöglichkeiten.“

Das herausragende Merkmal der Branche ist laut [VDM12a] das interdisziplinäre Zusammenspiel in der Logistik. Die Betonung liegt hierin auf dem Zusammenspiel und adressiert demnach auch die oben dargelegte Nichteffizienz losgelöster Betrachtungen. In diesem Rahmen der Interdisziplinarität soll die vorliegende Arbeit einen technisch-ingenieurwissenschaftlichen Beitrag für die Entwicklung von Materialflusssystemen liefern, ohne den logistischen Kontext jeder daraus resultierenden technischen Fragestellung auszublenden.

Die Logistik unterliegt seit einigen Jahrzehnten einem sehr starken Wandel von einer reinen Beschaffungsfunktion hin zu globalen Netzwerken; Bild 2.8 bzw Bild 6.2 fasst dies grafisch zusammen.

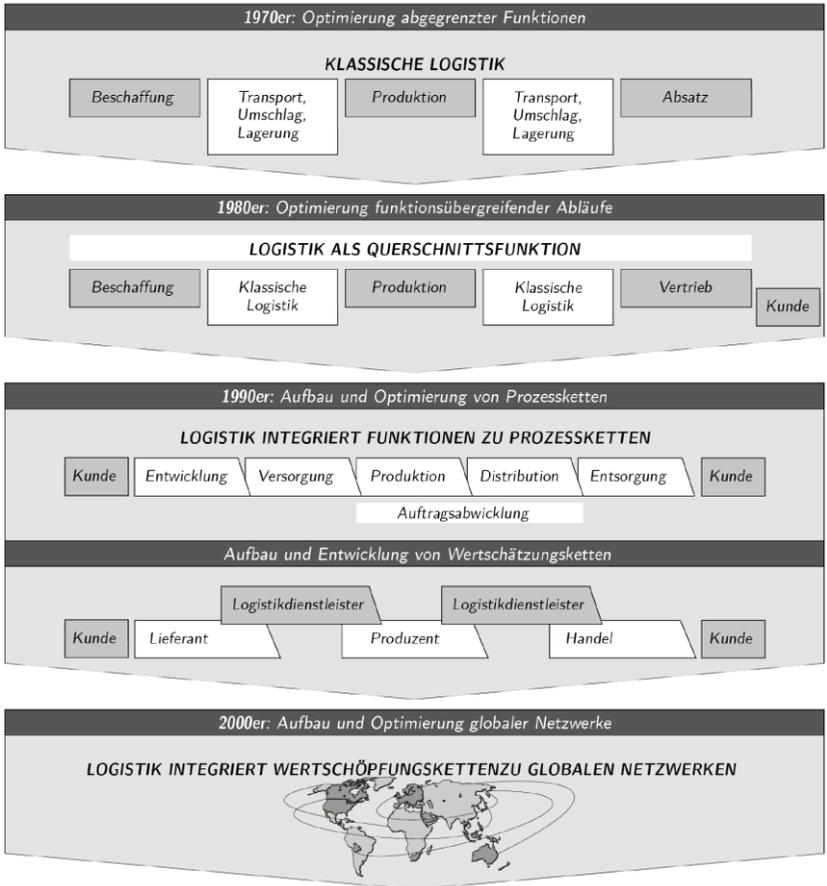


Bild 6.2: Wandel der Logistik und ihres Verständnisses [BAU14]

6.3 Technische Logistik

Die VDI definiert die Technische Logistik in der VDI-Gesellschaft „Produktion und Logistik“ wie folgt [VDI12]:

„Die Logistik ist heute die drittgrößte Branche in Deutschland. Die Verfügbarkeit von intelligenten Logistikdienstleistungen gehört zu den wichtigsten Anforderungen an einen modernen Industriestandort. Die industrielle Produktion ist darauf angewiesen, dass „die richtige Ware zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort“ ist.

Unter Technischer Logistik (auch Intralogistik) versteht man die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschs in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen. Dabei beinhaltet die Technische Logistik die Prozesse von der Rampe bis zur Rampe wie zum Beispiel:

- Wareneingang
- Verpackung
- Warenidentifikation
- Lagerung
- Kommissionierung
- Sortierung
- Warenausgang
- Verladung
- Warenumsschlag

Thematisch werden im Fachbereich Technische Logistik auch alle Arten der Fördertechnik, d.h. Gabelstapler, FTS, Krane, Rollenförderer usw. betreut. Ein weiteres spezielles Feld in der Logistik ist das Schüttgut, d. h. der Transport von grob- und feinkörnigen Materialien aus Bergbau, Chemie und Nahrungsmittelindustrie über teilweise sehr weite Strecken.

Der Fachbereich versteht sich als die erste Adresse in der Technischen Logistik in Deutschland. Einen besonderen Stellenwert hat in der Logistik das Thema Ladungssicherung. Ein umfangreiches Regelwerk von VDI-Richtlinien hat als anerkannte Regel der Technik in die Straßenverkehrsordnung Einzug gehalten.“ [VDI12]

Auffallend dabei ist die Gleichsetzung von Technischer Logistik mit Intralogistik, die nach Meinung des Autors bspw. im Bereich der Schüttgut-Fördertechnik oder Seilbahntechnik weit gefasst ist, bedenkt man dort Anlagenlängen von durchaus mehreren Kilometern.

Im Fachbereich "Technische Logistik" (FB3) der VDI befassen sich folgende Fachausschüsse in ihren Richtlinienausschüssen mit Intralogistik-Themen, daraus kann man auch auf den Inhalt der Technischen Logistik schließen:

- FA301 Logistiksysteme und -management
- FA302 Logistikprozess und IT
- FA303 Zuverlässigkeit in der Intralogistik
- FA304 Krane
- FA305 Flurförderzeuge
- FA306 Lager- und Materialflusstechnik

- FA307 Schüttgut-Fördertechnik
- FA308.1 Verpackungslogistik, FA308.2 Ladungssicherung
- FA309 Fahrerlose Transportsysteme (FTS)
- FA310 Auto ID-Technologie

Bei Aufruf „Technische Logistik“ auf den Seiten der VDMA wird man automatisch weitergeleitet zu „Fördertechnik“! [VDM12b] Dort findet sich keine weitere Untergliederung.

Man kann die Technische Logistik in Abgrenzung zur betriebswirtschaftlichen Logistik sehen. Wenn nach [JOD12]

- Logistik die wissenschaftliche Lehre von der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie-, und Informationsflüsse in Systemen, Netzen und Prozessen ist
- Die Technische Logistik die Strukturen, Systeme und Geräte bereit um den optimalen Fluss der Objekte durch die Netzwerke zu ermöglichen bereitstellt und
- "Materialfluss die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb fester Bereiche." (VDI 3300; DIN 30781) ist.

Die Technik der Logistik ist nach [HNS07] neben der Informatik und der Betriebs- und Volkswirtschaft eine der drei tragenden Säulen der Logistik.

Die technische Sicht der Logistik hat den Materialfluss im Vordergrund. Die Vorgänge dabei sind Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie Verteilen von Gütern innerhalb fester Bereiche. Die Objekte darin sind Güter, Personen, Informationen, Energie, Materialfluss- Informations- und Produktionsmittel sowie Infrastruktur. Diese Objekte durchlaufen Transformationsprozesse die den Systemzustand der Objekte hinsichtlich Zeit, Ort, Menge und Qualität durchlaufen.

Eine ähnlich lautende Sichtweise findet sich in [GW11]. Im Erkenntnisobjekt „Flüsse in Netzwerken“ spielt die Technik die folgende Rolle:

„Die technische Sichtweise der Logistik bezieht sich auf das Zusammenwirken von Infrastrukturen (z.B. Straßen, Schienen, Lagerhäuser), Maschinen (z.B. Lkws, Gabelstapler, Flurförder-zeuge), Behältern (z.B. Container, Paletten) und Personen (z.B. Kommissionierer, Gabelstaplerfahrer, Lkw-Fahrer). Technische Fragestellungen ergeben sich auf allen Ebenen der Logistik. Komplexe Materialflusssysteme sind aus verschiedenartigen Komponenten zusammengesetzt, deren anforderungsgerechtes Zusammenwirken betrachtet werden muss. Für die Gewährleistung einer logistikgerechten Materialflussteuerung ergibt sich z.B. eine Vielzahl unterschiedlichster technischer Gestaltungs- und Konstruktionsprinzipien zur Realisierung von Förder- und Lagerkonzepten für Güter mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften.“

Die Technische Logistik betrachtet ganzheitlich die Technik zur Erfüllung des Materialfluss' zwischen Quelle und Senke und schließt somit die Verkehrstechnik mit ein, da sie inner- und außerbetriebliche Logistikketten, zum Teil über beträchtliche Distanzen, berücksichtigt [AIK08]. Die Verkehrstechnik ist somit Erfüllungselement außerbetrieblicher logistischer Funktionen. In Abgrenzung zur Verkehrstechnik hat die Materialflusstechnik als Teil der Transporttechnik einen

örtlich begrenzten Betrachtungsraum und ist inner- und außerbetrieblich eingesetzt.

In der Literatur werden die Begriffe oft unterschiedlich verwendet und die Begriffe Fördertechnik, Materialflusstechnik und Transporttechnik nicht differenziert [LOG15]. Die Differenzierung nach Transportentfernungen „weit und begrenzt“ ist unscharf aber gebräuchlich [MRW08]. Die manipulierende Materialflusstechnik wird hier nicht betrachtet, da sie in ein anderes Fachgebiet, die Handhabungstechnik, weist. Nach Meinung des Autors wirft auch der Begriff Materialflusstechnik als Oberbegriff über die Fördertechnik Diskussionen auf, da er vom Wortsinn her Personenfördertechnik ausschließt. Auch dafür gilt wie oben, dass nicht durch alle Quellen hinweg scharf differenziert wird.

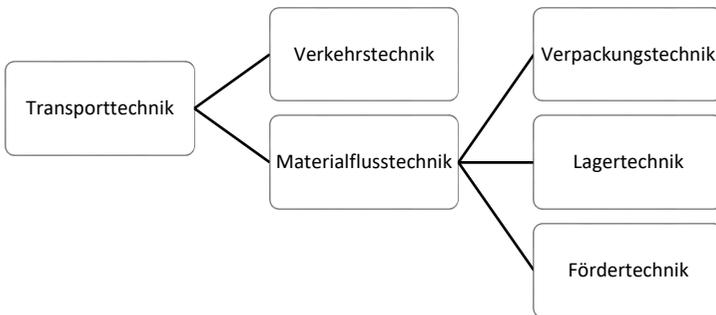


Bild 6.3: Einstufung der Materialflusstechnik

Eine Abgrenzung analog Bild 2.9 bzw Bild 6.3 findet sich bei [HKS04]: „Die Fördertechnik ist der Teil der technischen Wissenschaften, welcher sich mit jenen Einrichtungen und Verfahren beschäftigt, die es ermöglichen, Ortsveränderungen von Personen und Gütern über begrenzte Entfernungen, meist auf festgelegten Wegen, durchzuführen. Im Gegensatz dazu spricht man von Verkehrstechnik, wenn diese Ortsveränderungen über relativ unbegrenzte Entfernungen erfolgen – auf dem Festlande, auf dem Wasser oder in der Luft.“

Man kann folgende Systematisierung und Dimensionen der der Technischen Logistik klassifizierend nach Bild 2.10 bzw Bild 6.4 festhalten, [ARN06] gibt eine ähnliche Struktur wieder, allerdings ohne zwischen Materialfluss- und Fördertechnik zu unterscheiden:



Bild 6.4: Dimensionen der Technischen Logistik

Ein einzelnes Fördersystem kann wie nach Bild 2.11 bzw Bild 6.5 dargestellt werden und besteht aus den darin angegebenen Bestandteilen [JOD12].

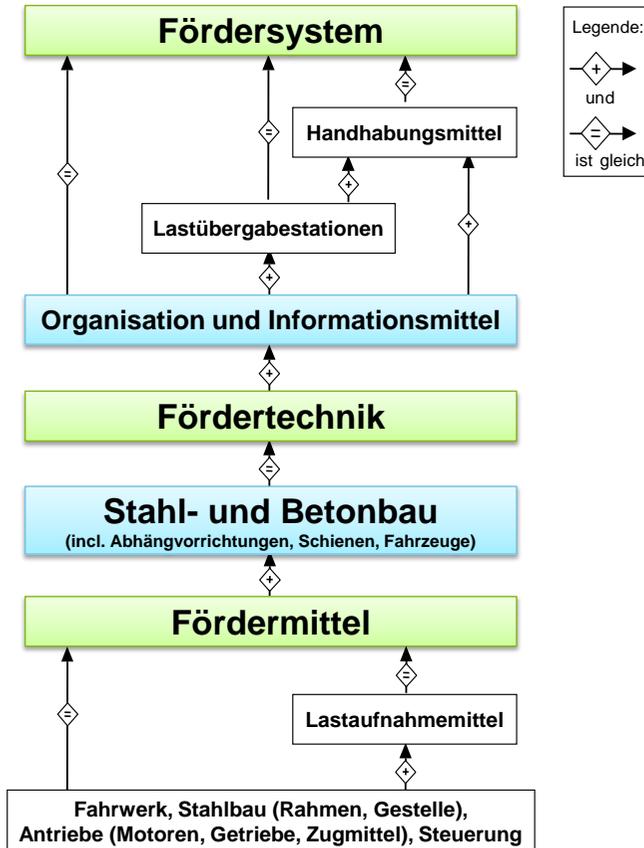


Bild 6.5: Systematik eines Fördersystems [JOD12]

Eine Herausforderung ist in jedem Planungs- bzw. Entwicklungszeitpunkt eines Materialflusssystems die Verknüpfung der organisatorischen Ansätze mit den maschinenbaulich-technischen Aufgaben die eine Analogie in der Behandlung des Fachgebietes Technische Logistik in jenem der Mechatronik erkennen lassen, wo hierin ebenfalls unterschiedliche Disziplinen (Maschinenbau und Elektronik/Informatik) integrierend zusammenwirken. Lösungen zu diesem Problem versuchen die entwickelten Methoden für das Engineering in der Logistik²⁹⁹ bereitzustellen.

²⁹⁹ Die Betrachtungen im Rahmen dieses Werkes beziehen sich stets auf die mechanisch-maschinenbauliche Materialflusstechnik und ggf. Materialflusssysteme (geometrisch-stofflich) ohne Betrachtung mechatronischer Ansätze und organisatorisch-informationstechnischer Beschreibung.

Die Kombination der Mechanik der Materialflusstechnik mit der Elektrotechnik ist im Rahmen der dynamischen Betrachtung (Simulation mit bspw. MKS) der Materialflusstechnik hier Gegenstand.

6.3.1 Materialflusssystem

Materialflusssysteme sind mit den Disziplinen ihrer Gestaltung, Organisation und Automatisierung/Identifizierung vor allem jene drei großen physischen Bereiche der

- Lager- und Transportsysteme
- Sortier- und Verteilsysteme
- Kommissioniersysteme

und stellen die Anlagendimension gemäß Bild 2.18 dar.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.1 ist in der Technik die Betrachtung jener als System gebräuchlich. Für die Betrachtung von Materialflüssen in logistischen Systemen wird das Materialflusssystem nach Bild 2.12 bzw Bild 6.6 und Bild 6.7 definiert eingeführt. Es besteht entsprechend der Systemtheorie aus Relationen zwischen Elementen, Subsystemen und dem Gesamtsystem mit definierter Systemgrenze und Ein/Ausgangsgrößen. Die Untergliederung jener in die Domänen Stoff, Energie und Anlage ist im Fokus der entwickelten Methoden sinnvoll, da dies eine in vielen Regelwerken und Richtlinien angewandte Betrachtung ist, die die Projektion jener auf die Problemstellungen im Materialflusssystem ermöglicht (z.B. agiert die Entwicklungsmethodik in verschiedenen Ansätzen nach Stoff, Energie und Information). Die vorliegenden Betrachtungen beziehen sich vornehmlich auf die stoffliche Ebene.

Entsprechend der Systematik von Abschnitt 2.2.3.3 kann den Systemobjekten eine oder mehrere materialflusstechnische Entsprechung zugeordnet werden:

Die das System, Subsystem und Element verbindenden Relationen können unterschiedlicher Art (ist Teil von, gehört zu, ...) sein und verschiedenen Typen (Geometrie, Hersteller, ...) angehören. Sie sind gegenwärtig vor allem in den Planungs- und Konstruktionsdaten vorliegend aber auch im Projektmanagement zu finden. Eine nähere theoretische Betrachtung dazu erfolgt unter Abschnitt 6.14.

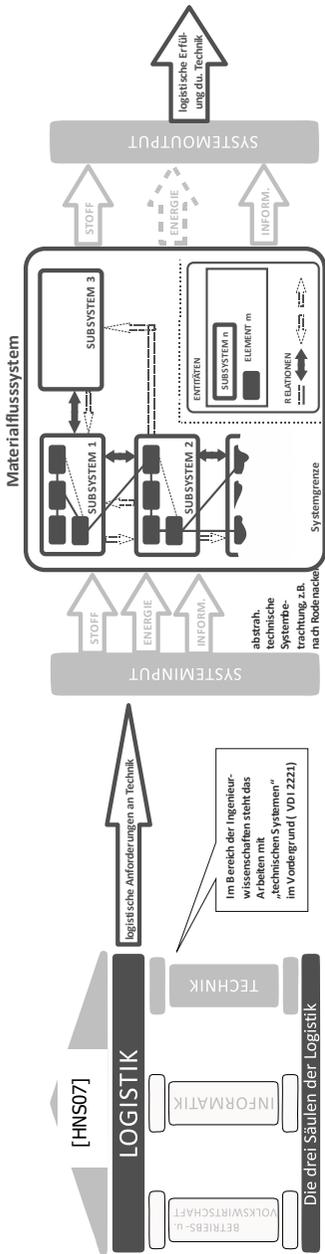


Bild 6.6: Systemtheoretische Abstraktion System eines Materialflusssystem

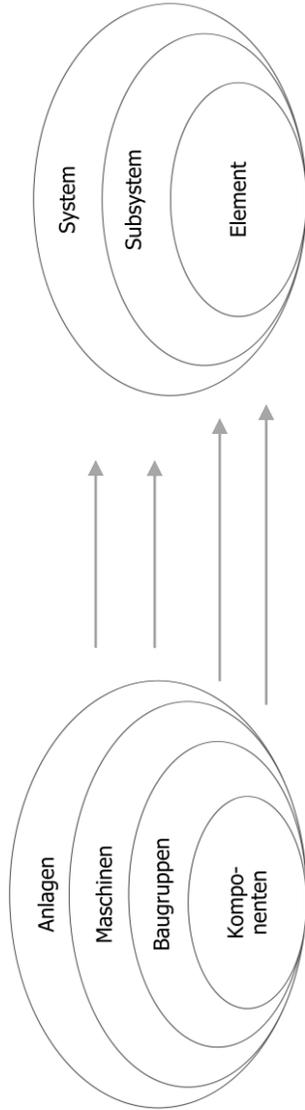


Bild 6.7: Mögliche Entsprechung Systematik Materialfluss und Systemtheorie

6.3.2 Materialflusstechnik

In der Materialflusstechnik werden nun deren Mittel auf „relativ kurzen Entfernungen“ [MRW08] zum Transport, Umschlag und Lagern eingesetzt. Man spricht von sogenannten TUL-Prozessen. Dazu gehört die technologische und ökonomische Prozessgestaltung mit den zur Realisierung notwendigen Maschinen und Ausrüstungen. Die Materialflusstechnik wird ergänzt durch Informations- und Organisationssysteme und ist nur in Kombination mit diesen wirksam.

Man kann die gliedernden Ausführungen von oben präzisieren, wenn man die Funktionen des Materialflusses¹ näher betrachtet. Diese sind adaptiert nach [HS08]:

- Bearbeiten
- Prüfen
- Handhaben:
speichern, Mengen verändern (sortieren, teilen, zusammenführen),
sichern, kontrollieren
- Fördern:
 - Aufnehmen/Abgeben
 - Tragen
 - Bewegen:
Verzweigen u. Zusammenführen
- Lagern
 - Identifizieren
 - Ein/Auslagern
- Aufenthalt

Weitere Funktionen sind noch:

- montieren
- umschlagen
- kommissionieren
- palettieren
- verpacken

Typische übergeordnete Umgebungen für die Funktionen und Prozesse sind oftmals intralogistisch. Die Intralogistik ist gemäß der Definition des VDMA und des Forum Intralogistik "die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen" [VDM12]. Sie beinhaltet nun die folgenden Prozesse von der Rampe bis zur Rampe in beispielsweise Distributionszentren, Produktions- oder Nachschublägern; die (Material)Flüsse zwischen den u.a. Bereichen, die nicht immer allesamt vorhanden sein müssen:

- Wareneingang
- Lagerung
- Sortierung
- Kommissionierung
- Verpackung
- Warenausgang
- Verladung
- Warenumschlag

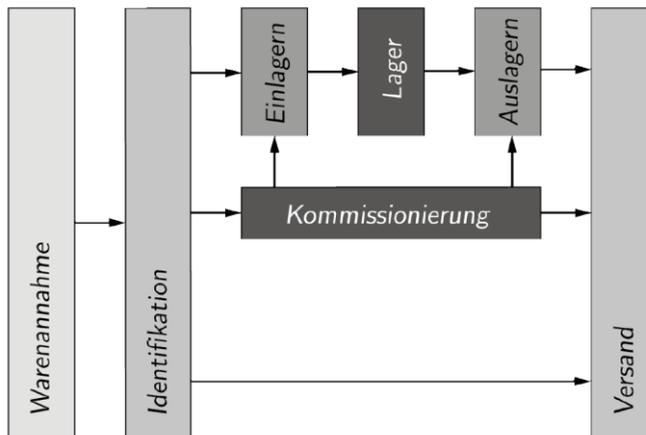


Bild 6.8: Beispiel eines Materialflusses in einem Distributionszentrum [SCH13] nach [FE08]

6.3.3 Systematik materialflusstechnischer Gewerke

Mit den Funktionen und v.a. Prozessen der Materialflusstechnik kann man eine überblickende Systematisierung dafür, wie in Bild 6.10, angeben. Hier kann wieder nach unterschiedlichen Merkmalen kategorisiert werden kann. Die Fördertechnik ist darin einmal nach baulicher Durchbildung und einmal nach Funktion angegeben. Auch diese Systematik ist als starre Grafik nicht eindeutig erstellbar, da Mehrfachzuordnungen möglich sind, wie beispielsweise bewegte Regale mit feststehenden Ladeeinheiten (Karusselllager) durchaus unter Regallagerung wie unter Lagerung auf Fördermittel einordenbar sind.

VDI 2411 [VDI 2411] war das maßgebende Werk zu Begriffen und Erläuterungen im Förderwesen und wurde aufgrund ihres Erscheinungsdatums zurückgezogen. Die dortige Auflistung entsprach nicht mehr der evolutionären Entwicklung der Technik und der Vielfalt der Geräte 40 Jahre nach deren Erscheinen. Eine Gliederung und Systematisierung wurde darin nicht vorgenommen und die Begriffe alphabetisch in lexikalischer Form angeführt.

DIN 15201 [DIN 15201] gliedert die Stetigförderer, als Teilmenge der Materialflusstechnik, nach Wirkprinzip.

VDI 3648 [VDI 3648] systematisiert Behälterförderanlagen nach ihrer Funktion:

- Angetriebene Elemente für waagrechte, steigende und fallende Streckenförderung
- Angetriebene Elemente für Senkrechttransport
- Nichtangetriebene Elemente
- Eingabeelemente
- Eckumführungen
- Weichen – Elemente zur Richtungsänderung wie auch Ausschleuser

Versucht man eine weitere Einteilung bzw. Systematisierung logistischer Gewerke stößt man auf unterschiedlichste Klassifizierungsarten, von denen die breiteste in [HNS07] zu finden ist. Dort wird vor allem die Stückgut-Intralogistik betrachtet und die Gewerke dazu nach Bestimmungskriterien wie Verwendungszweck, Anforderungseignung klassifiziert. Merkmale dazu sind:

- Förderart (stetig/unstetig)
- Aufstellungsart (flurgebunden/aufgeständert/flurfrei)
- Ortsbindung (ortsfest/geführt verfahrbar/frei verfahrbar)
- Antriebswirkprinzip (Abwälzung/Schwerkraft/Muskelkraft/Einzelantrieb/Zugmittel)

Dieses Mehr-Ebenen-Modell unterstützt vor allem bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Planung von Anlagen. Die statische, abgedruckte Struktur könnte durch Verwendung von Datenbankalgorithmen im Rahmen des Wissensmanagements weitere Kriterien und mehrdimensionale Auswahlmöglichkeiten einschließen und eignet sich z.B. zur Implementation in eine Ontologie (s. Abschnitt 6.12.2.1). Diese Systematisierung der Fördertechnik nach [HNS07] ist gut etabliert und verbreitet (Bild 2.16 bzw Bild 6.9), und wird dementsprechend hier für eine Feingliederung der Materialflusstechnik (Bild 6.10) übernommen (in Bild 2.18, Bild 6.13):

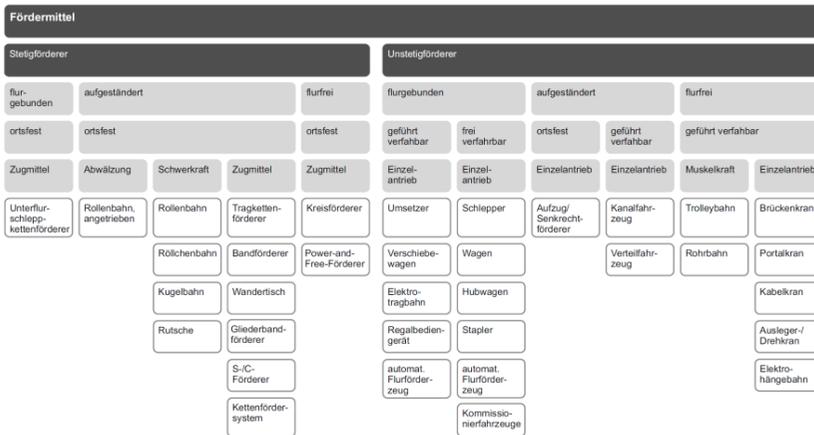


Bild 6.9: Systematik der Fördermittel für die Stückguttechnik [HNS07]

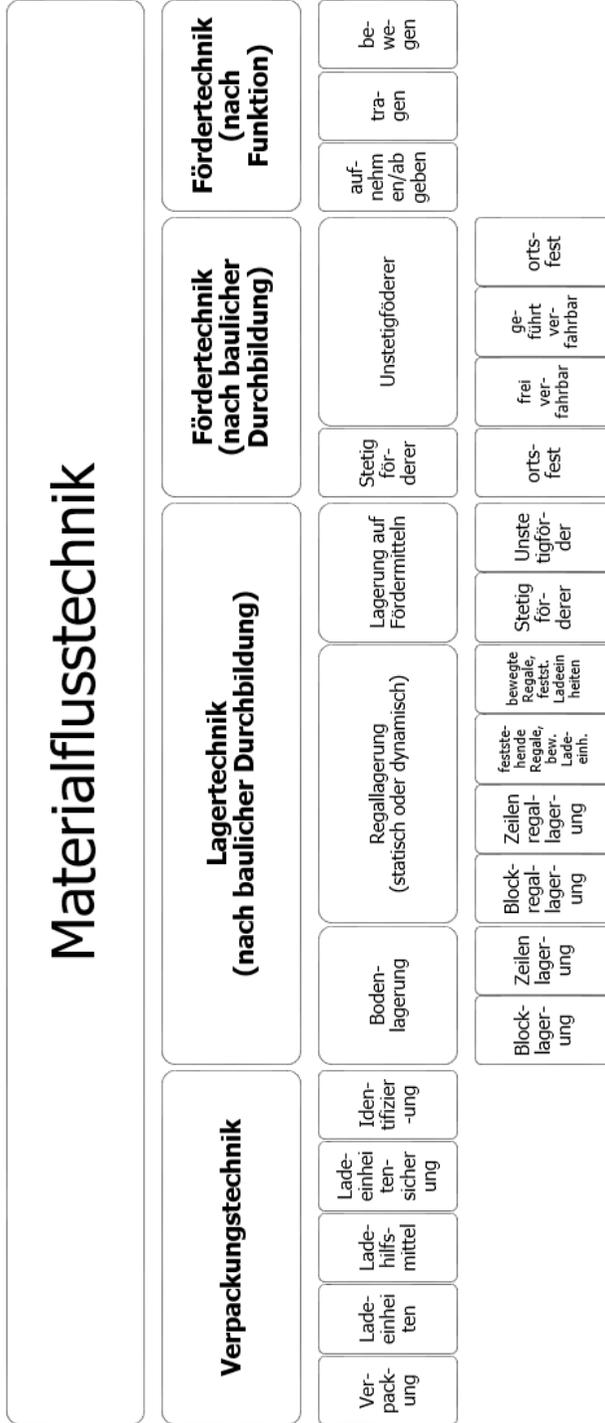


Bild 6.10: Systematik der Materialflusstechnik

Vergleicht man die obigen Ausführungen mit der Struktur des Kapitels „Fördertechnik“ in Dubbel [DUB01], findet sich dort eine bauformorientiertere Gliederung nach Teilbaugruppengröße wieder, die aber nicht explizit angegeben ist, sondern als Gliederung des Gesamtkapitels erscheint. Andere Gliederungen gehen auch von den Leistungsmerkmalen aus. Weitere Gliederungen der Literatur betreffen die folgenden Punkte, sind aber für die Ein- und Zuordnung der vorzustellenden Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden nicht verwendbar. Darin kann man eine Systematisierung nach Fördermittel nach Verwendung, als Bestandteil dynamischer Lager, zum Ein- und Auslagern, in der Lagervorzone befindlich oder mit Lagerfunktion finden.

Für den Fokus der Entwicklung und Konstruktion logistischer Werke wird hier ein 4-Ebenen-Modell vorgestellt, das eine Zuordnung der vorgestellten Methoden ermöglicht. Die Gliederung der Werke aus Stückgut- und Schüttgutfördertechnik orientiert sich dabei vor allem an der physischen Größe und dementsprechend an der Komplexität der Objekte. Es wird gegliedert in:

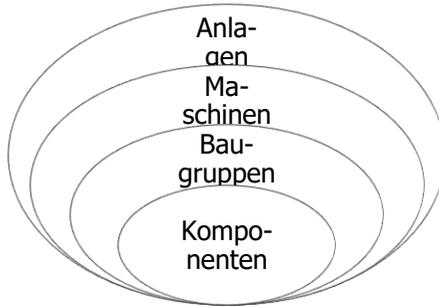


Bild 6.11: Größendimensionen von Materialflusstechnik (Komplexität) als 4-Ebenen-Modell mit Objekten der Materialflusstechnik

Bild 2.17 bzw. Bild 6.11 stellt dabei die vertikalen Komponenten des vorzustellenden Methodeneinordnungsmodells für die Materialflusstechnik vor. Wenn man die Ebenen weiter aufgliedert, kommt man zur Darstellung nach

Bild 2.18. Die unterstrichenen Begriffe sind nochmals unterteilt und beinhalten die grau angegebenen Werke. Kursiv rechtsbündig angeordnete Objekte sind hauptsächlich Werke der Materialflusstechnik für Schüttgut. Die Systematik ist insofern als vollständig anzusehen, als sie alle mit den Methoden bearbeitbaren Objekte beinhaltet, im weiteren wird – auch der Übersichtlichkeit wegen – die reduzierte Variante nach Bild 6.13 verwendet.

Anlagen	Kommissionieranlage
	Sortieranlage
	dynamische Regallageranlage
	autonomes (fahrerloses) Transportsystem (FTS)
	Seilbahnanlage
	Schachtförderanlagen
Maschinen	<u>Flurförderzeuge</u>
	Schlepper
	Gabelstapler
	Wagen
	FTF
	Schienerförderzeuge
	Elektrohängebahnen
	Regalbediengeräte
	Serienhebezeug
	Krane
	Aufzüge und Fahrtreppen/steige
	<u>mit Zugmittel</u>
	Bandförderer (mit horizontalen und vertikalen Kurven und ggf. profilierten Gurten)
	Kreisförder
Sorter-Verteilerförderer	
Power-and-Free-Förderer	
Schleppkettenförderer	
Gliederbandförderer	
Wandertische	
Tragkettenförderer	
	<i>Becherweke (mit Kette und Bechern oder geformten Gurten)</i>
	<i>Kratzerförderer</i>
	<i>Trogkettenförderer</i>
	<u>ohne Zugmittel</u>
	Rollen- und Kugelbahnen (angetrieben und ohne Antrieb mit Schwerkraftförderung)
	Röllchenbahnen
	Plattenbandförderer
	Schubplattformförderer
	Schuppenförderer
	Umlauf-S-Förderer
	Rutschen und Fallrohre
	<i>Schneckenförderer</i>
	<i>Schwingförderer</i>
	<i>Strömungsförderer</i>
	<i>Hydraulische Förderer</i>
Baugruppen	Triebwerke
	Fahrwerke
	Hubwerke
	Zu- und Abförderkomponenten der Stückgut-Stetigförderer (Ausschleuser, Übersetzer,...)
	Tragwerke (auch statische Lager)
Komponenten	Ketten, Kettentriebe u. formschlüssige Riemengetriebe
	Seile, Seiltriebe u. kraftschlüssige Riemengetriebe
	Mechanische Elemente der Antriebe (Bremsen, Kupplungen, Gesperre, Laufräder)
	Lastaufnahmemittel für Schütt- und Stückgüter
	Ladehilfsmittel für Schütt- und Stückgüter

Bild 6.12: Systematik materialflusstechnischer Gewerke (Förderer der Schüttguttechnik kursiv und rechtsbündig), Objekte nach [HNS07]

Anlagen	Kommissionieranlage
	Sortieranlage
	dynamische Regallageranlage
	autonomes (fahrerloses) Transportsystem (FTS)
	Seilbahnanlage
	Schachtförderanlagen
Maschinen	Flurförderzeuge
	Elektrohängebahnen
	Regalbediengeräte
	Serienhebezeug
	Krane
	Aufzüge und Fahrtreppen/steige
	mit Zugmittel
ohne Zugmittel	
Baugruppen	Triebwerke
	Fahrwerke
	Hubwerke
	Zu- und Abförderkomponenten der Stückgut-Stetigförderer (Ausschleuser, Übersetzer,...)
	Tragwerke (auch statische Lager)
Komponenten	Ketten, Kettentriebe u. formschlüssige Riemengetriebe
	Seile, Seiltriebe u. kraftschlüssige Riemengetriebe
	Mechanische Elemente der Antriebe (Bremsen, Kupplungen, Gesperre, Laufräder)
	Lastaufnahmemittel für Schütt- und Stückgüter
	Ladehilfsmittel für Schütt- und Stückgüter

Bild 6.13: Systematik materialflusstechnischer Gewerke für
Methodenzuordnung – reduziert nach Bild 2.18 bzw. Bild 6.12

Gegenüber der hierarchischen Strukturierung von Wissen hat die Darstellung mit MindMaps einige Vorteile, v.a. im kreativen Erstellungsprozess (s. Kap. 6.12). Wenn mit dem Ziel wissensunterstützter Konstruktionen Konstruktionswissen gesammelt und aufbereitet werden muss, stellt eben die MindMap ein probates Mittel dar. Bild 2.19 bzw. Bild 6.14 zeigt am Beispiel des angetriebenen Rollenförderers/Rollenbahn ohne Staufunktion (und ohne der Konstruktionsvariante „Motorrollenantrieb mit Übertrieb“) Ausprägungen technischer Merkmale dieses Förderers. Die bisher in dieser Form (im Rahmen dieser Arbeit) erarbeiteten technischen Beschreibungen logistischer Anlagen stellen eine Basis zur wissensbasierten Konstruktion dar und können zur Funktionensynthese im methodischen Konstruieren herangezogen werden bzw. soweit formalisiert werden, dass sie konfigurier- und konfektionierbar zu Maschinenkonzepten zusammengestellt werden können.

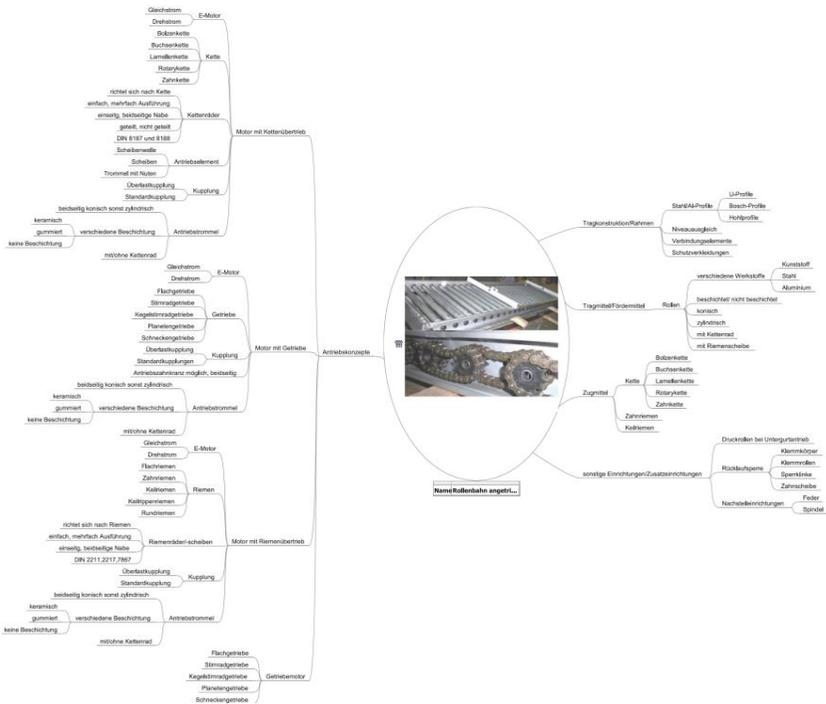


Bild 6.14: Technikorientierte Systematik für Rollenförderer (keine Motorrollenantriebe, keine Staufunktion)

Zur Zeit ist Wissen in dieser Form für die folgenden Gerätschaften aufbereitet, die Detailtiefe dazu entspricht jener von Bild 2.19 bzw Bild 6.14:

- Anlagen:
 - Sorter: Kammsorter, Kippschalensorter, Quergurtsorter, Schuhsorter
- Maschinen:
 - Stetig: Drahtgurtförderer, Drehtisch, Elektrohängebahn, S-/C-Förderer, Gurt- und Kurvgurtförderer, Power-and-Free-Förderer, Kugelbahn, Gliederbandförderer, Plattenbandförderer, Rollenbahn, Rollenförderer, Röllchenbahn, Staurollenförderer, Schleppkettenförderer, Tragkettenförderer
 - Unstetig: autonome Fahrzeuge (AGV/FTS), Serienhebezeuge
- Baugruppen: Hubtisch, Schwenktisch, Pusher- und Abweisersysteme, Gurt- und Kettentransfer
- Komponenten: Rutschen und Fallrohre

6.3.4 Einige Ingenieursaufgaben in der Materialflusstechnik [LAN09]

Die Breite des Fachgebietes Materialflusstechnik umfasst Berechnungen und Anwendungen unterschiedlichster Art und wird in vielen Konstruktions- und Berechnungsabteilungen oft einigen wenigen Mitarbeitern aufgebürdet. Die Durchdringung mit modernen Werkzeugen ist weitaus geringer als in den als innovativ identifizierten Branchen automotive und aerospace. Die Produktentwicklung ist stark versuchsgetrieben, wobei stets real-physische Abbilder der künftigen Produkte (Prototypen) erstellt werden. Die Anpassungskonstruktion ist auch bei neuen Produkten verbreitet, demgegenüber stehen aber auch viele innovative neue Konzepte – wie beispielsweise die autonomen Shuttles [DEM12] – die gänzliche Neukonstruktionen darstellen. Aber auch hier ist zumindest im Bereich der technischen Realisierung Softwareeinsatz in der Produktentwicklung maximal im Konstruktionsbereich (CAD) und Regelungsbereich zu sehen.

Es lässt sich durchaus eine weitere Klassifizierung weg von den Betrachtungen oben hin zu einer Systembetrachtung erkennen (vgl. Kap. 2.2.3.3), wo einzelne Materialflussanlagen zusammenspielen. Es erwachsen dem Entwicklungsingenieur der Materialflusstechnik einige der folgenden Aufgaben; eine allgemeinere Darstellung der Aufgaben in Entwicklung und Konstruktion gibt [EM13] mit einem kurzen Einblick in Kap. 6.11:

- **System-, Anlagen- und Maschinenebene**
 - **Anlagenlayouting mit Materialflussberechnungen**
(Ablaufplanung und Entwicklung von Anlagenschemata von komplexen ineinandergreifenden Teilsystemen, z.B. Hafenverladeanlage mit Materialflussdimensionierung und Schnittstellendefinition zu umgebenden Systemen oder Warenverteilzentrum,...)
 - **Automatisierung und Systemintegration**
(Bereitstellung und Erarbeitung von Gerätespezifikationen für die übergeordnete Steuerung durch Leistungs- und Schnittstellendefinitionen von Geräten für die Einbindung in übergeordnete Steuerungsprogramme, z.B. Spezifizierung von Maximalleistungen, Motorsteuerungsparametern sowie Betriebs- und Überwachungssensoren eines Hubwerks oder Anbindung des Materialflusssteuerungssystems an das Lagerverwaltungssystem,...)
 - **Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**
 - **Technische Bewertungen (Energieeffizienz, Verfügbarkeit)**
- **Komponenten- und Baugruppenebene**
 - **Entwicklung und Konstruktion**
(konstruktive Gestaltung von Antrieben, Mechanismen und mechanischen Strukturen, z.B. Brückenkran mit Hub- u. Fahrwerksantrieben daran ein Stangengreifer sowie Konstruktion der Kranbrücke, Dimensionierung eines Regalbediengeräts, (Neu)Entwicklung autonomer Fahrzeuge,...)

- **Berechnung**
(engverzahnt mit Entwicklung und Konstruktion, s.o.)
 - Struktur- und Lebensdauerberechnungen
(Festigkeitsberechnung mit FEM und Schadensakkumulation, Modalanalyse, z.B. Leichtbau eines Regalbediengerätastes)
 - Dynamikberechnungen
(Dynamik- und Schwingungsberechnung mit MKS und abstrahierenden Systemen AS, z.B. Analyse von Lastschwingungen an Kranen)
- **Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Aus der erwähnten schmalen Struktur der Engineeringabteilungen in vielen Betrieben ist in Kombination mit obiger Liste die Breite der Anforderungen an einen „Materialflusstechniker“ ersichtlich. Dabei kann Tiefenverständnis der Methoden nicht mehr Voraussetzung sein und ist in einer angewandten Wissenschaftsdisziplin ja auch nicht erwartbar. Dies ist auch mit ein Grund, warum hier vorwiegend, wenn überhaupt (s.o.), kommerzielle Simulationstools im Einsatz sind. Genau von dieser Diskrepanz zwischen notwendigem theoretischem Wissen zur Eigenentwicklung und Problem-Anwendungsfall lebt die Software-Simulations-Industrie, indem sie versucht, ihre Produkte auf verschiedene Einsatzgebiete maßzuschneidern (Templates und Aufsatzmodule in MKS für Schienenfahrzeuge, Automobile, ...), worin abermals den Wünschen der Automobilbranche aufgrund des stärksten Umsatzes am meisten Rechnung getragen wird. Darin kann die Fördertechnik nur eine kleine Rolle spielen, da einerseits die Umsätze von geringerer Größenordnung sind und andererseits die Berechnung noch immer auf empirisch abgeleiteten Schemata beruht (Richtlinien und Normen) und die Entwicklung realversuchsgetrieben ist. Diese Vorgehensweise ist wegen ihrer eingeschränkten Gültigkeit und ihres empirischen Hintergrunds nicht immer für innovative Produkte geeignet, wird aber wegen ihrer verbreiteten Akzeptanz noch immer zur Auslegung sowie zum Funktionsnachweis herangezogen. Die Struktur der Publikationen im Fachgebiet macht diese Beobachtung offensichtlich, worin sich die Anzahl der qualitativen Veröffentlichungen die Simulation einsetzen im niedrigen Prozentbereich bewegt. Aber genau in das Nebeneinander von herkömmlichem aber praktischen Auslegungsschemata und aufkeimendem Simulationseinsatz hinein gilt es den Fuß der Simulation in die Tür der Normen und Richtlinien zu setzen, um die Gültigkeit der, keineswegs immer ungenauen und unzureichenden, Auslegungsschemen zu erweitern, abzusichern bzw. Neues abzuleiten (vgl. dazu Kap. 6.5 aber v.a. MeB1 ff. in Kap. 3.5.1). Dann kann der Versuchs- und Prototypenaufwand geringgehalten werden, wenn aus validierten Simulationsergebnissen weitere gültige und nur gering geänderte Modelle abgeleitet werden, aus deren Ergebnissen dann bisher nicht verfügbare Auslegungsschemata direkt abgeleitet werden.

6.3.5 Der Weg zur Technischen Logistik als wissenschaftliches Teilgebiet der Logistik

Die Logistik im Allgemeinen und die Technische Logistik als Teildisziplin sind sehr junge und noch nicht vollends etablierte Wissenschaften des Ingenieurfaches. Das Anliegen der in diesen Fächern tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist neben der fachbegründeten Suche nach Lösungen von Problemen auch eines der Festigung und Anerkennung der Wissenschaftlichkeit des Faches. In einem Positionspapier der BVL haben sich die führenden Forscher des Fachgebietes zu einem Statement zusammengeschlossen, das dem Fach das nötige Gehör und die entsprechende fachliche Zu- und Einordnung verschaffen soll. Darin heißt es [GW11]:

„Die Logistik als anwendungsorientierte Wissenschaft bezieht ihre Problemstellungen aus der Wirtschaftspraxis und trägt proaktiv zur deren Weiterentwicklung bei.“

„Das spezifische Erkenntnisinteresse der Logistik zielt auf die Überwindung der Grenzen etablierter anwendungsorientierter Wissenschaftsdisziplinen und die Generierung spezifisch logistischer Erkenntnisfortschritte durch die synergetische Verbindung der Wissensbestände dieser Disziplinen.“

Als anwendungsorientierte Wissenschaft nimmt die Logistik Methoden aus anderen Disziplinen (z.B. Mathematik, Ingenieurwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften, Sozialwissenschaften) auf, entwickelt sie aber auch weiter. Zwar baut jede wissenschaftliche Disziplin auf anderen Wissenschaften auf und ist insofern interdisziplinär. Für die Logistik gilt dies aber angesichts ihres Objektbereiches und ihres multiperspektivischen Ansatzes in besonderer Weise. So verfolgt die Logistik das erklärte Ziel, Wirtschaftssysteme als Netzwerke zu modellieren, ihre Verknüpfungen zu analysieren und dadurch Hinweise für ihre optimale Gestaltung und Implementierung zu gewinnen.

An dieser Stelle wird besonders deutlich, warum das spezifische Erkenntnisinteresse der Logistik eine über etablierte Wissenschaftsdisziplinen hinausgehende Perspektive erforderlich macht und diese insofern transzendiert. Logistik baut als wissenschaftliche Disziplin nicht nur auf Grundlagenwissenschaften auf, wie andere anwendungsorientierte Disziplinen auch, sondern Logistik verbindet darüber hinaus auch anwendungsorientierte Wissenschaften wie z.B. Betriebs- und Volkswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften, (Wirtschafts-) Informatik Wirtschaftsgeographie oder Jura, um auf diese Weise neue, spezifisch logistische Erkenntnisse zu generieren. Insofern ist die Logistik als wissenschaftliche Disziplin auch kein (echtes) Teilgebiet nur einer dieser Wissenschaften, sondern sie zielt gerade auf die Verbindung der Wissensbestände verschiedener Disziplinen und damit auf die Überwindung etablierter Disziplinengrenzen ab. Insofern besitzt die Interdisziplinarität für die Logistik eine zentrale und über die für jede anwendungsorientierte Wissenschaft hinausgehende Bedeutung. Sie ist zentrales Element des logistischen Paradigmas.

Selbstverständlich schließt diese Interdisziplinarität nicht aus, dass einzelne logistische Analysen oder Forschungsfelder sich auf spezifische Fragestellungen innerhalb der einzelnen etablierten Wissenschaftsdisziplinen konzentrieren und insofern nur begrenzt interdisziplinär sind. Dies ergibt sich ganz einfach aus wissenschaftsökonomischen Gründen. Hieraus folgt unmittelbar, dass es in den etablierten anwendungsorientierten Wissenschaftsdisziplinen spezialisierte Logistik-orientierte Fachgebiete gibt, z.B. die betriebswirtschaftliche Logistik oder die ingenieurwissenschaftliche Logistik.“

Die Technische Logistik ist hiermit eine solche anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin, die z.B. in der normativen Sachgebietsgliederung ÖSTAT noch nicht vorhanden ist [ÖST14]. Darin gibt es lediglich das Fach „Fördertechnik 2206“, das aber nach den Definitionen von oben nur einen Teilbereich der Technischen Logistik darstellt. Die Methoden und Werkzeuge des Fachgebiets sind jene der Ingenieurwissenschaften, die Erkenntnisobjekte jene der Logistik.

6.4 Modell und Modellbildung

Die Ausführungen der Abschnitte 6.4 und 6.5 sind stets im Kontext der Entwicklung und Konstruktion in der Technischen Logistik aus der Gruppe technisches Simulationsmodell. – Einen guten Überblick zur Thematik am Sektor v.a. der Materialflusssimulationsmodelle gibt Furmans in [HKS04]

Zur Beschreibung und Analyse von technischen, aber auch sozialen, ökonomischen, ... Systemen werden von lange her Modelle unterschiedlichster Art eingesetzt, je nach gefordertem Systemverständnis (Anforderungen). Das Erstellen eines Modells mit definierten Anforderungen wird im Wesentlichen als Modellbildung bezeichnet. Ziel jedes Modells ist es ganz abstrakt nach [VWB+09] formuliert, dass für einen Beobachter B das Objekt M ein Modell des Objektes A ist, wobei er M benutzen kann um Fragen zu beantworten, die ihn an A interessieren. Diese Definition lässt sich für den technischen Bereich konkretisieren und man kann nach vier für die Entwicklung im Maschinenbau relevanten Regelwerken die Begriffe Modell und Modellbildung mit Tabelle 21 wie folgt gegenüberstellen:

Tabelle 21: Modell und Modellbildung nach unterschiedlichen Definitionen [VWB+09]

Quelle	Modell	Modellbildung
nach VDI 2206 (Entwicklungsme- thodik für mechatronische Systeme) [VDI 2206]:	physikalisch- mathematisches Abbild eines technischen Bauelements, einer Baugruppe oder eines komplexen Systems.	Darstellung eines physikalisch- mathematischen Modells eines vorhandenen Systems oder eines zu entwickelnden Systems.
nach VDI 2211 (Datenverarbeitung in der Konstruktion...) [VDI 2211]:	Modelle sind materielle oder immaterielle Gebilde, die geschaffen werden, um für einen bestimmten Zweck ein Original zu repräsentieren. Man kann Modelle auch als Abbildungen oder Nachbildungen von Originalen sehen.	Modellbildungen erfolgen mit der Absicht, das Original durch das Modell zu ersetzen, es als Stellvertreter des Originals zu benutzen. Auch ein Modell kann als Original für eine weitere Modellbildung dienen (z.B. bei Modelltransformationen).
nach VDI 2209 (3D-Produk- tmodellierung) [VDI 2209]:	Abbild eines Originals, wobei das Modell nicht alle Eigenschaften des Originals aufweist (würde es alle Eigenschaften aufweisen, wäre es ein Klon). Man unterscheidet gestalthafte, bildhafte und formale Modelle. Gestalthafte Modelle sind verkleinerte oder vergrößerte Abbildungen,	Festlegen der Gestalt eines Bauteils mit Hilfe der im CAD-System vorhandenen Modellierungselemente und der möglichen Beschreibungsverfahren.

	wobei nur bestimmte Eigenschaften des Vorbilds ausgeprägt sind (z.B. das Tonmodell für ein neues Fahrzeug, das im Windkanal optimiert wird). Bildhafte Modelle sind graphische Darstellungen des Originals (z.B. technische Zeichnungen). Formale Modelle sind Datenmengen zum digitalen Erfassen.
nach VDI 3633/1 (Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen...) [VDI 3633]	Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmen vom Vorbild.

VDI 2209 [VDI 2209] präzisiert im Kontext des Geometriemodells den Terminus Modell nach bildhaften, gestalthaften und formalen Modellen. Die aus dem Kontext der Logistik stammende VDI 3633ff. [VDI 3633] bezieht sich auf den physischen Materialfluss durch logistische Anlagen.

Modelle lassen sich unterscheiden nach Anwendungszweck und Modellierungsebene je Phase der Produktentwicklung (u.a. nach [VWB+09] und [VDI 2249]). Vor allem Berechnungsmodelle sind auch unterschiedlichen physikalischen Domänen (Dynamik, Elektrik, Thermik, Hydraulik, ...) zuzuordnen, eine Unterscheidung nach Beschreibungs- und Erklärungsmodellen [HKS04] wird hier im Kontext Simulation von Berechnungsmodellen weiter ausgeführt:

- Nach Anwendungszweck:
 - Produktmodell
 - Prozessmodell
 - Berechnungsmodell: Auslegung, Optimierung, Nachrechnung
 - Simulationsmodell für virtuelle Experimente (unscharf zu 6.5, s. ebenda)
 - Prognosemodell
- Nach Modellierungsebene:
 - Anforderungsmodell
 - Funktionsmodell
 - Prinzipmodell
 - Gestaltmodell

Im Bereich der Technischen Logistik haben sich besonders Simulationsmodelle zur Analyse des Materialflusses durch logistische Anlagen durchgesetzt. In ausgewählten Bereichen v.a. der Neuentwicklung von Geräten, Komponenten und Anlagen werden auch Berechnungsmodelle eingesetzt. Man kann somit differenzieren nach Modellen, die die oben angegebenen Eigenschaften und Ziele aufweisen, nach Modellen zur:

- Beschreibung der Erfüllung der logistischen Anforderungen (s. die sieben „r“, Kap. 6.2) in der Materialflussplanung und –steuerung
→ (operatives) Materialflusssimulationsmodell:
Anforderungsmodell zur Simulation des Materialflusses.
- Beschreibung des mechanisch-physikalischen Verhaltens von Gewerken des Materialflusses
→ technisches Simulationsmodell:
Funktions- Prinzip- u. Gestaltmodell zur Visualisierung, Berechnung und Simulation.

Wenn Modelle gebildet und analysiert werden, ist es notwendig, die Gültigkeit und Genauigkeit der Modellierung zu betrachten. Roddeck [ROD06] bringt dies auf den Punkt, wenn er schreibt: „Eine sehr „genaue“ Modellierung ist in vielen Fällen nicht nötig, weil die Unsicherheiten in einem detaillierten Modell so groß sein können, dass dessen Nutzen im Vergleich zu einem einfacheren Modell in Frage zu stellen ist“.

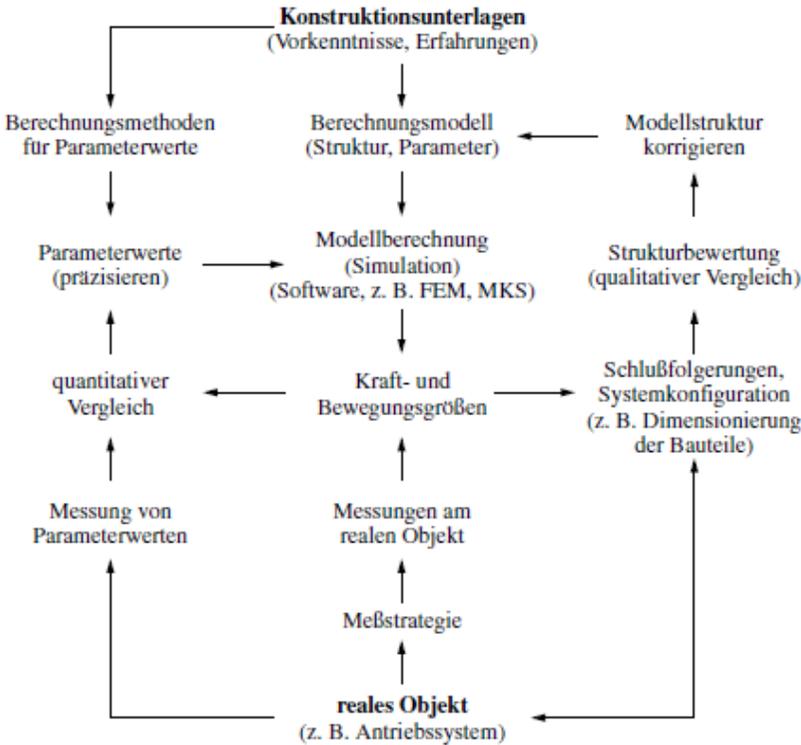


Bild 6.15: Prinzipielle Wechselwirkungen und Aspekte bei der Modellbildung [D05] an Berechnungs- und Simulationsmodellen

Dies führt zur Betrachtung des Prozesses der Erstellung eines Modelles, der Modellbildung. Während in Tabelle 21 nur grob umrissen ist, was unter Modellbildung zu verstehen ist, kann man drei Hauptphasen der Modellbildung identifizieren, die iterativ zu durchlaufen sind. Sie gelten adäquat für verschiedene Arten der Modellbildung sowohl für Materialflusssimulationsmodelle als auch für technische Simulationsmodelle:

- Modellplanung
- Modellentwurf
- Modellkontrolle

Dresig [D05] gibt mit Bild 6.15 einen guten Überblick zur Modellbildung von Berechnungs- und Simulationsmodellen.

Bezüglich der Detailtiefe – und damit der abbildbaren Genauigkeit und der Anzahl wirkender und zu beschreibender Phänomene – sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen der Modellbildung bekannt [D05], die induktive und die deduktive Modellbildung. Das schrittweise Erweitern oder Reduzieren des Modells hierbei schließt die Simulation, Verifikation und Validierung mit ein.

Bei der **induktiven Modellbildung**, die die Hauptvorgehensweise für Berechnungsmodelle darstellt, wird von einem speziellen Modellfall ausgegangen um zu einem verallgemeinerten Modell zu gelangen. Entsprechend dem aristotelischen Prinzip nach Bild 6.16 gelangt man von Beobachtungen schrittweise zu erklärenden Prinzipien. Es wird mit einer Hypothese über die vermuteten begründenden physikalischen Effekte begonnen und das Modell ist nicht als endgültig anzusehen. Schrittweise können Hypothesen weiterer Effekte modellbildnerisch dazu genommen werden, wobei jedes Mal der Prozess nach Bild 6.15 durchlaufen wird. Das so erweiterte Minimalmodell wird schlussendlich zum Maximalmodell. Im Gegensatz dazu versucht man bei der deduktiven Modellbildung alle möglichen physikalischen Effekte vorerst zu berücksichtigen und formuliert allgemeine Modelle, die auf erklärenden Prinzipien beruhen, zuerst.

Durch Auswerten der Empfindlichkeiten und Parametereinflüsse des Modells bekommt man Einblick in das Verhalten des Modells, und es können Effekte unterschiedlich berücksichtigt werden. Sehr oft wird die Herangehensweise aus induktiver und deduktiver Modellbildung in der Praxis kombiniert, vor allem, wenn schon ein großer Fundus an gültigen Teilmodellen vorliegt. Prinzipiell kann sowohl induktiv als auch deduktiv, also einem Herangehen von zwei Seiten, das gleiche Modell gefunden werden.

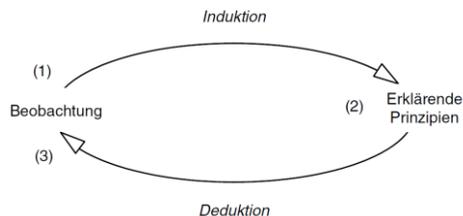


Bild 6.16: Aristotelische induktiv-deduktive Methode [LOS06]

Das Verfahren im Modellbildungsprozess ist meistens rechnerisch, aber auch durch Experimente kann man zum passenden Modell kommen, wobei in der Praxis auch hier eine hybride Vorgehensweise zu beobachten ist. Die Gültigkeit des Modelles ist stets durch Validierung und Verifikation zu bestätigen. Unter Verifikation versteht man das Erfüllen der spezifizierten Anforderung und die korrekte Implementation jener in das Modell. Die Validierung vergleicht die Modellergebnisse mit Mess- und Beobachtungsergebnissen oder auch analytisch gültigen Erkenntnissen und bestätigt somit die Modellgültigkeit.

In Überleitung zur Betrachtung der Simulation fasst Bild 6.17 die hier dargelegten Prozesse zusammen, das Durchlaufen kann hier auch je neu im induktiven oder deduktiven Fortschreiten der Modellbildung gesehen werden.

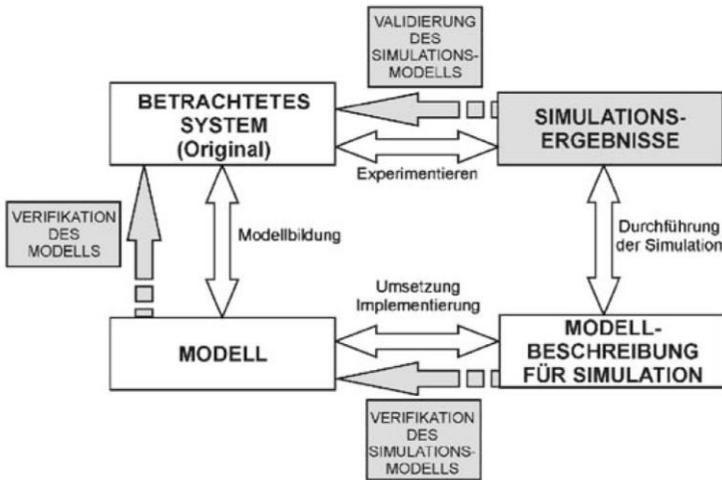


Bild 6.17: Zusammenhang Modell, Modellbildung, Simulation, Verifikation und Validierung [DAS06]

Einen Überblick über die wichtigsten Simulationsmodelle und –grundlagen für den Einsatz von Modellbildung und Simulation in der Technischen Logistik bietet Kapitel 6.7 und 6.8.

6.5 Simulation und Simulationsmodell

Simulation ist eine Möglichkeit zur Analyse von Systemen zum Verständnis derer Wirkungsweise, deren Ein- und Ausgangsverhaltens und zum Experimentieren an einem Modell; Grundlage jeder Simulation ist ein Modell, das Simulationsmodell das mathematisch alle Modellzusammenhänge abbildet. Nach VDI 3633 [VDI 3633] ist „Simulation ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden. Mit Hilfe der Simulation kann das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden (Simulationsmethode).“ Simulation kommt nach VDI 2209 [E6 aus E15]] zum Einsatz, wenn:

- kein reales System verfügbar ist (z.B. in der Entwurfsphase)
- das Experiment am realen System zu lange dauert
- das Experiment am realen System zu teuer ist (z.B. Crashtest)
- das Experiment am realen System zu gefährlich ist (z.B. bei Flugzeugen, Kraftwerken)
- die Zeitkonstanten des realen Systems zu groß sind (z.B. Klimamodelle).

Neben dem (Simulations)Modell braucht es zur Simulation ein (Simulations)Werkzeug, das wie folgt gestaltet sein kann (in Anlehnung an [DAS06]):

- direkte Programmierung des Modells in einer Programmiersprache
- Verwendung von Programmbibliotheken
- Verwendung von speziellen Simulationssprachen (z.B. Modelica [MOD14a])
- Verwendung von blockorientierten Simulatoren (signalfussorientiert)
- Verwendung von objektorientierten Simulatoren (bibliotheksbasiert, z.B. SimX [SIM14])
- Verwendung von Simulationsprogrammen für bestimmte Systemklassen, wie z.B. FEM-, MKS-, CFD-Systeme, ...

Die simulatorische Analyse von Modellen der Technischen Logistik (Materialflusssimulationsmodell, technisches Simulationsmodell) ist vor allem dem Bereich objektorientierte Simulatoren zuzurechnen, die durch Verwendung von speziellen Programmiersprachen erweitert werden können. Die technischen Simulationsmodelle werden auch von den Simulatoren bestimmter Systemklassen analysiert, je nach physikalischer Domäne.

Der Aufbau vieler Simulationswerkzeuge ist bereichsweise ähnlich und Bild 6.18 zu entnehmen.

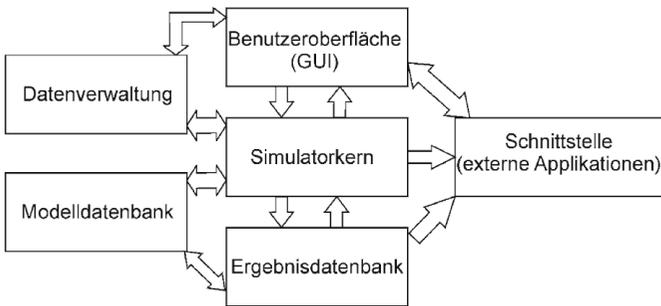


Bild 6.18: Aufbau eines Simulationssystems nach [DAS06] und darin in Anlehnung an [ROD06]

Auch die Arbeitsweise mit dem Simulationssystem ist werkzeugübergreifend ähnlich und weist die folgenden drei Hauptschritte auf, mit Bezug auf die Materialflusssimulation existiert ein detaillierteres Modell in [VDI 3633]:

- **Pre-Processing:**
das Erstellen des Simulationsmodelles mit Objekten, Randbedingungen, „Lasten“ und Analysezielen unter (impliziter) Aufstellung der beschreibenden Zusammenhänge des Modells meist in Gleichungsform.
- **Berechnung:**
die Lösung der dem Modell zugrundeliegenden beschreibenden Zusammenhänge (meist durch numerische Berechnung der in Gleichungsform vorliegenden Modellbeschreibung)
- **Post-Processing:**
die Darstellung und Verwaltung der Ergebnisse der Berechnung in graphischer-, tabellarischer- oder Animationsform mit Export- und Vergleichsfunktionen zur Bewertung der Erreichung der Analyseziele.

Dieser Dreischritt - in Bild 6.19 als „Simulation“ gekennzeichnet - ist wiederum eingebettet in einen größeren Prozess nach Bild 6.19, der die deduktive oder induktive Modellbildung mitberücksichtigt und iterativ so lange durchlaufen wird, bis die durch simulatorische Lösung des Modells erreichten Erkenntnisse mit jenen zur Validierung bereitliegenden (aus Vergleichsrechnungen, Messungen, praktischen Erfahrungen) übereinstimmen. Dann kann das Simulationsmodell als Experimentierfeld verwendet werden, um im Rahmen seiner Gültigkeit eine Analyseplattform für die Sensitivitäten des Modells virtuell darzustellen, s. dazu auch Kap. 6.9.2.

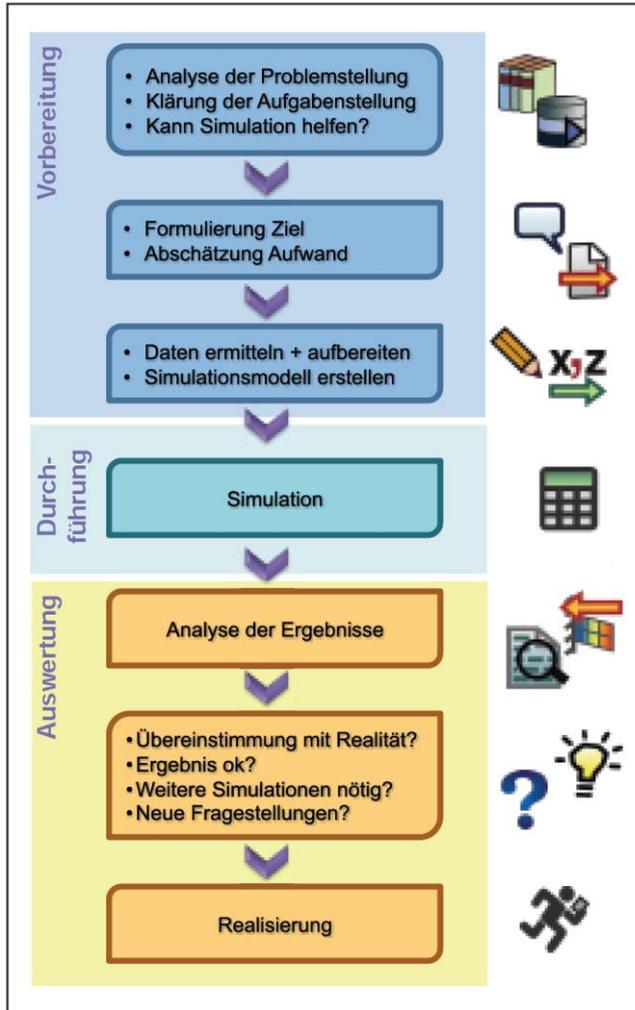


Bild 6.19: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI 3633 [VDI 3633] aus [RS12]

6.5.1 Technische Simulationsmodelle in der Fördertechnik und Technischen Logistik

Richtlinien zum Thema Simulation existieren im Fachbereich Technische Logistik nur auf dem Materialflussssektor (VDI 3633 [VDI 3633]), womit schon erkennbar ist, dass die Simulation von technischen Simulationsmodellen hier offenbar nicht den gleichen Stellenwert innehat. Eine Systematisierung von Simulation für die technischen Simulationsmodelle kann dabei wie folgt aussehen, wobei darauf verwiesen wird, dass analytische Methoden in der Fördertechnik und Technischen Logistik noch immer eine bedeutende Rolle spielen:

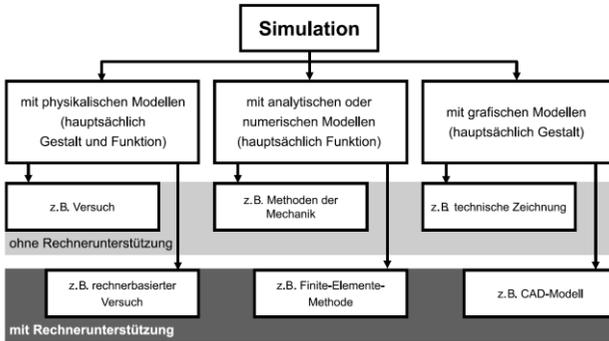


Bild 6.20: Systematik der Simulation [VDI 2209]

Wenn man nun versucht, die mittlere Säule der Simulation und darin jene der numerischen Methoden, bzw. jener analytischen mit numerischer Lösung auf die Technische Logistik zu übertragen, so kann man folgende Simulationskerngebiete angeben (Kerngebiete **fett**, Randbereiche dünn und interdisziplinäre Bereiche *kursiv*), eine Ziel- und Beispielzuordnung von realen Modellen zu den Simulationsbereichen sei hier ausgespart; die Thematiken werden vorerst bewusst nicht mit dem Begriff „Simulation“ sondern mit „Untersuchung“ betitelt, um nicht vorschnelle Assoziationen mit dem Begriff „Simulation“ zu erzeugen, auf Abgrenzung zur Analytik sei aber dezidiert hingewiesen:

- **dynamische Untersuchungen**
 - **MehrKörperSysteme (mit realen Geometrien)**
 - **klassische MKS**
 - **DEM**
 - **objektorientierte abstrahierende Systeme auf signalflussorientierter Basis zum Lösen selbst erstellter (oder aus Bibliotheken generierter) (Differential)gleichungen – folgend als AS bezeichnet (nach [ROD13] auch als Blockschaltbildeditoren bezeichnet)**
- **strukturelle Untersuchungen der Festigkeit und Schwingform von Strukturen**
 - **FEM-Methode für Strukturanalyse** mit Aufsatzprogrammen zur Schadensakkumulierung
 - FEM-Methode für Modalanalyse
- *hydraulisch/pneumatische Untersuchungen*
- *thermische Untersuchungen*
 - *Untersuchungen von Verbrennungsprozessen*
 - *Untersuchungen von Wärmeübertragungsvorgängen*
- *Strömungsuntersuchungen*
- *elektrische Untersuchungen*
 - *darin hauptsächlich Koppelungseffekte von el. Antrieben mit mechanischen Strukturen auf dynamischer Basis*
 - *Einbindung magnetischer Untersuchungen in Gesamtmodelle*
 - **Entwurf und Wirkung von Reglerstrukturen**

Da die Branche nicht so schnell-innovativ wie z.B. die durch Marktdruck und Kundennachfrage getriebene Automobilindustrie ist und bewährte Lösungen hier oft eher akzeptiert werden als innovative Neuigkeiten, ist der Bedarf an Simulationsanwendungen auf Geräte- und Bauteilebene zur Produktoptimierung vorerst gering, da der dadurch entstehende Kunden- und Zusatznutzen aus der Anwendung teurer Simulationsprodukte nicht offenbar ist. Produktlebenszyklen von beispielsweise 15 Jahren sind keine Seltenheit. Simulationslösungen – und hier besonders jene der FEM-Strukturanalyse und der Dynamikberechnung von Antriebskomponenten – halten somit nur schleppend Einzug in die Entwicklungsabteilungen der großen Firmen, die auch bei vielen Branchenführern aus nur wenigen Ingenieuren bestehen. Ein gutes Beispiel für die teilweise fachimane Innovationsskepsis ist die nahezu kategorische Ablehnung der DEM-Schüttgutflusssimulation [GK06] und [KRA06] des im Fachbereich etablierten Auditoriums von Firmen der Schüttguttechnik [KAT08], mit der erstmals – wenn auch mit großem Rechenaufwand – eine Simulation des Verhaltens von Schüttgütern möglich gemacht wird. Mittlerweile befassen sich v.a. die etablierten Forschungsinstitute umfangreich mit dem Einsatz dieses Werkzeuges und eine Projektion auf Bereiche abseits des Schüttgutes ist erkennbar [FWJ13], [GKK13].

6.5.1.1 Trends beim Simulieren.

Die aktuellen CAE-Trends zeigen eine Vereinigung verschiedener physikalischer Domänen in einer Umgebung (z.B. ANSYS® Workbench [ANS12]) zu einem Gesamtsimulationspaket, die v.a. von der Fahrzeugindustrie für schnellere Modellwechsel und weniger kostenintensives Prototyping getrieben werden. Somit ist die Simulation in den unterschiedlichsten Ausprägungen heute ein unverzichtbares Element des Produktentwicklungsprozesses, die den Prozess des Frontloadings (Nachvorverlegung relevanter Entscheidungen am Produkt während des Entwicklungsprozesses) wesentlich unterstützt. Das gute Zusammenspiel von Konstruktion (CAD) und Berechnung zu CAE, möglichst in ein und demselben Programm, ist somit hauptsächlich zeitbestimmend im Konstruktionsprozess.

Die Herausforderungen eines konkurrierenden Marktes erfordern verkürzte Entwicklungs- Erprobungs- und Produkteinführungszeiten um den Schlüssel zum Erfolg – die Innovation – vor dem Mitbewerber an den Kunden zu bringen. Darin wurde die Simulation schon lange als das probate Mittel gesehen, die Zahl physischer Prototypen und unterschiedliche Tests damit zu verringern. Der durch die historische Rechnerentwicklung und Systemkomplexität bedingte Transfer der rechnerischen Auslegung von Konstruktionen weg vom Konstrukteur hin zu speziellen Berechnungsabteilungen, die in der Lage waren, die aufwändig zu programmierenden Systeme (hauptsächlich für FEM und MKS) manuell zu programmieren und die Ergebnisse aufzubereiten, brachte einen Schnitt in der Prozessqualität, umfangreiche Schnittstellendefinitionen, Informationsverluste und vor allem lange Transferzeiten.

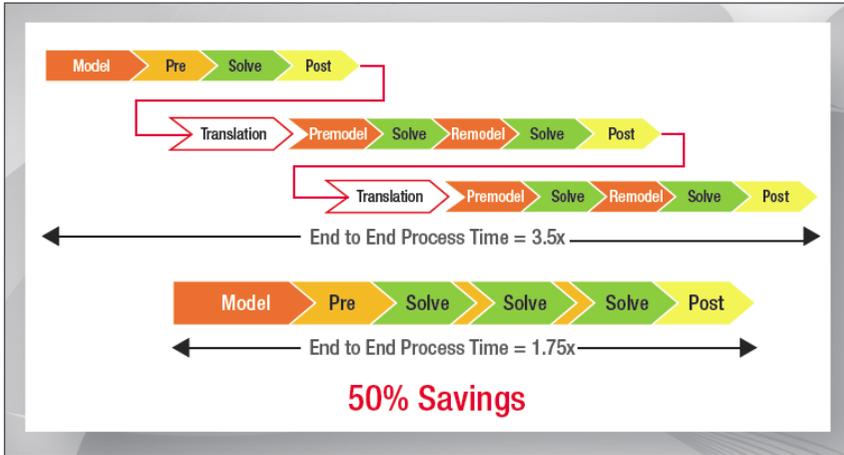


Bild 6.21: Reduktion der Entwicklungs-/Berechnungszeit beim Einsatz von multidomänen Simulationen [MSC14] – Praxis von simultane engineering und frontloading

Dieser Transferprozess beginnt nun, begleitet durch die PC-Entwicklung und die Umdefinition eines reinen CAD-Konstrukteurs zum CAE-Produktentwickler, zu schrumpfen, da moderne CAE-Tools und auch die CAD-Konstruktionsprogramme Berechnungszyklen unter ein und derselben Oberfläche verwalten. Dies bedeutet nicht nur vereinheitlichten Bedienkomfort, sondern auch gesicherte Datenkonsistenz. Dabei finden zusehends unterschiedliche physikalische Domänen in einer Software-Lösung Platz (s.o.), die Berechnungen auf dem Gebiete der Dynamik, Struktur, Wärme, Regelung und Akustik ermöglichen.

Ein nächster entscheidender Qualitätsschritt betrifft die Wiederverwendbarkeit und die einfache Anpassbarkeit von Simulationsmodellen moderner Programme. Darin ist das übergeordnete Datenmanagement mit Visualisierungsmöglichkeiten für Nicht-Simulationsanwender genauso wichtig, wie die standardisierbare Aufbereitung der Simulationsdokumentation. Dies führt neuerdings soweit, dass easy-to-use Simulations-Vorlagen von erfahrenen Berechnern erstellt werden, die es Konstrukteuren während der Produktentwicklung ermöglichen, standardisierte Berechnungen qualitätsgesichert durchzuführen und automatisch zu dokumentieren. Diese Templates (z.B. von Altair®: Process Manager mit Standardprozessen, reduzierten manuellen Eingaben, Qualitätschecks bei Eingaben, CAD/PDM-Integration) sind individuell programmierbar und führen die Anwender durch standardisierte und bewährte Prozesse. Sie ermöglichen es Unternehmen standardisierte Prozesse zu erstellen (Bild 6.22), die das Aufsetzen von Lastfällen, Schnittstellen zu CAD Paketen, PDM Systemen, Datenbanken und anderen IT Services und Anwendungen automatisieren.

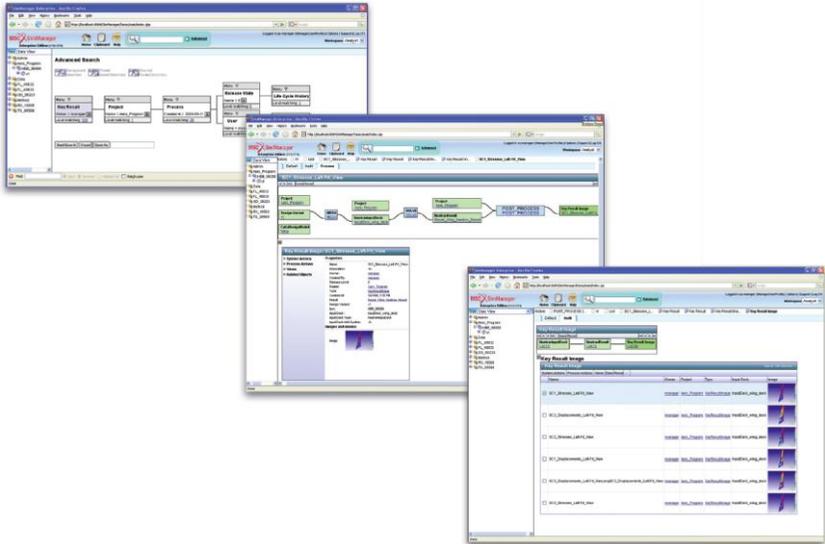


Bild 6.22: Simulation Content Management mit MSC.SimManager: Eingliederung ins Gesamtprojekt / Workflow eines FEM-Strukturanalyse Prozesses / paralleles Viewing von relevanten Ergebnissen verschiedener Simulationsläufe [MSC14].

Dadurch ist einerseits dem „unerfahreneren“ Konstrukteur eine Vielzahl von relevanten Berechnungsentscheidungen abgenommen und andererseits steht für eine high-end abschließende Berechnung eines erfahrenen Berechners schon eine optimierte Bauform des Bauteils zur Verfügung, womit wiederum die Transfervorgänge reduziert und optimiert werden. Best-practice Erkenntnisse aus PreProcessing, Entwicklung von virtuellen Testszenarios, Solving, PostProcessing und Reporting sind somit in den Softwaresystemen gebunden und universell verfügbar. Eine Benutzer-Rollenverwaltung solcher Systeme (Bild 6.22) gestattet es, übergeordnete Strukturen aus PLM-Systemen, wie sie in allen mittelständischen und großen Unternehmen bereits Standard sind, in die Simulationsverwaltung miteinzubeziehen.

Dass durch solche Schritte auch Know-How von Mitarbeitern abgezogen und in Systeme eingepflegt wird, wird von vielen Branchenverantwortlichen des Maschinenbaues, vor allem jenen mit starker Mitarbeiterfluktuation, sehr begrüßt. Die Verwendung solcher knowledge-management Systeme unterstützt die Qualität des Entwicklungsprozesses hin zu einem design for Six-Sigma (DFSS). Der Weg für Simulations Audits ist somit zugänglicher denn je zuvor. Eine weiterführende sozial-ethische Darlegung dieses Trends wäre hier natürlich verfehlt, ist aber aus vielerlei Gründen zukünftig unbedingt öffentlich zu führen.

Eine naheliegende Beobachtung zeigt, dass Kreativität, Leistungsfähigkeit, Motivation der Anwender und Qualität der Ergebnisse steigen, wenn unnötige Hürden aus den Programmen entfernt werden, der die gezeigten Trends der Programmentwicklung voll entsprechen [STE04a].

Um komplexe cyber-physikalische Systeme simulatorisch abzubilden, ist derzeit die Functional Mock-up Interface – Technik (FMI) ein probates Mittel, wie die Anzahl an Publikationen in einschlägigen Veranstaltungen zeigt [ITI13]. FMI bietet einen modellbasierten, tool-unabhängigen Systementwicklungsstandard um ein virtuelles Produkt als Summe und Kombination von Einzelmodellen für Co-Simulation zu erstellen und austauschbare Submodelle bereitzuhalten. Viele namhafte Software-Firmen der Simulationsbranche des konstruktiven Maschinenbaus wirken an der Erstellung dieses Standards derzeit mit [FMI14].

6.5.1.2 Verwendung von Simulation.

Gerade für jene Anwender, die Simulation neben ihrem „Hauptgeschäft“ (z.B. Konstruieren oder Dimensionieren nach Analytik und Richtlinien) betreiben und somit nicht-spezialisierte Berechner sind (vgl. Kap. 6.3.4), ist es bedeutsam, dass durch die immer benutzerfreundlicheren Simulationsprogramme die Hemmschwelle zum Erstellen eines Modells zunehmend im Sinken begriffen ist, da mit einigen wenigen Klicks ein „quick and dirty“ Modell erstellt werden kann.

Daraus entsteht neben der Frage nach der Qualifizierung des Bedieners zwingend die Frage nach dem Zweck eines Simulationsmodells besonders daher, welche Effekte abgebildet werden sollen. Die Detailtiefe eines Simulationsmodells ist dabei immer von der gewünschten Beschreibung auftretender Effekte abhängig, wie in Kap. 6.4f. ausführlich dargelegt. So kann man von der Abstraktion einer schwingfähigen Struktur durch einen Einmassenschwinger nicht erwarten, Akustikfragestellungen damit zu lösen. Das führt zu den unterschiedlichen Modellbildungskonzepten induktiver und deduktiver Art.

6.5.1.3 Simulationskonzepte für technische Simulationsmodelle dynamischer Untersuchungen.

Obwohl der Arbeitsablauf beim Simulieren immer ein ähnlicher ist, unterscheiden sich die Voraussetzungen und die nötige Systemkenntnis die man benötigt, um eine reale technische Struktur in ein Simulationsprogramm überzuführen. Wenn bei Strukturberechnungen mit FEM die 3D-Geometrie und die Kenntnis der Randbedingungen (Lagerungen und Lasten) oftmals schon recht weit führt und man die Aufgabe nicht weiter abstrahieren, z.B. einzelne Bauteile entsprechend ihrem Verformungsverhalten auf einfachere Zusammenhänge reduzieren, muss, so sei für Dynamiksysteme, an denen Bewegungen untersucht werden, die folgende Einteilung vorgeschlagen:

- **Mehrkörpersysteme (MKS):**
Bezeichnet hier nicht das mechanische Zusammenwirken mehrerer Körper im Allgemeinen sondern die Simulation dynamischer Systeme mit (kommerziellen) Software-Tools mit realen Geometrieobjekten, der Definition von Bewegungszusammenhängen und Lasten über Objekte und der automatisierten Gleichungserstellung im Hintergrund.
- **Abstrahierenden Systeme (AS):**
Darin muss der Benutzer Funktionsstrukturen in Bauteilen erkennen und abstrahieren, beispielsweise eine Annäherung eines Biegeträgers mittels eines Einmassenschwingers, und sich über die Auswirkungen seiner Abstraktionen und der erwartbaren Ergebnisse viel eher im Klaren sein, als in einem MKS, wo man beispielsweise den Biegeträger

als flexible Struktur einbinden kann und dabei in der Regel näher an der Realität, wenn auch natürlich hier mit Abstraktionen, liegt.

Weiter unten folgen einige beispielhafte Ausführungen deren Darstellungsziel es ist, die Möglichkeiten der unterschiedlichen Herangehensweise mit AS oder MKS zu beleuchten, und zwar speziell aus der Sicht des Anwenders solcher Programme und weniger aus der Sicht von Entwicklern. Denn es bleibt festzuhalten, dass natürlich jede MKS-Struktur, und seien die Zusammenhänge noch so komplexer Art, in einem AS abgebildet und gelöst werden kann, es bedarf dann lediglich der manuellen Gleichungserstellung durch den Benutzer, die ihm im MKS-Programm von der Software abgenommen wird. Beim Beschreiben von Eigenschaften, die ein MKS-System quasi als Ergebnis liefert – z.B. komplexe kinematische Kopplungen – auch analytisch in einem AS beschreibbar (nichts anderes passiert ja im Hintergrund eines kommerziellen MKS-Programms), ist allerdings der Aufwand und die Fehleranfälligkeit dabei nicht zu unterschätzen. So kommt man wieder zur ingenieurtauglichen Problembetrachtung, die immer den Aufwand und die Möglichkeiten eines in vielen Disziplinen tätigen Ingenieurs zu berücksichtigen hat, und daher Systeme erfordert, die aufwändige Einarbeitungsphasen und theorieelastige Problemformulierungen vermeiden bzw. weitestgehend unterstützen.

Genau in dieser im Kern der Sache identen Modellerstellung bei MKS und AS (die Eingabe durch den Benutzer berührt diese Kernschicht jeweils nur indirekt) liegt auch die Kopplungsmöglichkeit der beiden „Simulationswelten“ begründet, die die kommerziellen Programme alle anbieten, worin in Co-Simulationen unterschiedliche Modelle in verschiedenen Welten (MKS/AS) gelöst werden (vgl. dazu auch FMU unter „Trends beim Simulieren“ im selben Abschnitt). Als anschauliches Beispiel ist dazu die Kopplung zwischen ITI-Sim (ein AS) und MSC.ADAMS (ein MKS) angegeben (Bild 6.23), worin ITI-Sim die gesamte Hydraulik mit Regelung abbildet und ADAMS für das Wirken der hydraulischen Größen an realen CAD-Geometrien sorgt, womit deren Bewegung visualisier- und analysierbar wird. Die Kopplung kann über Funktionsblöcke, direkte Schnittstellen oder TCP/IP-Protokolle auch rechnerübergreifend erfolgen [SIM14].

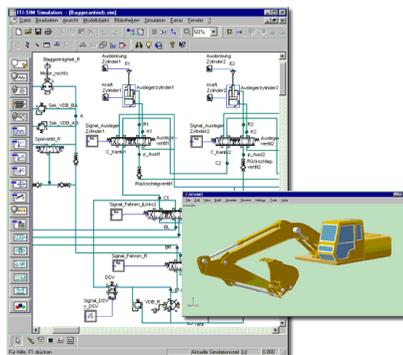


Bild 6.23: Simulatorkopplung Hydraulik/Mehrkörperdynamik in ITI-Sim/ADAMS.View (im Nachfolgerprodukt SimulationX bereits interne 3D-Mechanik, mit allerdings geringerem Leistungsspektrum als ADAMS [SIM14])

6.5.1.4 Exkurs: Simulationskonzepte – Anwendungsbeispiel Dynamik am Rundstahlkettenzug.

Mit verschiedenen Simulationenethoden wie AS oder MKS kann im Bereich Dynamikmodellierung unterschiedliches Know-how gewonnen werden, bzw. ist unterschiedliches Know-how zur Modellerstellung nötig. Dies sei hier anhand eines Rundstahlkettenzuges ausgebreitet.

Die Literatur [ARN06] kennt u.a. eine Differenzierung in Erklärungs- und Beschreibungsmodelle, die der Unterteilung hier in AS und MKS ähnlich erscheint. Das Beschreibungsmodell bildet in einem ersten Schritt ein System (so gut wie möglich) ab und führt bereits zu ersten Erkenntnissen und ist natürlich iterativ erweiterbar (induktive Modellbildung). Dem entspricht hier die Modellbildung dynamischer Vorgänge mit MKS. Das Erklärungsmodell ist in o.a. Quelle ein quantifiziertes Beschreibungsmodell zur vollständigen Beschreibung des Systemverhaltens; eine Analogie zum AS ist daraus nicht ableitbar. Beide Herangehensweisen AS und MKS können zu Prognosemodellen weiterentwickelt werden um Aussagen über noch nicht bekanntes Verhalten zu erzielen.

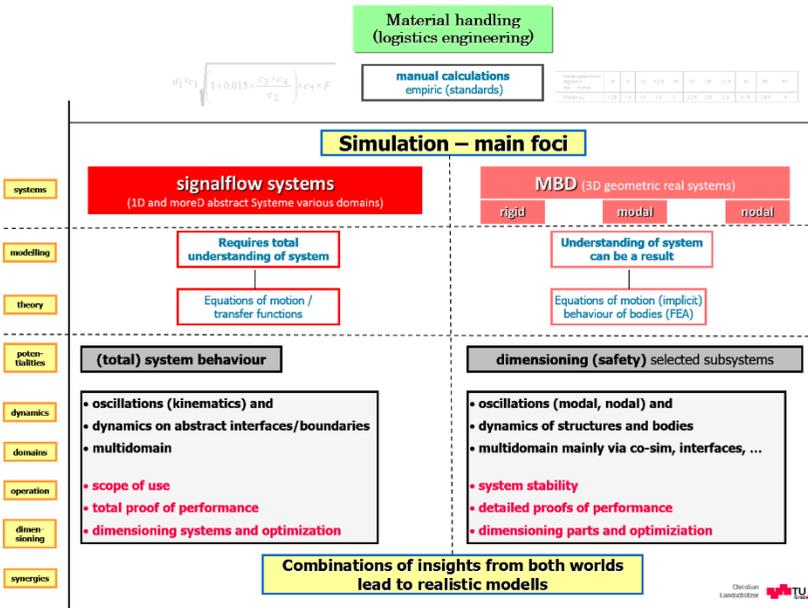


Bild 6.24 Unterschiede und Möglichkeiten durch AS und MKS an einem Rundstahlkettenzug [P7]

Am Beispiel des Rundstahlkettenzuges kann man die Unterschiede in der Herangehensweise mit AS und MKS erkennen, eine Fachkenntnis der Technik der Geräte ist unabdingbar wozu auf [LAN04] verwiesen wird. Prinzipiell lässt sich beispielsweise das Eingriffsverhalten der Rundstahlkettenglieder in das Kettenaschenrad mit einem MKS gut modellieren, ohne die genauen Lagen des Kettenglieder analytisch beschreiben zu müssen, was aufwendig ist [MOS12].

Aus der MKS kann für ein AS (hier sind prinzipiell „größere“ Simulationsmodelle mit unterschiedlichen physikalischen Domänen besser modellierbar) eine Ersatzfunktion gefunden werden, oder es wird auf die Simulatorkopplung und Co-Simulation zurückgegriffen. Die Generierung und Überprüfung einer Ansatzfunktion für die Lage der Kettenglieder in der Kettennuss bei Drehung derselben kann als Know-how-Gewinn der MKS-Modellierungsweise erachtet werden, da eine analytische Beschreibung dieses Phänomens nicht allseits befriedigend erscheint (Bild 6.24).

Während nun in AS vornehmlich Einsatzgrenzen von Systemen, Gesamtleistungsnachweise und Gesamtkomponentendimensionierungen sinnvoll erscheinen, können in MKS Einzelphänomene wie Stabilitäten, Teilleistungen und Bauteildimensionierungen vorgenommen werden, und so führt sie Ableitung von Eigenschaften aus Einzel-Modellverhalten beider Welten mit deren Implementation im jeweils anderen System zu einer realen Nachbildung der technischen Struktur (Bild 6.25).

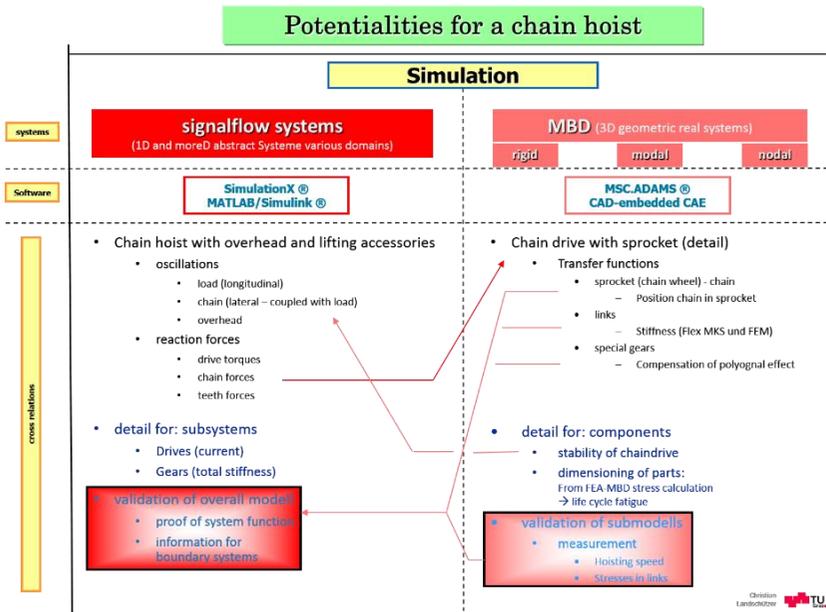


Bild 6.25 Möglichkeiten, Einflüsse, Anwendungen und Rückwirkungen von AS und MKS bei einem Rundstahlkettenzug [P7]

6.5.1.5 Verbreitete Software für Dynamikuntersuchungen mit AS und MKS

Hier soll eine kurze Unterscheidung AS/MKS mit Angabe einiger führender kommerziell verfügbarer Produkte erfolgen. Eine Gliederung in physikalische Domänen ist hier nicht möglich, da die einzelnen Programme stets über Funktionalitäten aus unterschiedlichsten physikalischen Bereichen verfügen. Auch eine Methodennennung wie z.B. FEM ist hier nicht angebracht, da ja z.B.

mit FEM ebenfalls Probleme unterschiedlichster physikalischer Art gelöst werden können; am bekanntesten ist im Maschinenbau hiezu wohl die Festigkeitsberechnung von Bauteilen womit „FEM“ synonym dafür Einzug in den technischen Sprachgebrauch gefunden hat.

- AS
 - signalflussorientiert/Blockschaltbild (Simulink [BOD06]),
 - objektorientiert/bibliotheksbasiert (ITI-Sim und SimulationX [SIM14], Dymola [CAT06], SimMechanics [MAT08], Modelica [MOD05])
- MKS
 - ADAMS [MSC10], Simpack [SIM09], RecurDyn [REC08], Altair MotionView [ALT07]: domain- u. solver-neutral
- SIM in CAD
 - SolidWorks (COSMOSWorks) [DAS06]
 - NX (vormals UG: Nastran) [SIE05]
 - CATIA (SIMULIA) [DAS14]
 - Pro/ENGINEER bzw. Creo (Mechanica und Mechanismus) [PTC11]
 - SimDesigner (Structure, Motion) ausführen von SimXpert-Templates (msc.software) in CAD-Umgebung
 - CATIA V5, NX, Pro/E

6.6 CAx

Der Begriff CAx steht für die rechnerunterstützte Produktentwicklung, worin die rechnerbasierte Simulation einen entscheidenden Stellenwert einnimmt. Die Programme des CAx-Bereiches folgen alle dem EVA-Prinzip (Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe) [RS12], wobei der Datenaustausch zwischen den CAx-Bereichen eine Herausforderung darstellt (s. dazu auch Prozessketten des virtuellen Produkts in Kap. 6.10.2). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind unter x stellvertretend die Bereiche nach Bild 6.29 zu sehen, die nach Ansicht des Autors ausschlaggebend für das Engineering in der Technischen Logistik sein können, bzw. im Falle von zumindest 2D-CAD schon sind, da man bei jenem Werkzeug von einer Mindestdurchdringung durch die Branche der Technischen Logistik sprechen kann. Im Rahmen des Anliegens dieser Arbeit, der Schließung der methodisch-technologischen Lücke zwischen Trendsetter-Bereichen des Engineerings (automotive) und der Technischen Logistik, werden vor allem jene Bereiche des CAx verstärkt methodisch dargestellt, deren Verbreitung noch nicht groß ist.

Für jede (technische) Problemstellung lässt sich ein Problemlösungszyklus (PLZ) durchlaufen, wie in Bild 6.26 dargestellt [VDI 2210] mit

- Problemdefinition
- Lösungsfindung
- Lösungsbeschreibung
- Lösungsbewertung
- Lösungsentscheidung

Wenn man einen sehr allgemeinen vierphasigen Konstruktionsprozess zugrunde legt, angelehnt an [VDI 2221], [VDI 2222] (siehe auch Abschnitt 6.10,6.11) und die Analogie der Phasen aus [VDI 2222] zu den Tätigkeitsbeschreibungen nach [VDI 2210] (s. Bild 6.26) beachtet, mit:

- Planen / Anforderungsmodellierung
- Konzipieren / Funktionsmodellierung
- Entwerfen / Prinzipmodellierung
- Ausarbeiten / Gestaltung

kann man in Bild 6.26 die Einsatzgebiete von CAx nicht nur in einem isolierten Problemlösungsfall einsehen, sondern auch deren Zuordnung im methodischen Konstruktionsprozess auslesen. Während die CAD-Systeme mit der Geometriemodellierung hauptsächlich zur Lösungsbeschreibung bzw. -darstellung dienen, sind mit CAE-Systemen vorwiegend Bewertungen nach z.B. Funktion und Sicherheit möglich. Weitere CAx-Elemente aus beispielsweise dem Wissensmanagement und/oder der Fertigungsunterstützung können auch in anderen Phasen des PLZ und vor allem des Konstruktionsprozesses eingesetzt werden.

CAx inkludiert eine große Spanne von Berechnungs-, Simulations-, Optimierungs-, und Planungswerkzeugen aus unterschiedlichsten physikalischen und organisatorischen Domänen wie Mechanik, Elektrik/Elektronik, Optik, Thermik, Strömungsmechanik bis hin zu Ablaufsteuerung und -planung und in einigen Quellen wird CAx sogar synonymisch für die (virtuelle) Produktentwicklung

gebraucht, laut [HIR11]. Für den Begriff CAX existieren nun unterschiedlichste Definitionen, wozu Bild 6.28 und Bild 6.27 einen guten Überblick geben; eine Darstellung der Begriffe folgt in den Unterkapiteln insofern, als sie für das Engineering in der Technischen Logistik relevant sind.

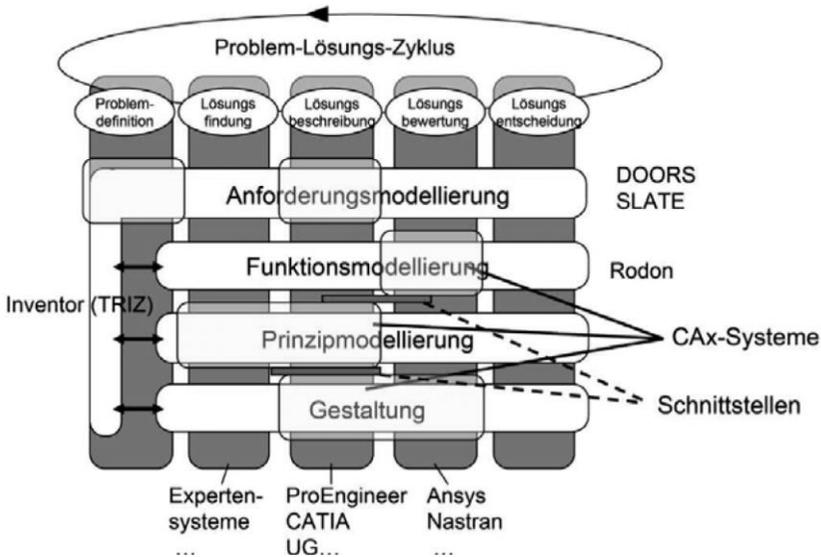


Bild 6.26: Rechnerverwendbarkeit im Konstruktionsprozess [VDI 2210] aus [LOS06]

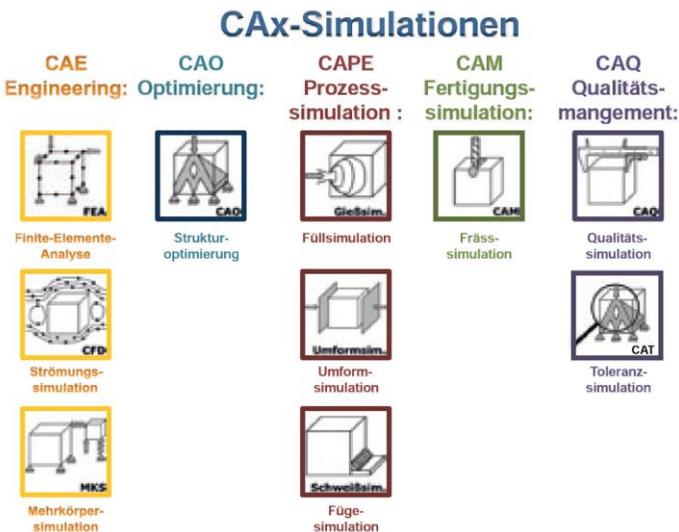


Bild 6.27: Simulationen des CAX [RS12]

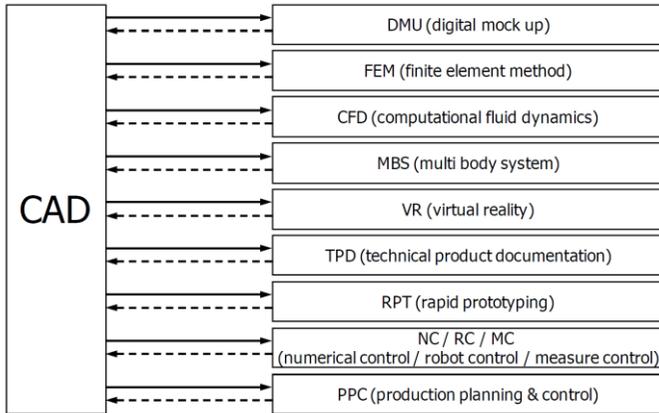


Bild 6.28: CAx-Prozessketten der Automobilindustrie, Informationsfluss [HIR11]

Für das Engineering in der Technischen Logistik (ohne organisatorisch-planerische Simulationen) können nach Einschätzung und Erfahrung des Autors folgende Bereiche des CAx nach Bild 6.29 als bedeutsam festgemacht werden:

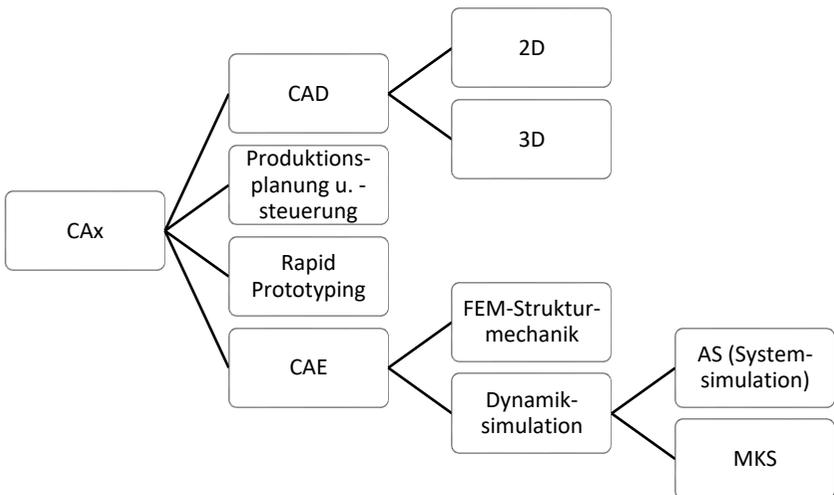


Bild 6.29: CAx im Engineering der Technischen Logistik und dessen Verbreitungstiefe

Der historischen Verbreitung nach Bild 6.30 korrespondierend mit Bild 6.29 zeigt die noch nicht geschlossene Lücke des CAx-Einsatzes zwischen automotive und Technischer Logistik, durch z.B. gänzlich fehlendes kompletter virtueller Produktentwicklung, verbundenen Prozessketten CAD-CAE, integriertem Produktdatenmanagement sowohl als auch im Fehlen von Simulations-Speziallösungen.

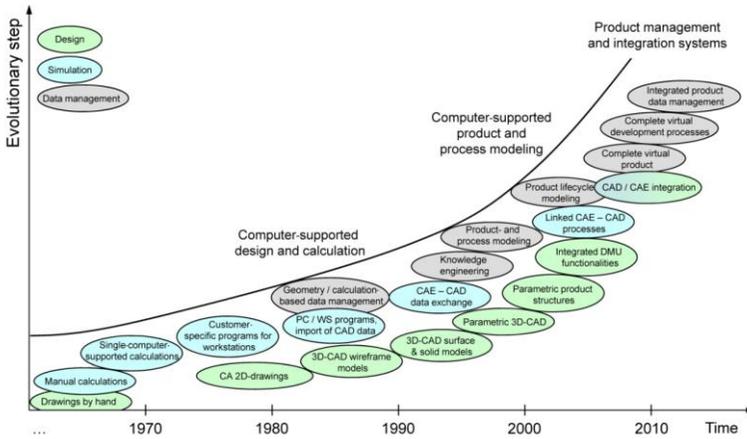


Figure 2.4: Historical development of CAD, CAE and data management, according to [41, 107, 157]

Bild 6.30: Historische Entwicklung des CAD, CAE und Datenmanagements im automotive-Bereich [HIR11]

6.6.1 CAD

VDI 2209 [VDI 2209] ist derzeit das maßgebendste und modernste Kompendium zu Begriffen, Beispielen und Modellierungsstrategien in CAD, neben den wertvollen Ausführungen in [VWB+09] und [RS12]. Die software-orientierte Literatur (u.a. [BRÖ08]) bleibt methodisch strategisch oberflächlich und liefert größtenteils nur klick-to-klick Anleitungen.

Die Relevanz des methodisch richtigen Einsatzes von CAD entscheidet maßgebend sowohl über die Variationsmöglichkeiten einer Konstruktion als auch über den Aufwand der Ersterstellung und Adaption.

Die Darlegungen hier folgen der neuen Sichtweise von VDI 2209 [VDI 2209], die die Werkzeuge den Konstruktionsverfahren unterordnet. Einen guten Überblick der historischen Entwicklung von CAD, von den Anfängen der 1960er-Jahre bis hin zum Stand nach [VDI 2209], bietet die Quelle [WEI08]. Anfang der 2000er-Jahre konnte eine Verwendung von 3D-CAD in einem repräsentativen Branchenquerschnitt von 79% eruiert werden [VDI 2209], das 2D-CAD verschwindet somit zusehends aus dem Arbeitsalltag der Konstrukteure; die Ausführungen hier beziehen sich auch daher speziell auf 3D-Produktmodellierung anstelle 2D-Zeichnen.

CAD ist zu einem unersetzbaren Werkzeug der Produktentwicklung geworden, das neben (vollständigen) geometrischen Informationen für Domänen des CAx (Bild 6.31) auch geometrische Informationen während des gesamten Produktlebenszyklus' in unterschiedlicher Detaillierung dokumentieren bzw. generieren kann (Bild 6.32).

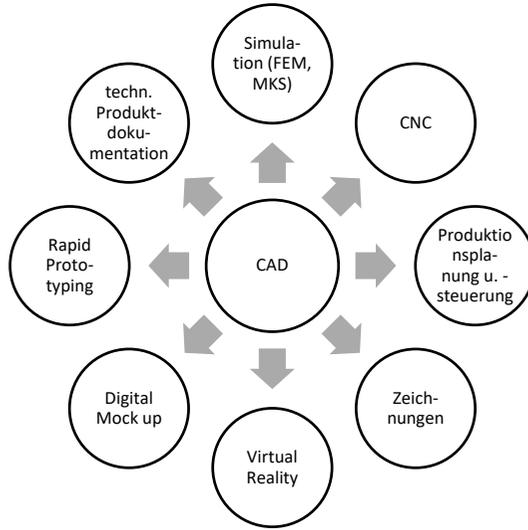


Bild 6.31: Beziehungen des CAD zu Disziplinen des Cax nach [EM13], [HIR11]

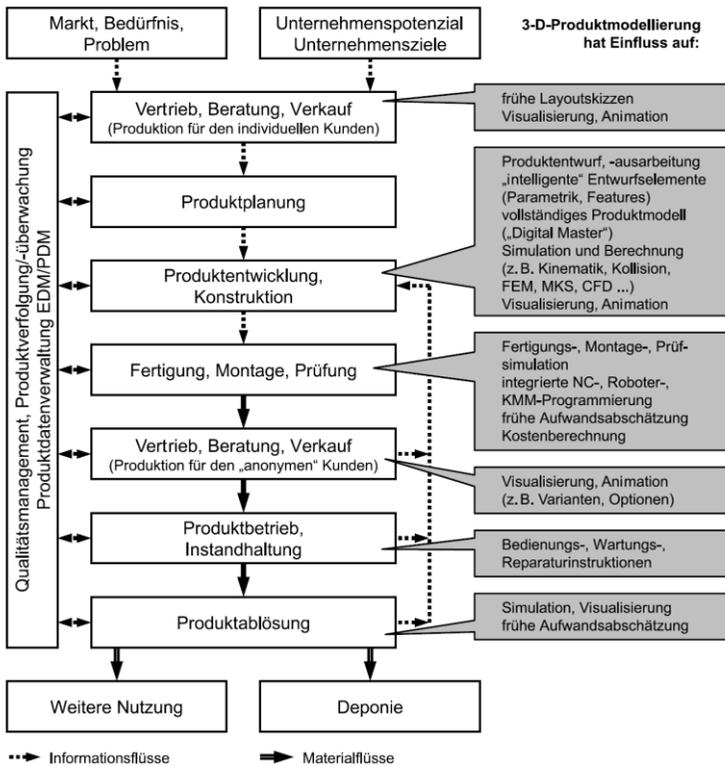


Bild 6.32: CAD im Produktlebenszyklus nach [EM13], [HIR11]

Die Hauptvorteile des Einsatzes von CAD überwiegen die wenigen Nachteile v.a. der Neueinführung eines 3D-CAD-Systems, wie schwierige Nutzungsstrategiedefinition, Vernetzungsnotwendigkeit zu organisierenden Systemen (ERP, PDM/PLM), aufwendige Methodendefinition der Konstruktionsweise oder bei Nichtbeachtung Vorbestimmung von Änderungskonflikten, und lauten, adaptiert nach [VDI 2209]:

- Vollständiges Produktmodell abbildbar
- Teilweise automatische oder einfache Generierung von zu erstellenden und zu verwaltenden Dokumenten wie Stücklisten, Zeichnungen, Anleitungen, Kataloge, ...
- Frühzeitiges Erkennen von funktionalen und fertigungstechnischen Problemen und daher Möglichkeit zum Simultaneous Engineering
- Möglichkeit zum wissensbasierten automatisierten Konstruieren
- Interaktion und Geometriebereitstellung zu den Domänen des CAx (Bild 6.31)

Im Folgenden ist eine kurze Darstellung angegeben, wie mit den **Funktionen** des CAD unterschiedliche **Geometriemodelle** unter Zuhilfenahme von **Modellierungstechnologien** erzeugt werden können. Relevanten Einfluss auf die Güte und Wiederverwendbarkeit des Modells hat die gewählte **Konstruktionsmethode** im CAD.

6.6.1.1 Funktionen von 3D-CAD am Beispiel ProE/Creo nach [RS12]

Die Funktionen eines CAD-Systems sind weitestgehend unabhängig von der (kommerziellen) Realisierung desselben in einem Softwareprodukt, da die mathematischen Modelle und Operationen die Funktionen bestimmen und über alle CAD-Produkte hinweg auf die gleichen Ansätze zurückgreifen. Folgende Hauptfunktionen bestimmen die Modellierungsmöglichkeiten von 3D-CAD-Systemen, nach [RS12]:

- Skizzieren:
Linien, Quadrate, Kreise, Kreisbogen, Verrundungen, Splines, Punkte, definierende Bemaßungen, Skizzierbedingungen, dynamisches Trimmen, Bezugsebenen, -achsen, -punkte und -koordinatensysteme
- Körper erzeugen:
Extrudieren, Drehen, Zug- und Verbund-Konstruktionselemente mit variablem Schnitt, Berandungsverbindungs-Tool, Spiegeln, Verschmelzen, Trimmen, Mustern, Bohren, Schalen, Rippen, Schrägen, Runden, Fasen, Füllen, Projizieren, Wickeln, Spirale, Dehnen, Kosmetik (Gravur, Gewinde, Skizze ...), Flächen
- Analyse:
Messen, Geometrie (Punkt, Radius, Krümmung, Schnitte, Abweichwinkel, Versatz, Schräge, Steigung, Reflexion, Schatten ...), physikalische Eigenschaften (Masse, Trägheit, Schwerpunkt) – speicherbar in Analyse-Konstruktionselementen (Analyse-KE), Sensitivitätsanalysen, Multiziel-Konstruktionsstudien, Durchführbarkeit, Optimierung, ModelCheck, Teilevergleich, Skalierung

- Baugruppen:
 - Skeletttechnik, Familientabellen, Eltern-Kind-Beziehungen, Parametersteuerung, Formeln, Einbauen, Einsetzen, flexibles Einbauen, Unterstützungswerkzeuge für Strategien wie top-down oder bottom-up (z.B. Referenzviewer)
- Sonstiges:
 - Distributed Computing, Web-Link, Publiziergeometrie, Schrumpferpackungen, Vererbung aus anderen Modellen, Kopiergeometrien, Bilderstellung, Rendering, detaillierte Zeichnungsableitung
- Integrierte Module:
 - Verkabelung, Rohrverlegung, Schweißen, Belastungssimulation (FEM), Temperatursimulation (FEM), Bewegungssimulation (MKS), Spritzgussimulation, Spritzgusslayout, NC-Postprozessor, Verbundwerkstoffe, Blechteileentwicklung, Fertigungssimulation
- Flächenmodellierung (am Beispiel CATIA V5 (Auszug)):
 - Drahtmodellerzeugung durch Projektion, Kombination, Reflexionslinien, 3D-Kurvenoffsets, Verbindungskurven, Splines, isoparametrische Kurven, Spiralen und Helix
 - Flächenerzeugung durch Extrudieren, Drehen, Kugel- oder Zylinderfeature, Offset, Translation, Füllen, Flächen mit Mehrfachschnitten, Übergänge
 - Operationen zum Zusammenfügen, Reparatur, Trennen, Trimmen, Verrunden, Verschieben, Symmetrie, Skalierung, Affinität, Extrapolation, Bedingungen
 - Replikation wie Kreis- und Rechteckmuster, Objekterzeugungswiederholung, Wissensvorlagen, Beulen, Verformung über Kurven oder Flächen, Analysieren durch „Connect checker“, Krümmungsanalyse mit Stacheln, Cutting-Plane-Analyse, Reflexions- und Inflexionslinien, Hervorhebungslinien, Auszugsschrägenanalyse, Flächenkrümmungsanalyse, Umgebungszuordnung und Isophorenzuzuordnung.

6.6.1.2 Modellarten und Modellierungstechnologien – Verwendung im „Engineering“

Die modellhafte Abbildung der Geometrie eines realen Objektes im CAD ist stets einer der angegebenen Modellarten zuzurechnen oder eine Kombination davon:

- Kantenmodell (oder auch Drahtmodell):
 - Geometrie wird nur durch berandende Kurven dargestellt; schnelle Bearbeitung, aber „unübersichtlich“
- Flächenmodell:
 - Regel- und Freiformflächen werden durch Geometrieerzeugungsoperationen (s.o.) aus 2D-Skizzen erstellt oder aus 3D-Berandungen synthetisiert; verwendet für z.B. Fräsflächen

- **Volumenmodelle:**
besitzen nicht nur eine Oberfläche wie Flächenmodelle, sondern auch Volumen und Materialinformationen zur Darstellung physikalischer Eigenschaften des Objekts.
- **CSG-Modelle:**
sind den Volumenmodellen zuzuordnen und entstehen durch Bool'sche Verknüpfungen mehrerer Körper. Die Erstellung ist unbedingt chronologiebasiert (CSG-Baum) und wird mitgespeichert.
- **B-Rep-Modelle:**
beschreiben Volumina rechnerintern durch die sie begrenzenden Flächen und diese wiederum durch die Berandungskanten. [VDI 2209]
- **Hybride Modelle:**
In einem Hybrid-Modell finden sich sowohl CSG-Bäume als auch B-Rep-Darstellungen. Dabei werden B-Rep-Volumina als „komplexe Primitive“ in die CSG-Bäume integriert. Die strikte Trennung beider Modellierer-Typen ist bei den meisten der heute eingesetzten 3-D-CAD-Systeme durch die Benutzungsoberfläche nach außen nicht mehr eindeutig erkennbar. Hier besteht die Möglichkeit, Zusammenhänge aus unterschiedlichen Sichten darzustellen: einerseits eine Konstruktionshistorie auf der Basis der CSG-Bäume, andererseits die Relationen aller Objekte untereinander (geometrische, topologische, Constraints etc.) und die Ergebnisse daraus durch die B-Rep-Darstellungen. [VDI 2209]

Die Erzeugung der Modellarten kann in den verbreiteten Software-Programmen des CAD mit folgenden **Modellierungstechnologien**, unabhängig vom Software-Produkt, vorgenommen werden:

- **Direkte Modellierung:**
Die direkte Modellierung erzeugt keine dauerhaften Abhängigkeiten zwischen den erzeugten Punkten, Linien, Flächen und Körpern. Die Änderung der erstellten Geometrie erfolgt direkt und interaktiv über die entsprechende Funktion. Die verwendeten Elemente enthalten keine weiteren Informationen (wie beispielsweise bei den Features). Die direkte Modellierung ist zumindest in ihrem Zugang zu Änderungen in modernen CAD-Software-Systemen (wie z.B. Creo von PTC) mit der Parametrik verknüpft, womit durch intuitives „ziehen und zupfen“ an der parametrischen Geometrie (nach)modelliert und geändert werden kann, ohne die Parametrik dabei zu ändern.
- **Parametrische Modellierung, angelehnt an [HOI14] dort nach [FEL13b]:**
Die parametrische Modellierung ist mittlerweile Standard in allen verfügbaren kommerziellen CAD-Software-Produkten. Die Eigenschaften der Modelle und ihre gegenseitige Abhängigkeit werden durch variable Größen (Parameter) beschrieben. Durch die Veränderung von Parametern wird das Modell direkt verändert. Das CAD-System muss dabei das Modell aktualisieren und seine Konsistenz prüfen und sicherstellen.

Es gibt CAD-Systeme, die eine Vollparametrisierung aller Varianten während des geometrischen Modellierens vorschreiben. Andere CAD-Systeme lassen auch eine Teilparametrisierung zu, die ein Anwender nachträglich an bereits modellierten geometrischen Elementen vornehmen kann.

Einige Systeme bieten eine Implementierung der Parametrik auf der Basis konventioneller Tabellenkalkulations-Software an. Neuere Entwicklungen ermöglichen das Einbeziehen von wissensverarbeitenden Elementen in die Parametrik. Die in den Systemen vorhandenen Schnittstellen der Parametrik nach außen sind Basis für das wissensbasierte Arbeiten.

Mit der Einbeziehung der geeigneten Konstruktionsmethode und übergeordneten externen oder internen berechnenden Vorschriften (formalisiertes Wissen) ist Knowledge-based Engineering nur in parametrischen Systemen umsetzbar. Die Parametrik bringt eine Qualitätsverbesserung der CAD-Modelle und die Notwendigkeit zu strukturiertem Vorgehen und Zeitersparung besonders im Änderungswesen.

- Features:

Features [VDI 2218] können als Bauelemente unterschiedlicher Klassen verstanden werden, die auf Geometrie-Werkzeuge (aber auch CAD oder FEM) aufsetzen können und mehr als nur geometrische Informationen tragen. Das Feature wird aus einer entsprechenden Bibliothek ausgewählt, die aus dem Lieferumfang der CAD-Software stammen kann, oder selbst erzeugte Features enthält und die somit ein Speicher formalisierten Wissens ist. Die Parametrik ist eine Voraussetzung für die Feature-Technologie.

Die Verwendung von Norm- und Standardteilen ist nur sehr bedingt dem Bereich Features zuzuordnen und stellt eigentlich keine eigene Modellierungstechnologie dar. Sie erhöht die Wirtschaftlichkeit des CAD-Einsatzes. Standardteile können als parametrische Modelle oder nicht veränderbare Varianten eingesetzt werden. Es bedarf eines effizienten Verwaltungswerkzeuges (ERP oder PDM) zur eindeutigen Verwendung. Diese Teile können lokal kopiert oder von Datenbanken referenziert eingebaut werden. Problematisch ist die Genauigkeit und Verfügbarkeit des Datenformates (vgl. dazu [VDI 2209]).

Die Modellierungschronologie stellt als solche ebenso keine Technologie dar, sondern spiegelt über den chronologischen Verlauf der Modellierungsschritte im Wesentlichen die Logik hinter der Modellierung des Teiles oder der Baugruppe wieder und ist keinesfalls mit der Produktstruktur zu verwechseln, die im CAD-Modellbaum nicht a priori abgebildet wird.

6.6.1.3 Konstruktionsmethoden im CAD

Die Methoden bzw. Begriffe Top-Down und Bottom-up (und die unten angegebenen Modellierungsstrategien) werden in [VDI 2209] erstmalig definiert und sind den CAD-Konstrukteuren intuitiv vertraut, werden aber methodisch systematisch weder in der Lehre noch in der CAD-Fachliteratur ([BRÖ08]) durchgängig und eindeutig verwendet.

Der Einsatz der richtigen Methode hängt weitestgehend von folgenden Rahmenbedingungen, Voraussetzungen und Anforderungen ab und ist im Individualfall je neu zu beurteilen:

- Komplexität des Produktes und seiner Einzelteile
- Konstruktionsart (Neu- Anpassungs- oder Variantenkonstruktion) und daraus Änderungs/Anpassungsaufwand sowie Modularisierungsstrategie
- Anbindung weiterer Berechnungsverfahren die CAD-Geometrie nutzen
- Möglichkeiten der CAD-Software und der Produktdatenmanagementsysteme
- Fähigkeiten der Konstrukteure und historische Entwicklung im Unternehmen

Eine generelle Einsatzempfehlung von top-down kann in dieser Form nicht ausgesprochen werden, wenngleich dies in den Unternehmen die vorherrschende Methode ist [VDI 2209] und auch im Bereich der Technischen Logistik nach diesem Vorgehen gearbeitet wird.

Erzeugnisorientierte Modellierung, top-down:

- Parametrik entlang der Produktstruktur (quasi top-down). Schwierig beim Einbauen von Einzelteilen die bottom-up erzeugt wurden.
- Struktur:
(Hilfs)strukturebene-Baugruppenebene-Bauteilebene
- Hilfsmittel:
 - Festgelegte Referenzgeometrien (anhand der Produktstruktur)
 - Parametrik der der Referenzgeometrie anhängenden Elemente an jener festgemacht.
- Einsatz:
 - entspricht dem (Neu)konstruktionsprozess mit der schrittweisen Konkretisierung von abstrakten Funktionen zu Bauteilen und Baugruppen.
 - Unterstützung durch bauraumorientierte Modellierung.

Bauteilorientierte bzw. einzelteilorientierte Modellierung, bottom-up:

- Parametrik unabhängig von der Produktstruktur ermöglicht freieres Modellieren.
- Struktur:
Produktstruktur ist Ergebnis des (geometrischen) Zusammenbaus bottom-up.
- Hilfsmittel:
 - Jedes Bauteil kann seine Bezugselemente definieren.
 - Beim Vereinen zu Baugruppen müssen Referenzen der Einzelteile extrahiert und in die übergeordnete Struktur transferiert werden (erheblicher Aufwand und Konfliktpotenzial bei Mehrfachverwendung eines Bauteiles) um Abhängigkeiten der Bauteile untereinander zu vermeiden.
 - Modellierung über Bauraumdefinitionen und Skizzen (quasi wieder top-down), Features und hybride Modellierung (Nutzung von Volumen-, Flächen- und/oder Kantenmodellen zur bspw. Nachkonstruktion von gemessenen Bauteilen).

- Komplexe Einzelteile:
Zwei Ansätze für den Überblick und die Beherrschung vieler Konstruktionsschritte:
1.: mehrstufige Struktur der Chronologie unter Nutzung von Bauräumen mit Funktionseinheiten. Schnittstellen zu weiteren Einheiten über Bezugsэлеmente
2.: Features und Gruppen von Features von Funktionseinheiten
- Einsatz:
 - wenn im Unternehmen verbreitet und häufig an bestimmte Baugruppen gebundene Konstruktion die (abteilungs)autonom erstellt werden.
 - wenn wiederzuverwendende Baugruppen und -teile in Gesamtmodelle zu integrieren sind.
 - Erstellung von Baukästen

Bauräumorientierte Modellierung:

- Von außen nach innen: wenn die äußere Gestalt maßgebend ist (Bauraumbegrenzung)
- Von innen nach außen: die Funktionen der Innenteile definieren den Bauraum.

Differenzierung des CAD-Einsatzes und der Erzeugungsarten nach Konstruktionsart:

- Neukonstruktion:
Anpassung und Variantenentwicklung im CAD schon mitplanen durch modularen Aufbau, gute Strukturierung von Einzelteilen und Baugruppen, Dokumentation
- Anpassungskonstruktion:
Änderung von Teilbereichen durch direkte Geometrieänderung (auch innerhalb der Erzeugnishistorie des Bauteils), Änderung der Parameter, Varianten- und Neukonstruktion eines Teilbereiches
- Variantenkonstruktion:
Topologie unverändert, Parameteränderung in zuvor (Neukonstruktion) festgelegten Bereichen.

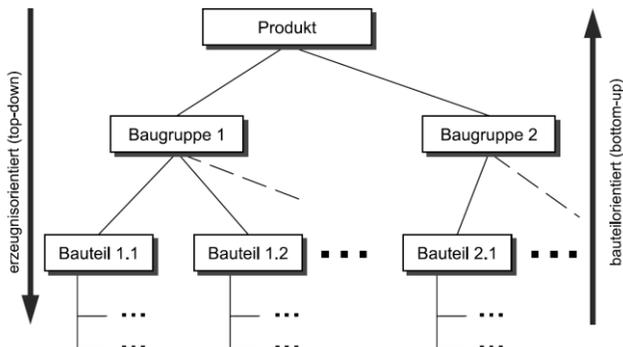


Bild 6.33: Top-down und bottom-up Ansatz für eine zweistufige Produktstruktur [VDI 2209]

Bild 6.33 und Tabelle 22 geben einen erläuternden Überblick über die o.a. Modellierungsmethoden.

Tabelle 22: Beispiele für CAD-Modellierungsstrategien und Ansätze [VDI 2209]

	Modell	Modellbildung
Modellierung „von außen nach innen“	komplexe Gesamtprodukte, Neukonstruktion, z.B. Gesamtfahrzeug	Bauteile mit besonderen Anforderungen an Design, Fertigung etc., z.B. Verkleidungsteile, (Guss-)Gehäuse, Blechteile Erstellung von Baukästen (z.B. Maschinen- und Anlagenbau)
Modellierung „von innen nach außen“	Funktionsbaugruppen, Neukonstruktion, z.B. Verbrennungsmotor, Getriebe Anwendung vorhandener Baukästen, z.B. Maschinen- und Anlagenbau	Funktionsbauteile mit besonderen physikalischen Anforderungen, z.B. strömungstechnische Bauteile

Vanja [VWB+09] fasst die Problematik betreffs top-down versus bottom-up treffen wie folgt zusammen: „Das bisher Gesagte [größtenteils die Ausführungen oben und Details aus [VDI 2209]], insbesondere für diejenigen parametrischen Systeme, welche die Abhängigkeiten entsprechend der Erzeugnisstruktur erfassen und abarbeiten, hat eigentlich zur Konsequenz, dass man die wesentlichen Steuerparameter und/oder Referenzelemente möglichst weit „oben“ in der Hierarchie verankern sollte, um bei Änderungen logische Fehler zu vermeiden. Es muss aber festgestellt werden, dass dieser Ansatz in der Praxis schnell Grenzen findet, weil zwischen der Definition der Parameter/Referenzen und ihrer tatsächlichen Nutzung auf „unterster“ Ebene auf allen Zwischenebenen für deren korrekte Weitergabe gesorgt werden muss (systemabhängig unter Umständen durch ein explizites Statement im Programm oder in der Chronologie). Dies wird bei komplexen – d. h. hier im Wesentlichen: in viele Ebenen der Erzeugnishierarchie gestaffelten Strukturen – schnell unübersichtlich und zudem dadurch erschwert, dass identische Bauteile oder Baugruppen oft in unterschiedliche Erzeugnisstrukturen eingebunden werden müssen (Mehrfach-/Wiederverwendung von Bauteilen/Baugruppen). Deshalb sollten die Erzeugnisstrukturen, besonders wenn sie eng an die Parametrikstrukturen gekoppelt sind, aus praktischen Erwägungen möglichst „flach“ gehalten werden. Notfalls kann man dies durch Einziehen definierter Zwischenebenen mit entsprechenden Konventionen bezüglich der (Parameter-) Schnittstellen erreichen.“

6.6.1.4 Externe CAD-Steuerung

Im Kontext des Knowledge-based Engineering ist die Kommunikation mit CAD-externen übergeordneten, verwaltenden und berechnenden Programmen eine Notwendigkeit. Dabei ist nicht der standardisierte Austausch von Geometriemodellen (wie etwas STEP oder IGES) Ziel, sondern die Beeinflussung des Konstruktionsprozesses von außen.

Neben der Kreation, Konfiguration und Manipulation von CAD-Modellen, die vorrangig bidirektional zu verstehen sind, kann auch eine monodirektionale extrahierende Richtung bedacht werden, um aus den Geometriemodellen Informationen zur Weiterverarbeitung in Analyseumgebungen zu extrahieren. Dies ist vor allem sinnvoll, wenn parametrische, ähnliche Varianten im CAD nicht mehr überblickt werden können.

An Schnittstellen stehen beispielsweise in PTC.Creo eine Reihe von Technologien zur Verfügung (Toolkit, Weblink, JLink) von denen die VB-API hier näher beschrieben wird, da sie das Rückgrat der Kommunikation der xKBE-Methodik mit dem CAD darstellt.

Ein API (application programming interface, [CCT14]) ermöglicht externem Code z.B. in VB, Java, Python, oder C++ direkte Interaktion mit Funktionen und Bibliotheken von Software (hier CAD). Die VB-API in Creo ermöglicht direkte Manipulation der CAD-Modelle mit dem nahezu vollen Umfang manueller Operationen im CAD direkt. Damit ist die VB-API die Basis für Knowledge-based Engineering und die Methode xKBE mit der entwickelten Software xKBE-app (siehe [P3], [P4]).

6.6.1.5 Qualitätssicherung und Standardisierung im CAD-Bereich

Durch die flächendeckende Verbreitung von 2D- und 3D-CAD-Systemen in der Konstruktion ist die Handzeichnung bis auf das Skizzenstadium weitestgehend verschwunden. Die darin eingebürgerten Qualitätsstandards sind nicht ohne weiteres auf CAD übertragbar, da die jeweilige Erstellungsmethodik naturgemäß unterschiedlich ist. Die Frage nach der Qualität von CAD-Modellen stellt sich je nach ihrem Verwendungszweck ganz unterschiedlich und ist umso bedeutender, je mehr Austausch mit der Geometrie – zwischen Domänen wie z.B. nach Bild 6.31, zwischen Konstrukteuren (als Personen) und zwischen CAD-Systemen- zu vollziehen ist. Wenn mit dem CAD nur eine Fertigungszeichnung einmalig erstellt werden soll wird man weniger Wert auf die geeignete Modellierungstechnologie und v.a. Konstruktionsmethode und ein qualitativvolles Modell (z.B. hinsichtlich Geometrielücken) legen. Solche „quick-and-dirty“ Lösungen sind durchaus verbreitet und entsprechend der Anforderungen und Verwendung auch gerechtfertigt. Will man aber in einem multidisziplinären Produktentwicklungsprozess über CAD-System-, Domänen-, und gar Firmengrenzen hinweg zusammenarbeiten, müssen einheitliche Qualitätsstandards und Richtlinien sowie konsistenter Einsatz der Konstruktionsmethoden für Standardisierung im CAD sorgen.

[RS12] trifft zur **Qualitätssicherung** folgende Aussage: „Zur Qualitätssicherung sind besonders bei Großunternehmen sog. Modelchecker im Einsatz, d. h. alle angelieferten 3D-Modelle der Zulieferer müssen eigens entwickelte Prüfprogramme durchlaufen, die den vorgegebenen Datenqualitätsstandard sicherstellen sollen. Teilweise dürfen einzelne Bauteile oder –gruppen höchstens zweimal eingereicht werden, ohne dass eine Lieferantensperre erfolgt. Dies führt bei den Zulieferern zu einem hohen zusätzlichen Aufwand. In anderen Industriezweigen und besonders bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sind solche Sicherungssysteme weitgehend unbekannt. Prüfprogramme, wie beispielsweise das Programm Model-CHECK des amerikanischen 3D-CAD-Programm Herstellers Parametric Technology Corporation (PTC), erkennen viele dieser Fehler und versuchen Hilfestellung bei der Behebung zu leisten. ...“

Unterschiedliche Toleranzvorgaben beim Generieren von Baugruppen aus Bauteilen durch den fehlerhaften oder unvollständigen Datenimport stellen ein weiteres Problem bei vielen Konstruktionen dar. Hier kommen zur Qualitätssicherung Digital-Mock-Up-Programme zum Einsatz. Digital-Mock-Up (DMU) ... repräsentiert hier v.a. die lagerichtige Geometrie eines Produktes.

Die aus unzureichender Modellierung entstehenden Folgekosten sind erheblich, so hat z.B. DaimlerChrysler im Jahr 2000 für seinen Pkw-Bereich Nachbesserungs- und Reparaturkosten von CAD-Daten in einer Größenordnung von mindestens 5 Millionen Euro ermittelt.“

Standardisierung in CAD wird von vielen Unternehmen gefordert, um die Qualität der zugelieferten CAD-Modelle zu vereinheitlichen. Neben der finalen Prüfung der zu liefernden CAD-Geometrie (s.o. unter Qualitätssicherung) werden Ansprüche an Bezugsэлеmente, Darstellungen, Beziehungen und Parameter, externe Referenzen und bezogene Modelle, Genauigkeit der Geometrie und Qualität der Zeichnungen definiert und überprüft.

Zur Problematik des Release-Wechsels von CAD-Software mit dem Aufwand generalstabsmäßiger Planung liefert die Quelle [RS12] Hinweise für die zeitliche Taktung der durchzuführenden Schritte.

6.6.1.6 Grenzen des CAD-Einsatzes nach [RS12]

„Ein DV-System kann nur Operationen durchführen, die mit einer eindeutigen Vorgehenslogik festlegbar, d. h. algorithmierbar sind. „Schöpferisch-kreative“ Arbeitsschritte, wie sie insbesondere beim Beurteilen und Auswählen von Lösungen aufgrund komplexer Anforderungsprofile erforderlich sind, können dem Rechner nicht übertragen, allenfalls von diesem im Dialogbetrieb unterstützt werden. Somit kann nur das bearbeitet werden, was an Daten, Datenstrukturen und operativen Anweisungen eingegeben wird bzw. in Form von Programmen und Daten vorliegt. Diese Feststellung schließt wissensbasierte Systeme mit ein, bei denen zwar rechnerinterne Entscheidungen getroffen werden, deren Grundlage aber auch gespeichertes Wissen, z.B. in Form von Entscheidungstabellen, ist.

Bei der Ersteingabe geometrischer Objekte ist in der Regel kein genereller Zeitvorteil gegenüber konventionellem Zeichnen gegeben, es sei denn, man kann die Möglichkeiten der Vervielfältigung von Teilen und Gruppen sowie die Anwendung von Norm- und Wiederholteilen in Form von Makros bzw. Features stärker nutzen. Die entscheidenden Vorteile graphischer Datenverarbeitung liegen dagegen in der vielfältigen Nutzung des gespeicherten rechnerinternen Geometrie- bzw. Produktmodells

- zur Variantenbildung,
- zum schnellen Anfertigen von Ansichten, Schnitten, Explosionszeichnungen, räumlichen Darstellungen und Teilzeichnungen einschließlich Bemaßungen bei Vorgabe unterschiedlicher Maßstäbe,
- zum Darstellen kinematischer Abläufe und Simulieren von Montagevorgängen,
- zum Anfertigen von Arbeitsplanungsunterlagen durch rechnerinterne Weitergabe der Konstruktionsdaten,

- sowie zur automatischen Ableitung von Steuerbefehlen für NC-Werkzeugmaschinen.

Hinsichtlich der Bearbeitung von Konstruktionsaufgaben unterschiedlichen Neuheitsgrades sind CAD-Systeme vor allem für *Variantenkonstruktionen* geeignet, bei denen alle Teile und Gruppen, ihr Größenbereich, ihre möglichen Kombinationen sowie die Berechnungs- und Verknüpfungslogiken bekannt bzw. vorab entwickelt sind, so dass im Auftragsfall die Konstruktionsarbeit in einem festen Algorithmus mit bekannten Daten durchgeführt werden kann.

Auch bei *Anpassungskonstruktionen*, bei denen Konzept und genereller Entwurf vorliegen, können die kundenseitigen Anforderungen durch gestaltende und berechnende Anpassungen rechnerunterstützt durchgeführt werden, wenn das die rechnerintern gespeicherten Geometrie- bzw. Produktmodelle und Berechnungsalgorithmen zulassen.

Bei *Neukonstruktionen* wird dagegen auch künftig der Anteil konventioneller Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten noch recht hoch bleiben, da die Konzipierungsschritte weitgehend die Kreativität des Konstrukteurs erfordern.

Schwerpunkte der nichtgraphischen Datenverarbeitung sind die Anwendung vielfältiger Berechnungs- und Optimierungsprogramme sowie die Bereitstellung von Konstruktionsdaten, insbesondere auch von Normen und Vorschriften, mit Hilfe von Datenbanksystemen. Da der zeitliche Anteil und die Häufigkeit der konventionellen Informationsbeschaffung am Konstruktionsprozess recht hoch ist, hat diese Datenbereitstellung eine große Bedeutung für die Rationalisierung des Konstruktionsprozesses und für den Abbau von Störeffekten beim Konstruieren. Hinzu kommen die Möglichkeiten einer für das gesamte Unternehmen integrierten Datenverarbeitung (CIM), natürlich unter Einbeziehung auch der Geometriedaten.

Ein rechnerinternes Produktmodell ist auch Voraussetzung für eine parallele Bearbeitung beim Produktentstehungsprozess (Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering).“

6.6.2 CAE

CAE-Einsatz ist für die Technische Logistik vor allem der Mechanik-Simulations-Bereich des CAx (nach Bild 6.27) und mit seinen Werkzeugen, nur spärlich vertreten (Bild 6.29) und dokumentiert.

Die Arten des CAE sind den Ausführungen zu CAx oben zu entnehmen. CAx-Prozessketten sind Teil der virtuellen Produktentwicklung und als solche in Kap. 6.10.2.1 für die Technische Logistik ausgewählt und angegeben. Details der Modellbildung und Simulation mit CAE-Werkzeugen der MKS und FEM sind in den Abschnitten 6.8 und 6.7 einzusehen. Die Rolle der CAE-Simulation im Produktentwicklungsprozess ist in Abschnitt 6.10 dargestellt.

6.7 Grundlagen zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit FEM³⁰⁰

Nach [VWB+09] gehört die Finite-Elemente-Methode zu den wichtigsten numerischen Rechenverfahren des Ingenieurwesens. Sie wurde ursprünglich zur Lösung von physikalisch basierten, mathematischen Modellen für Spannungs- und Verformungsprobleme in der Strukturmechanik entwickelt, um die darin aufgestellten partiellen Differentialgleichungen numerisch zu lösen. In Bereichen komplexer Bauteilgeometrien, die analytische Lösungen nicht zulassen, liefern die so erhaltenen Ergebnisse realitätsnahe Näherungen an die exakten Lösungen, welche in ihrer Genauigkeit durch verschiedene Ansätze in der Modellierung erhöht werden können. Sehr bald schon wurde die FEM auf das gesamte Anwendungsgebiet der Kontinuumsmechanik ausgedehnt.

Durch die Möglichkeiten leistungsfähiger Rechner und einem breiten Angebot anforderungsspezifischer Simulations-Software konnten in den letzten Jahren die Kosten für die Beschaffung, Wartung und den Einsatz von FEM drastisch reduziert werden. Dadurch sind viele Bereiche der modernen Produktentwicklung heute durch umfangreiche Erkenntnisse aus FEM-Simulationen gestützt. In Verbindung mit moderner CAD Software im CAx oder CAD-basierten FEM hat die rechnergestützte FEM somit eine deutliche Rationalisierung der nötigen Ressourcen der Produktentwicklung bei gleichzeitig steigenden qualitativen Ergebnissen bewirkt und ist damit aus dem ingenieurwissenschaftlichen Alltag nicht mehr wegzudenken. Es ist jedoch zu betonen, dass das Vorhandensein leistungsfähiger Software nicht zwangsläufig zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen führt. Fundierte Kenntnisse der zugrundeliegenden Theorie, sowie die Fähigkeit die Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen, sind absolute Voraussetzungen seriöser Simulationsergebnisse. Obwohl zum Gebiet der FEM umfangreiche Fachliteratur existiert (z.B.: [BAT02], [KLE05], [KRE12], [STE04b]) muss den Ingenieuren ein Mindesteinblick in die begründende Theorie gegeben werden, was Ziel dieses Abschnittes und der Lehrveranstaltung CAE an der TU Graz, ergänzend zu den facheinschlägigen Veranstaltungen, ist (Vergleiche dazu auch die Anforderungen an das Systemverständnis des simulierenden Ingenieurs in Kap. 6.5.1).

Einblick in den Einsatz von FEM zur Entwicklung neuer Gewerke der Technischen Logistik bietet beispielsweise [P10] mit dem modularen Ladehilfsmittel M-Box. Die Möglichkeiten mit FEM in Kombination von Strukturmechanik und Dynamik schildert [P8].

6.7.1 Die Idee der Finiten Elemente Methode

Die Grundidee der Finiten Elemente Methode ist es, ein reales System mit unendlich vielen Massenpunkten – ein Kontinuum – in ein diskretes System überzuführen. Dieses diskrete System besteht in der Folge aus einer endlichen

³⁰⁰ Dank an die Unterstützung der Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meine Kollegen Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Wolfschluckner und BSc. Christian Possegger im Rahmen der Neuerstellung der Vorlesungs-Übung „CAE“ 309.031 ab dem WS 2013/14 an der TU Graz.

Anzahl finiter (lat. ‚beendet‘, ‚bestimmt‘) Elemente und stellt somit ein Modell der Wirklichkeit dar. Analytisch nicht mehr berechenbare Bauteile lassen sich dadurch näherungsweise in verschiedenen Anwendungsgebieten unterschiedlicher Ingenieursdisziplinen diskretisieren und berechnen.

In der rechnergestützten FEM ist es die größte Herausforderung des Ingenieurs ein Modell zu generieren, welches – je nach Anwendungsfall – ausreichend realitätsnahe Ergebnisse liefert. Im Hinblick auf möglicherweise sehr hohe Rechenzeiten sollte jedoch stets der generelle Grundsatz gelten: „So einfach wie möglich, so genau wie nötig“. Die Abwägung, welche Detailliertheit des Modells hinreichend genaue Ergebnisse liefert, bedarf jedoch viel Praxiserfahrung und ein fundiertes Grundwissen der theoretischen Hintergründe.

Nach der Modell-Erstellung durch den Ingenieur berechnet die Software mehr oder weniger selbstständig die gefragten Auswirkungen auf das System und liefert zu dem Modell passende Ergebnisse. Der Ingenieur ist wieder selbst gefragt, wenn es zur unerlässlichen Plausibilitätsprüfung der gelieferten Ergebnisse kommt. Durch viel Erfahrung auf dem Gebiet der FEM, Überschlagsrechnungen und Sachverstand lassen sich die Ergebnisse qualitativ überprüfen (s. auch Kap. 6.5.1 und 6.9). Bei ungenügend genauen oder unrealistischen Ausgaben, muss das Modell dementsprechend überdacht und angepasst werden – der Berechnungsprozess ist somit iterativ.

6.7.2 Anwendungsgebiete und Software-Angebot

Die wichtigsten FEM-Aufgaben im Maschinenbau befassen sich meist mit folgenden Themengebieten [SC11]:

- **Strukturmechanische Festigkeitsberechnungen:**
Diese Berechnungen können sowohl für statische als auch für dynamische Problemstellungen erfolgen. Grundsätzlich werden im Modell entweder Lasten aufgebracht, aufgrund derer anschließend Spannungen bzw. Deformationen berechnet werden, oder vice versa. Weiters kann die Berechnung linear oder nichtlinear erfolgen – dies hängt von Faktoren wie Geometrie, Material und Randbedingungen ab.
- **Temperaturfeld – Probleme:**
Wärmeleitung und Wärmeübergang bilden die Kernprobleme in diesem Gebiet. Auch hier werden lineare und nichtlineare Berechnungsmethoden je nach Art der Problemstellung unterschieden. So berücksichtigt die nichtlineare Berechnung beispielsweise temperaturabhängige Wärmeleitzahlen.
- **Schwingungsberechnungen:**
Im Bereich der Schwingungsanalyse von Bauteilen ist es meist von großer Bedeutung die zum Bauteil gehörenden Eigenfrequenzen und Eigenformen zu bestimmen.

Aufgrund der wachsenden Bedeutung der Finiten Elemente Methode in der Produktentwicklung ist in den vergangenen Jahren ein großes Angebot an kommerzieller FE-Software entstanden. Diese Software-Werkzeuge haben teilweise unterschiedliche Schwerpunkte innerhalb der Ingenieurwissenschaften.

Tabelle 23 gibt einen kurzen Überblick über die Funktionalitäten gängiger kommerzieller FEM-Softwareprodukte und vergleicht deren Anwendungsgebiete. Die Quelle [BEN04] führt dabei für das Produkt MSC.ADAMS nicht weiter aus, dass es sich dabei eigentlich um ein MKS-Softwareprodukt handelt, das lediglich über die Funktionalität flexibler Körper für FEM-Analyse geeignet ist. Auch sind einige „k.A.“ Angaben so nicht zu bestätigen. Für die Produkte MSC.ADAMS und Pro/Mechanica können alle k.A.-Angaben in den Rubriken Berechnungsoptionen und Materialeigenschaften durch ein „-“ ersetzt werden. Der Zitation wegen ist die Tabelle aber darum nicht korrigiert.

Tabelle 23: „FEM-Programme für spezielle Anwendungen, vgl. [BEN04]“

	ANSYS [ANS12]	MSC. ADAMS [MSC10]	Pro/Mecha nica (Creo) [PTC13]
Berechnungsoptionen			
Festigkeitsanalyse statisch	•	•	•
Explizite Dynamik	–	•	–
Stabilitätsanalyse	•	•	•
Frequenzanalyse	•	•	•
Lebensdaueranalyse	•	•	•
Magnetfelder	•	–	–
Temperaturfelder	•	k.A.	•
Strömung	•	k.A.	k.A
Akustik	•	k.A.	k.A
Optimierung	•	•	•
Kontakteinfluss	•	•	•
Materialeigenschaften			
Plastizität	•	k.A.	k.A.
Kriechverhalten	•	k.A.	k.A.
Viscoelastizität/-plastizität	•	k.A.	k.A.
Verbundwerkstoffe	•	k.A.	k.A.
Schnittstelle			
CATIA	•	•	•
PTC Creo	•	–	•
I-DEAS	k.A.	–	–
SolidWorks	•	–	–
Einsatzgebiete	universell	Bewegungs- simulation	Dynamik, Lebensdauer

6.7.3 Begriffe

Zum Einstieg in die Finite Elemente Methode ist es wichtig, sich zuerst mit einigen Begriffsdefinitionen zu befassen. Ein paar der grundlegenden Begriffe werden im Folgenden kurz erklärt [SC11].

6.7.3.1 Processing

- Pre-Processor

Mit Hilfe des Pre-Processors wird die Geometrie des zu untersuchenden CAD-Modelles für die spätere Berechnung aufbereitet. Dazu wird ein FE-Netz – bestehend aus den Elementen und Knoten – aufgebaut. Auf die unterschiedlichen Elementtypen wird später noch genauer eingegangen. Dieses FE-Netz aus der realen Geometrie ist nun der Grundbaustein der FEM und wird Diskretisierung genannt. Je nach Anwendungsgebiet und Komplexität kann das Vernetzen entweder automatisch durch die Software erfolgen, oder aber durch manuelle Bedienung des Ingenieurs. In jedem Falle ist darauf zu achten, dass an kritischen Stellen eine ausreichend feine Vernetzung mit dem passenden Elementtyp vorhanden ist.

Als nächsten Schritt gilt es die vorliegenden Lasten und Randbedingungen am Modell anzubringen. Als Lasten kommen unter anderem Kräfte, Momente, Temperaturen oder Beschleunigungen zum Einsatz, wogegen die Randbedingungen etwaige Symmetrien und Lagerungen des Modells beschreiben. Durch die Angabe der Werkstoffkennwerte wird das Pre-Processing beendet.

- Solver

Der Solver ist der Kern der FE-Software, da er das durch die Vernetzung und das Aufbringen der Lasten bzw. Randbedingungen entstandene Gleichungssystem nach den Verschiebungen auflöst. Durch diese Verschiebungen können dann in einer Rückrechnung die vorliegenden Spannungen, Dehnungen und Reaktionskräfte bestimmt werden.

- Post-Processor

Die durch den Solver erhaltenen Zahlenwerte werden nun durch den Post-Processor in der Regel grafisch ausgewertet und somit veranschaulicht. So lassen sich beispielsweise das verformte Netz darstellen, Spannungsspitzen erkennen oder weitere Analysen (z.B.: Strukturoptimierung durch Wegfallen wenig beanspruchter Bereiche) durchführen.

Bild 6.34 zeigt exemplarisch die Möglichkeiten mit dem Einsatz von FEM verbunden mit Strukturoptimierungsverfahren, wie der Topologieoptimierung. Durch schrittweises Abtragen nicht gleich beanspruchter Materialbereiche wird eine Vergleichmäßigung der Ausnutzung der Tragfähigkeit des Werkstoffes erreicht. Die verbleibenden Spannungsspitzen können in weiteren Optimierungsschritten, z.B. durch bionische Prinzipien (s. dazu [NAC10]), wie der krümmungsstetigen Gestaltung von Übergängen, noch weiter reduziert werden.

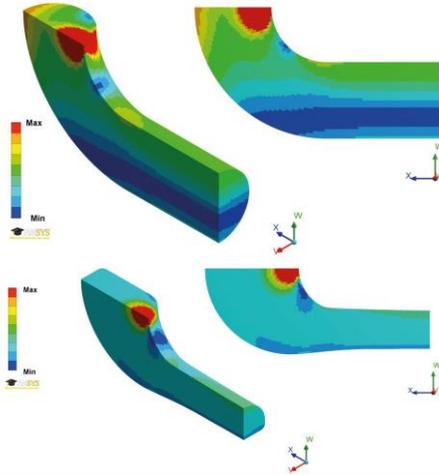
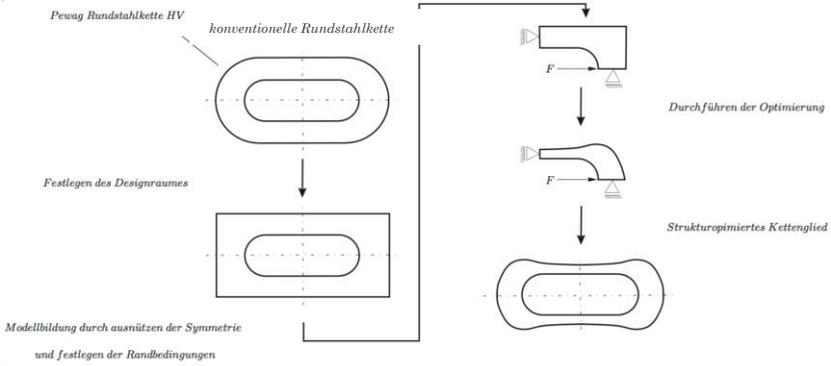


Bild 6.34: Prozess und Vergleichsspannungsergebnisse einer einfachen Topologieoptimierung mit bionischen Leichtbauprinzipien an einem Rundstahlkettenglied 9 x 27mm

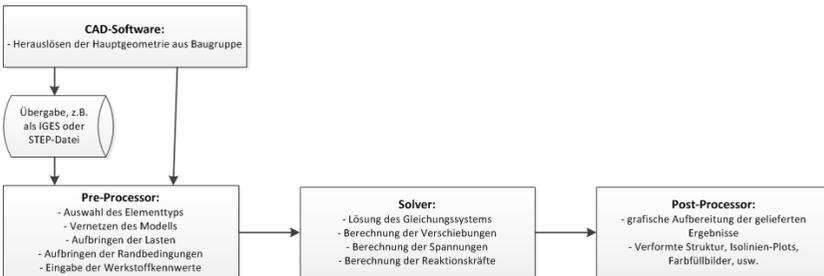


Bild 6.35: Arbeitsschritte der FE-Software

Bild 6.35 fasst die einzelnen Arbeitsschritte der Software zusammen. Für die Arbeitsweise mit und den Einsatz eines FEM-Systems in der Produktentwicklung

sei auch auf die CAx-Prozessketten in Abschnitt 6.10.2 und im Speziellen auf Bild 6.73 verwiesen.

6.7.3.2 Freiheitsgrade

Ein im Raum frei beweglicher Körper hat insgesamt 6 Freiheitsgrade: 3 translatorische (x -, y -, z -Richtung) und 3 rotatorische (x -, y -, z -Achse). Wenn man diesem Körper jedoch eine Randbedingung auferlegt – etwa die Bindung an die xy -Ebene – so besitzt er nur noch 3 Freiheitsgrade (Translation in x -, y -Richtung und Rotation um die z -Achse).

Diese Überlegungen lassen sich auch auf die Knoten, welche die Bindeglieder zwischen den Elementen darstellen, übertragen. Die Freiheitsgrade am Knoten legen somit fest, in welche Richtungen Verschiebungen – und in weiterer Folge Spannungen und Dehnungen – berechnet werden können. Durch die Freiheitsgrad-Definitionen an den Knoten lassen sich daher die erforderlichen Lagerstellen definieren. Wie bei dem im Raum frei beweglichen Körper lassen sich bei Knoten bis zu 6 Freiheitsgrade festlegen (Bild 6.36).

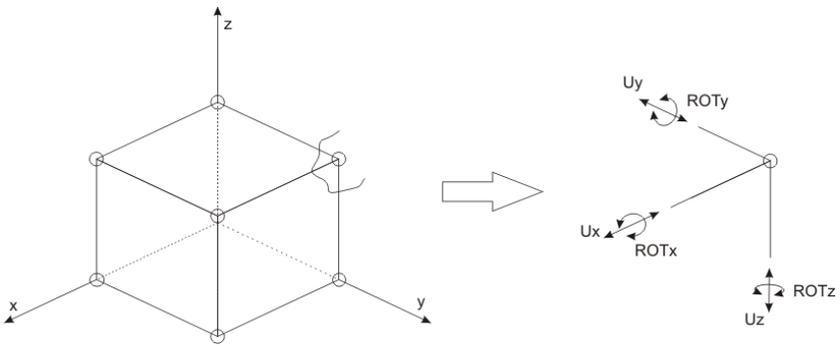


Bild 6.36: Freiheitsgrade im Knoten [SC11]

Dieses Maximum von 6 Freiheitsgraden pro Knoten kann jedoch nur bei 3D-Elementen auftreten. Meistens wird es jedoch auch hier so gehandhabt, dass der Knotenpunkt nur translatorische Freiheitsgrade hat und die Drehung daher ein Resultat der Verschiebung anderer Knotenpunkte ist. Die tatsächliche Anzahl der Freiheitsgrade pro Knoten hängt stets vom gewählten Elementtyp ab, was in einem späteren Abschnitt noch näher erläutert wird.

6.7.3.3 Diskretisierung

Der Grundgedanke der Finiten Elemente Methode liegt darin, dass das reale Bauteil – das Kontinuum – in einzelne Teilgebiete (Elemente) unterteilt wird und dadurch numerisch berechenbar wird. Dieser Vorgang wird Diskretisierung genannt und findet in der rechnergestützten FEM im Pre-Processor der Software statt.

In manchen Fällen ist die Art der Diskretisierung bereits durch das Real-System sehr naheliegend (z.B. Diskretisierung von Fachwerken durch Stabelemente), in anderen Fällen kommt es stark auf die Erfahrung des bedienenden Ingenieurs an, da unterschiedlich belastete Bereiche unterschiedlich fein diskretisiert werden müssen um brauchbare Ergebnisse zu erzielen. In wichtigen Bereichen erhält man durch genügend feine Diskretisierung eine gute Annäherung an das Grundgebiet. Dies wird in Bild 6.37 durch die Diskretisierung eines Kreissegmentes beispielhaft illustriert.

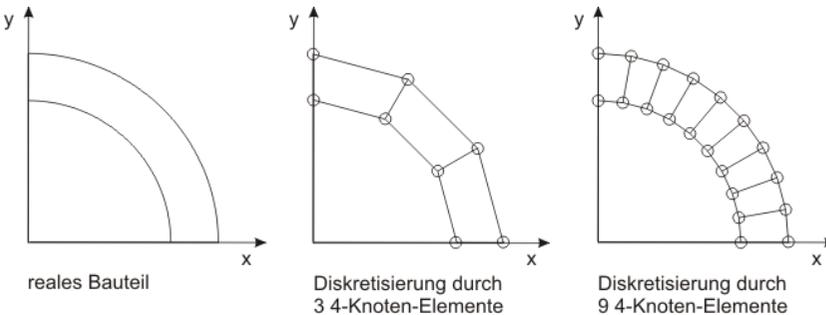


Bild 6.37: Diskretisierung eines Kreissegmentes [SC11]

Durch die Annäherung der realen Kreiskontur durch Elemente wird das Beispiel rechnergestützt handhabbar. Die Anzahl der Elemente spielt dabei eine tragende Rolle. Wie oben ersichtlich, wird die Kontur durch Verwendung von nur 3 Elementen sehr grob angenähert. Die Erhöhung der Element-Anzahl dagegen bringt eine merkbare Verbesserung des Abstraktionsergebnisses, gleichzeitig steigen jedoch die Rechenanforderungen an das Computersystem.

Für jede Problemstellung können meist verschiedene Elementtypen verwendet werden. So kann beispielsweise eine rechteckige Platte entweder durch Rechteck- oder Dreieckelemente gleichermaßen angenähert werden. Weiters ist die Wahl der Ansatzfunktion der jeweiligen Elemente ein entscheidendes Kriterium für realistische Ergebnisse.

So ist je nach Anforderung zu entscheiden, ob Elemente mit linearer (3 bzw. 4 Knoten) oder quadratischer Ansatzfunktion (6 bzw. 8 Knoten) gewählt werden müssen (Bild 6.38). Diese Entscheidung beeinflusst direkt die nötige Anzahl an Elementen. Bezugnehmend auf das Beispiel mit dem Kreissegment kann durch einen quadratischen Ansatz der Elemente mit einer geringen Element-Anzahl ein Modell entworfen werden, welches – obwohl bereits deutliche Abweichungen von der ursprünglichen Kreisgeometrie bestehen – einem Modell mit mehreren Elementen und linearer Ansatzfunktion ebenbürtig ist.

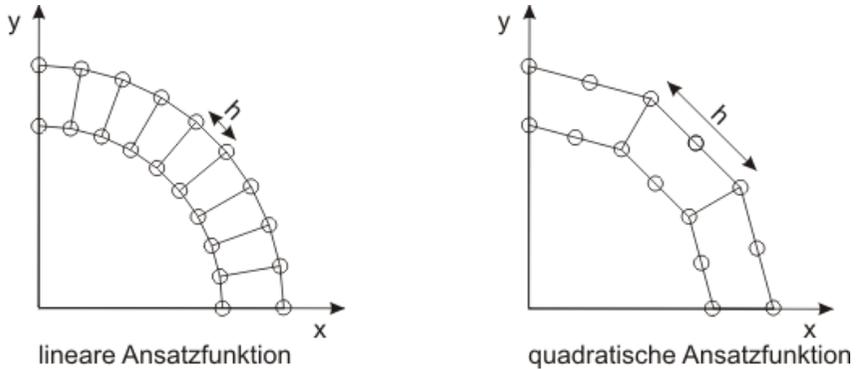


Bild 6.38: Lineare und quadratische Ansatzfunktion [SC11]

Die Feinheit der Vernetzung wird einerseits bestimmt durch die gewünschte Genauigkeit, andererseits durch geometrische Vorgaben. Der Entstehung von Spannungsspitzen – etwa bei Querschnittsänderungen (Bild 6.38) – muss durch eine lokale Verfeinerung des Netzes begegnet werden, damit unrealistische Ergebnisse vermieden werden können.

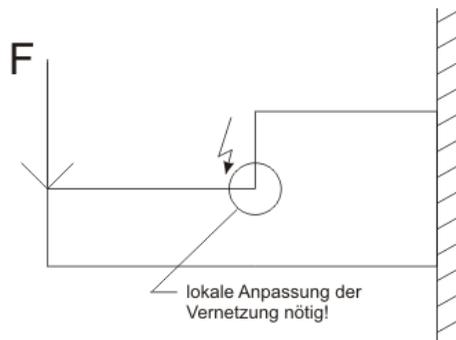


Bild 6.39: Anpassung des FE-Netzes [SC11]

Generell gibt es hierfür zwei verschiedene **Ansätze**:

- **h-Methode:**
Diese Methode beruht auf einer Verkürzung der Elementkantenlänge h und der dadurch erhöhten Elementanzahl. Die resultierende Netzverfeinerung bedingt genauere Ergebnisse und ist eine gute Möglichkeit um an kritischen Stellen gute Lösungen zu erhalten. Durch die Anwendung der h-Methode steigt die Anzahl der Elemente und Knoten, die Elementansätze und Knotenfreiheitsgrade verändern sich jedoch nicht.

- p-Methode:
Die p-Methode beruht nicht auf einer Erhöhung der Element- bzw. Knotenanzahl, sondern bedient sich einer Erhöhung der Ansatzfunktionen um weitere Polynomanteile. Dies geschieht durch eine Erhöhung der Knotenfreiheitsgrade, die Anzahl der Elemente und Knoten bleibt jedoch konstant.

6.7.3.4 Idealisierung

Um ein brauchbares Modell für die Berechnung zu erhalten, ist es zuerst notwendig die vorgegebene Problemstellung auf das Wesentliche zu reduzieren. Dadurch kommt es zu teilweise genaueren Abstraktionen, teilweise genügt es aber auch unwesentliche Bereiche nur grob abzubilden oder auch ganz wegzulassen. Um diese Aufgabe zufriedenstellend lösen zu können, muss der Ingenieur über ein gutes Einschätzungsvermögen der Problemstellung verfügen und die vorliegenden Belastungsfälle und deren Auswirkungen am Bauteil analysieren können. Es ist dabei klar zu definieren, was das grundlegende Ziel der FE-Berechnung sein soll. Erst dann kann eine seriöse Idealisierung des realen Systems erfolgen.

Bei der Idealisierung spielen viele verschiedene Faktoren eine Rolle. So müssen beispielsweise Überlegungen bezüglich Elementtyp, Materialeigenschaften und Randbedingungen angestellt werden. Weiters sollte in Betracht gezogen werden, ob die Systemantwort auch nichtlinear ausfallen könnte. Vielfach empfiehlt sich das Anfertigen von Skizzen für die abstrahierte Geometrie und deren Randbedingungen um zu einer besseren Vorstellung des Gesamtsystems zu gelangen.

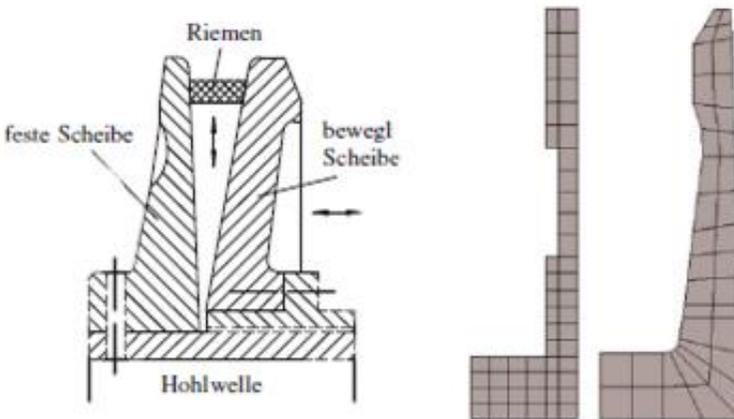


Bild 6.40: Idealisierung eines Riementriebes [SC11]

Vielfach hat es sich auch schon als vorteilhaft erwiesen, die Hauptberechnung durch das Durchführen von Pilotstudien an vereinfachten Modellen zu unterstützen. Dadurch lässt sich die Plausibilität der Ergebnisse gut abschätzen und es kann nötigenfalls auf Fehler reagiert werden.

Die Idealisierung (Bild 6.40) stellt den anspruchsvollsten Teil in der FE-Prozesskette dar und sollte daher keinesfalls überhastet werden. Die Abstraktion ist dabei stets kritisch zu hinterfragen.

Einige Grundregeln sind bei der Idealisierung realer Systeme stets zu beachten:

- Unterscheidung globaler und lokaler Effekte
Die Größenordnungen von Bauteilen und auftretenden Lasten sind stets zueinander in Relation zu setzen. Dies wird bei Betrachtung eines Beispiels deutlich: Ein rechteckiges Blech von 2x2m wird durch eine äußere Last (5x5cm), welche mittig an der Platte angreift, beansprucht. Aufgrund der Abmessungen kann die Krafteinleitung an einem Knoten abgebildet werden. Diese Idealisierung ist dann dafür geeignet, die Spannungsverläufe großflächig in der Stahlplatte zu bestimmen, jedoch nicht um Aussagen über die Zustände im unmittelbaren Umfeld der Krafteinleitung zu machen. Auch eine Verfeinerung der Netzstruktur ist hier nicht zielführend. Wenn zusätzlich zur großflächigen Untersuchung des Systems noch eine realistische Betrachtung in der Nähe der Belastung getroffen werden soll, muss die Krafteinleitung am Modell durch eine Lastverteilung über eine endlich große Fläche – NICHT an einem Punkt – erfolgen.
- 3D-Modelle sind nicht immer notwendig
Je komplexer die Modelle, desto schwieriger wird deren numerische Berechnung. Darum sollte bei der Idealisierung auch verstärkt Augenmerk darauf gelegt werden, Einsparungsmöglichkeiten im 3D-Bereich wahrzunehmen. Selbst wenn eine dreidimensionale Betrachtung notwendig ist, kann durch das Verwenden von Schalenelementen an Stelle von Volumenelementen viel Zeit gespart werden – Beispiel Wärmeleitung in Platten.

Rotationssymmetrische Bauteile, wie sie im Maschinenbau häufig anzutreffen sind, können in der FE-Berechnung problemlos auf 2D Modelle reduziert werden, wenn auch die Belastungen rotationssymmetrisch auftreten.
- Ausnutzen von Symmetrien
Durch das Ausnutzen von Bauteilsymmetrien kann viel unnötige Rechenleistung eingespart werden.

6.7.3.5 Materialverhalten

Bei der FE-Berechnung muss stets auch die Möglichkeit unterschiedlichen Materialverhaltens beachtet werden:

- linear – elastisch: es gilt das Hook'sche Gesetz; E-Modul ist konstant
- Nichtlinear– elastisch: Quotient aus Kraft und Dehnung ist nicht konstant (E-Modul ist nicht konstant); z.B. bei Elastomeren
- Elastisch-plastisch: Bis zur Fließgrenze: linear elastisch; Weitere Krafteinwirkung: plastisches Materialgesetz
- Starr plastisch: Die elastische Formänderung ist gegenüber der plastischen Formänderung sehr gering (z.B. Kaltumformung)
- Kriechend: Formänderung = $f(t)$

6.7.3.6 Stationärer und transientser Zustand

Die Systemantwort ist beim stationären Zustand der Problemstellung keine Funktion der Zeit. Diese tritt daher auch in den Differentialgleichungen nicht als Variable auf. Im Gegensatz dazu kann auch ein transienter (=instationärer) Zustand beschrieben werden. Kinetische Probleme oder die Untersuchung von Strömungsvorgängen (Ausbreitungsprobleme) sind klassische transiente Problemstellungen.

6.7.4 Element-Beschreibung

Das Grundprinzip, das Kontinuum in viele kleine Teilbereiche zu zerlegen, resultierte in der Entwicklung unterschiedlicher Elementtypen (Bild 6.41). Je nach Problemstellung muss somit das am besten geeignete Element für die Berechnung ausgewählt werden.

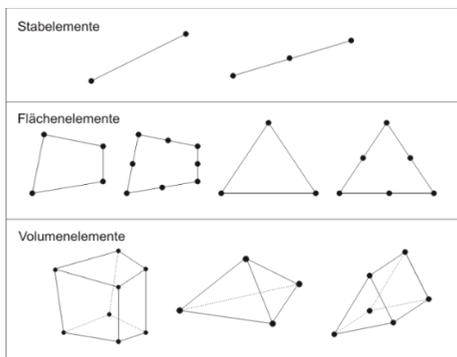


Bild 6.41: Unterschiedliche Elementtypen [SC11]

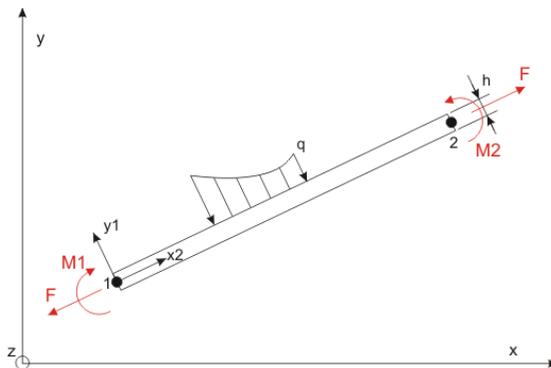
Tabelle 24 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften grundlegender Elemente wieder.

Tabelle 24: Elementtypen und deren Eigenschaften [SC11]

Dimen- sion	Ele- ment	Beschreibung
1D	Stab	Übertragen werden Zug-Druck-Kräfte, aber keine Biegung. Im optimalen Fall wird das Stabelement für Fachwerkstrukturen eingesetzt, da hier die Modellierung sehr gut der tatsächlichen Realität entspricht. <i>2 Freiheitsgrade: Verschiebungen in x und y Richtung. 1-achsiger Spannungszustand.</i>
	Balken	Das Balkenelement kann zusätzlich Biegeverformungen abbilden. <i>3 Freiheitsgrade: Verschiebung in x und y Richtung + Drehung um z-Achse.</i>
2D	Scheibe	Das Scheibenelement wird für ebene Problemstellungen verwendet. Es kann nur Belastungen in der Ebene aufnehmen. Durch die Reduktion von rotationssymmetrischen Bauteilen auf zweidimensionale Modelle können so auch dreidimensionale Bauteile in der Ebene untersucht werden. <i>2 Freiheitsgrade: Verschiebungen in x und y Richtung. 2-achsiger Spannungszustand.</i>
3D	Schale	Gekrümmtes Element, welches Körper mit geringer Dicke im Vergleich zu den anderen Abmessungen darstellen kann.
	Volumen- element	Das Volumenelement kann prinzipiell alle Beanspruchungen abbilden.

6.7.4.1 Balkenelement

Bei diesem Element (Bild 6.42) handelt es sich um ein ebenes Balkenelement. Es besitzt zwei Knoten (1 und 2) mit jeweils 3 Freiheitsgraden (Verschiebung in x- und y- Richtung, Rotation um z-Achse).

**Bild 6.42:** Balkenelement [SC11]

Im Gegensatz zum Stabelement kann dieses Element neben Zug- und Druck-Belastungen auch Biegebelastungen darstellen. Das elementeigene Koordinatensystem wird dabei so gewählt, dass die Richtung von x_2 über die Verbindung von Knoten 1 & 2 definiert wird. Um die beschriebenen Lastfälle (Druck, Zug, Biegung) darstellen zu können, müssen dem Element selbstverständlich gewisse Eigenschaften und Werte zugewiesen werden. Dazu zählen die Fläche A , Höhe h , Flächenträgheitsmoment I_{zz} , E-Modul, Streckenlasten q usw.

Im Solver werden dann die Berechnungen ausgeführt und die Knotenkräfte, Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen, Schnittkräfte und Momente bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse werden dann je nach Anwendung im Post-Processor (grafisch) aufbereitet ausgegeben.

6.7.4.2 Scheibenelement

Die ebene Scheibe (Bild 6.43) lässt sich gut verwenden, wenn ein rotationssymmetrisches Bauteil mit rotationssymmetrischer Beanspruchung untersucht werden soll. Das unten abgebildete Scheiben-Element besitzt 3 Knoten mit jeweils 2 Freiheitsgraden (Verschiebung in x - und y -Richtung). Neben diesem Dreieckselement wäre es auch möglich ein 4-Knoten-Element zu verwenden.

Mithilfe eines ebenen Scheibenelements lassen sich ebene Spannungszustände (ESZ) und ebene Dehnungszustände darstellen. Das Element ist dünnwandig (Dickenausmaß ist viel geringer als die beiden anderen Längenausmaßungen) und wird in dessen Mittelebene belastet. Beim ESZ muss die Dicke der Scheibe in z -Richtung angegeben werden. Auch hier werden vom Solver wieder die Knotenkräfte, Knotenverschiebungen, Spannungen und Dehnungen berechnet.

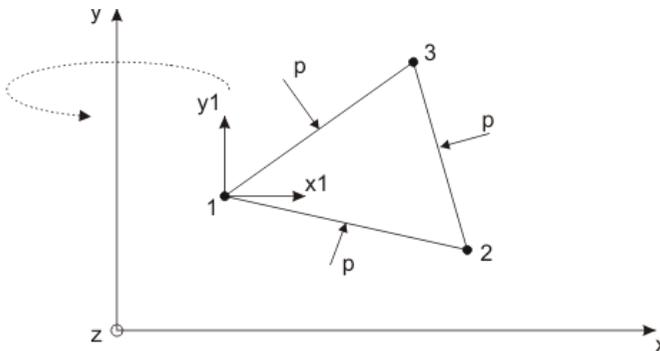


Bild 6.43: Scheibenelement [SC11]

6.7.4.3 3D-Volumenelement

Weiters sei noch das allgemeine Volumenelement angesprochen (Bild 6.44). Dieses besitzt 8 Knoten mit jeweils 3 Freiheitsgraden (Verschiebung in x -, y - und

z-Richtung, Die Verdrehung ist dabei ein Resultat der Verschiebung von Knoten). Es sind alle Belastungsfälle darstellbar und somit auch der dreidimensionale Spannungs- und Dehnungszustand.

Als Eingabemöglichkeiten können Drücke (Oberflächenlasten) auf die Element-Flächen, Temperaturen an den Knotenpunkten und Materialeigenschaften angeführt werden. (Quelle: Schier)

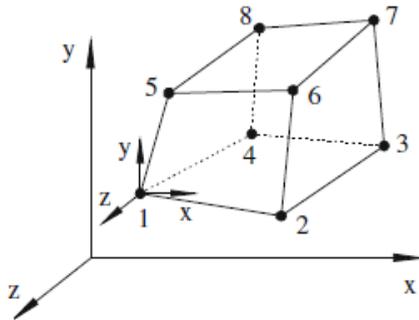


Bild 6.44: Volumenelement [SC11]

6.7.4.4 Vernetzungs-Alternativen

Der Übergang vom CAD-Modell zum vernetzten FE-Modell kann nun, wie bereits angesprochen, auf verschiedene Arten erfolgen. Je nach Wahl des Elementtyps entsteht ein anderes Berechnungsmodell mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen. Dies soll an folgendem Beispiel kurz aufgezeigt werden (nach [SC11]).

Betrachtet wird ein einseitig eingespannter Zug-/Druck-Stab (Bild 6.45). Die Mantellinie wird dabei durch eine stetige Funktion beschrieben. Am freien Ende greift mittig eine Zugkraft an.

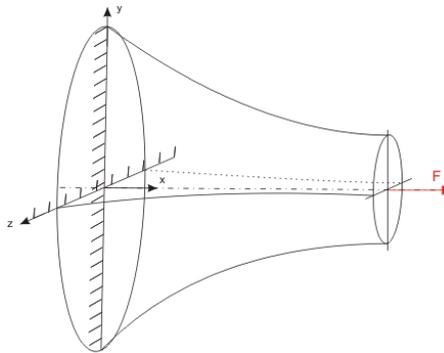


Bild 6.45: Einseitig eingespannter Zug-/Druck-Stab [SC11]

Dieses Bauteil kann, je nach Anforderung an die Ergebnistiefe, prinzipiell durch 3 verschiedene Methoden modelliert werden (Bild 6.46):

- **Modellbildung mit Stabelementen**
Durch die lineare Aneinanderreihung von Stabelementen unterschiedlicher Querschnittsflächen kann die Mantellinie angenähert werden. Schnelle Rechenzeiten stehen starker Vereinfachung gegenüber.
- **Modellbildung mit Scheibenelementen**
Die Rotationssymmetrie von Bauteil, Kraftangriff und Randbedingungen ermöglicht eine effiziente Verwendung von Scheibenelementen.
- **Modellbildung mit Volumenelementen**
Selbstverständlich können hier auch Volumenelemente verwendet werden. Die Rechenzeiten sind somit jedoch am längsten.

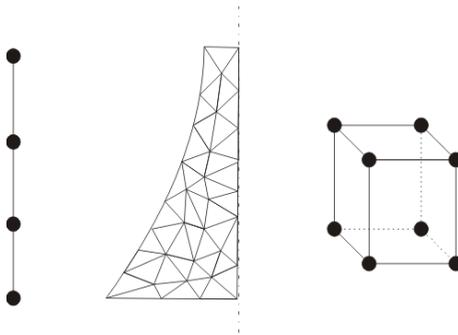


Bild 6.46: Modellierung mittels Stab-, Scheiben- und Volumenelementen [SC11]

6.7.5 FEM – Theorie

Wie bereits angesprochen, kann die Finite Elemente Methode auch rechnergestützt nur sinnvoll angewendet werden, wenn dem Ingenieur die theoretischen Grundlagen bekannt sind und er somit Ursache und Wirkung der Rechenoperationen einschätzen kann. Folgend soll ein kurzer Einblick in diese grundlegende Theorie gegeben werden [CEL98].

6.7.5.1 Grundlagen

Ausgangspunkt sollen die Zusammenhänge zwischen Verformungen $u_i (i = x, y, z)$, Spannungen $\tau_{ij} (i, j = x, y, z)$ und Verzerrungen $\varepsilon_{ij} (i, j = x, y, z)$ bilden, welche bereits aus der Festigkeitslehre bekannt sind. Wenn die Berechnung der Verformungen und Spannungen in jedem Punkt des Bauteils abgeschlossen ist, ist die Aufgabe als gelöst zu betrachten. Für die völlige Beschreibung der

Verformung von Bauteilen ist es nun nötig, die unbekanntenen Größen des Verzerrungstensors, Spannungstensors und Verschiebungsvektors zu bestimmen:

- Verschiebungsvektor $u_i (i = x, y, z)$: 3 Unbekannte
- Verzerrungstensor $\epsilon_{ij} (i, j = x, y, z)$: 6 Unbekannte
- Spannungstensor $\tau_{ij} (i, j = x, y, z)$: 6 Unbekannte

15 Unbekannte

Zur Wahrung der Übersicht wird im Folgenden die „Einstein'sche Summenkonvention“ verwendet, die eine kompakte Darstellung mathematischer Ausdrücke erlaubt. Es werden alle möglichen Kombinationen von i und j durchgegangen. Der Beistrich im Index verweist dabei auf eine partielle Ableitung. Verdeutlicht werden soll dies an einem einfachen Beispiel:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{Glg. 1}$$

aufgeschlüsselt in alle 6 Einzelgleichungen ergibt sich:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \text{Glg. 2}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \text{Glg. 3}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\delta w}{\delta z} \quad \text{Glg. 4}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right) \quad \text{Glg. 5}$$

$$\epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right) \quad \text{Glg. 6}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} \right) \quad \text{Glg. 6}$$

Für die Berechnung von 15 Unbekannten ist selbstverständlich das Bereitstellen von 15 unabhängigen Gleichungen notwendig. Diese Gleichungen sind

- Kinematische Beziehungen
- Werkstoffgesetz
- Gleichgewichtsbedingungen

ad Kinematische – Beziehungen

Diese Beziehung – auch als Verschiebungs-Verzerrungs-Beziehung bekannt – wird durch das lokale Verformungsmaß dargestellt und liegt der Annahme

zugrunde, dass nur Verformungen in einer beliebig kleinen Umgebung eines Punktes Einfluss auf die Spannungen in diesem Punkt haben (Glg. 1).

Durch die Betrachtung des lokalen Verformungsmaßes ist ersichtlich, dass die kinematische Beziehung 6 unabhängige Gleichungen liefert.

ad Werkstoffgesetz

Das Werkstoffgesetz stellt die Beziehung zwischen Spannungen und Verzerrungen her und hängt im Fall linearer, isotroper Elastizität nur von zwei Materialkonstanten ab, dem E-Modul und der Querkontraktionszahl ν . Der Elastizitätstensor C stellt den als Hooke'sches Gesetz bereits bekannten Zusammenhang her (Glg. 7)

$$\tau = C \varepsilon \tag{Glg. 7}$$

Hierbei gilt für die einzelnen Komponenten:

$$C = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{Glg. 8}$$

$$\tau := \begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \tag{Glg. 9}$$

$$\varepsilon := \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2 \varepsilon_{xy} \\ 2 \varepsilon_{yz} \\ 2 \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \tag{Glg. 10}$$

ad Gleichgewichtsbedingungen

Gleichgewichtsbedingungen können im Inneren des Körpers und an dessen Oberfläche aufgestellt werden.

Im Inneren des Körpers wird das Gleichgewicht von Spannungen, Volumskräften und Trägheitskräften an einem infinitesimal kleinen Quader aufgestellt:

$$\tau_{ji,j} + f_i^B = \rho a_i \quad \text{Glg. 11}$$

An der Oberfläche werden über die Cauchy'sche Formel die Oberflächenkräfte mit den Spannungen ins Gleichgewicht gesetzt:

$$f_i^S = \tau_{ji} n_j \quad \text{Glg. 12}$$

6.7.5.2 Das Prinzip der virtuellen Arbeit

Die virtuelle Arbeit ist jene Arbeit, die eine reale Kraft entlang einer virtuellen Verschiebung verrichtet. Als virtuelle Verschiebung wird dabei eine willkürlich angenommene Verschiebung bezeichnet, die sich jedoch mit den Randbedingungen des Systems verträgt und außerdem infinitesimal klein ist.

Das Prinzip der virtuellen Arbeit wird dabei verwendet um das Gleichgewicht des Systems bzw. seine Bewegungsgleichungen zu bestimmen. Dabei wird die virtuelle Arbeit im Inneren der virtuellen Arbeit an der Oberfläche gleichgesetzt (darin ist auch die Äquivalenz zu den beiden Gleichgewichtsbedingungen begründet).

Mathematisch lässt sich das Prinzip der virtuellen Arbeit folgendermaßen beschreiben:

$$\int_V \delta u_i (\tau_{i,j} + f_i^B - \rho a_i) dV + \int_S \delta u_i (f_i^S - \tau_{ji} n_j) dS = 0 \quad \text{Glg. 13}$$

Der erste Term des Volumsintegrals lässt sich unter Verwendung des Gauß'schen Integralsatzes und unter Berücksichtigung der Symmetrie des Spannungstensors umformen:

$$\int_V \delta u_i \tau_{ji,j} dV = \int_S \delta u_i \tau_{ji} n_j dS - \int_V \frac{1}{2} [\delta u_{i,j} + \delta u_{j,i}] \tau_{ji} dV \quad \text{Glg. 14}$$

Wie sich erkennen lässt entspricht der Term im Volumsintegral der virtuellen Verzerrung $\delta \epsilon_{ij}$. Mit dieser Umformung und dem Einsetzen der virtuellen

Verzerrung lässt sich das Prinzip der virtuellen Arbeit folgendermaßen formulieren:

$$\underbrace{-\int_V \delta \epsilon_{ij} \tau_{ij} dV}_{\delta W_{int}} + \underbrace{\int_V \delta u_i f_i^B dV + \int_S \delta u_i f_i^S dS}_{\delta W_{ext}} + \underbrace{\int_V \delta u_i \rho (-a_i) dV}_{\delta W_{inertia}} = 0$$

Glg. 15

Anders ausgedrückt kann man festhalten, dass ein elastischer Körper beim Einwirken äußerer Kräfte nur dann im Gleichgewicht ist, wenn die virtuelle Arbeit der inneren Kräfte δW_{int} gleich groß ist wie die Summe der virtuellen Arbeit der äußeren Kräfte δW_{ext} und der virtuellen Arbeit der Trägheitskräfte $\delta W_{inertia}$.

Bis zu diesem Punkt wurden noch keinerlei Vereinfachungen angenommen, das oben angeführte Gesetz ist somit noch allgemein gültig. Die Finite Elemente Methode hat ihren Ansatz nun an diesem Punkt. Das Gebiet wird diskretisiert und anstatt der exakten Verschiebungen \mathbf{u} werden die Verschiebungen der Knotenpunkte $\hat{\mathbf{u}}$ berechnet. Über diese Knotenpunktverschiebungen können dann wiederum über eine sogenannte Ansatzfunktion beliebige Verschiebungen \mathbf{u} approximiert werden:

$$\mathbf{u}^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{H}^{(m)}(x, y, z) \hat{\mathbf{u}}(t)$$

$\mathbf{u}^{(m)}$... Verschiebungsfeld

$\mathbf{H}^{(m)}$... Matrix der Ansatzfunktionen

$\hat{\mathbf{u}}(t)$... Knotenpunktverschiebung

Glg. 16

6.7.5.3 Einige Anmerkungen zur Finiten Elemente Methode

- Die Diskretisierung des Kontinuums erfolgt durch die Verwendung von M Elementen: $1 \leq m \leq M$
- Das Element (m) besitzt n Knotenpunkte. Daraus ergibt sich die Verschiebung der Knotenpunkte zu $\hat{\mathbf{u}}^T = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ w_2 \ \dots \ u_N \ v_N \ w_N]$.
- Die äußeren Lasten können am FE-Modell nur an diesen Knotenpunkten angreifen.
- Das Verschiebungsfeld $\mathbf{u}(x, y, z; t)$ wird durch die Matrix der Ansatzfunktionen $\mathbf{H}^{(m)}(x, y, z)$ durch die Knotenpunktverschiebungen angenähert. Die Ansatzfunktionen können prinzipiell frei gewählt werden, sind jedoch gewissen Bedingungen (z.B. keine Klaffungen/Überlappungen der verformten Elemente; stetige Funktionen) unterworfen. Meist dienen dazu Polynome, im einfachsten Fall kann auch ein linearer Ansatz gewählt werden.

6.7.5.4 Wichtige Matrizen der Finiten Elemente Methode

- **Differentialoperator-Matrix \mathbf{D}**
Mithilfe der Differentialoperatormatrix \mathbf{D} lassen sich die kinematischen Beziehungen (Verschiebungs-Verzerrungsbeziehungen) für jedes Element kompakt schreiben.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{\delta x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{\delta x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\delta}{\delta x} \\ \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta x} & 0 \\ \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta x} \\ 0 & \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta x} \\ \frac{\delta}{\delta x} & 0 & \frac{\delta}{\delta x} \end{bmatrix} \rightarrow \epsilon^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{D} \mathbf{u}^{(m)}(x, y, z; t) \quad \text{Glg. 17}$$

- **B-Matrix**
Wenn man diesen Ansatz noch weiter verfolgt kann man noch weitere Vereinfachungen vornehmen. Die B-Matrix stellt dann die Beziehung zwischen Knotenpunktverschiebungen und Verzerrungen her und entsteht aus der Multiplikation von Differentialoperatormatrix \mathbf{D} und Ansatzfunktions-Matrix \mathbf{H} :

$$\epsilon^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{D} \mathbf{u}^{(m)}(x, y, z; t) = \underbrace{\mathbf{D} \mathbf{H}^{(m)}(x, y, z)}_{\mathbf{B}^{(m)}(x, y, z)} \hat{\mathbf{u}}(t) \quad \text{Glg. 18}$$

$$\epsilon^{(m)}(x, y, z; t) = \mathbf{B}^{(m)}(x, y, z) \hat{\mathbf{u}}(t) \quad \text{Glg. 19}$$

- **Elastizitätsmatrix \mathbf{C}**
Die Elastizitätsmatrix \mathbf{C} wurde bereits angesprochen. Im allgemeinen Fall besteht sie aus 81 Komponenten. Im linear-elastischen Fall isotroper Materialien reduziert sich die Elastizitätsmatrix und stellt in Verbindung mit den Spannungen und Verzerrungen das Hooke'sche Gesetz $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon}$ dar.

$$C = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & & & \\ \nu & 1 - \nu & \nu & & & \\ \nu & \nu & 1 - \nu & & & \\ & & & \frac{1 - 2\nu}{2} & & \\ & & & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & \\ & & & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Glg. 20

- Steifigkeitsmatrix **K**

Die virtuelle Arbeit der inneren Kräfte kann durch die Definition der globalen Steifigkeitsmatrix **K** übersichtlicher angeschrieben werden. Dabei lässt sich die Analogie zur Federkraft als Produkt von Federsteifigkeit und Federweg erkennen. Die Multiplikation mit der virtuellen Verschiebung ergibt dann die virtuelle Arbeit.

$$\delta W_{int} = - \int_V \delta \epsilon_{ij} \tau_{ij} dV = - \int_V \delta \epsilon^T C \epsilon dV = - \delta \hat{u}^T \underbrace{\sum_{(m)} \int_{V^{(m)}} \mathbf{B}^{(m)T} \mathbf{C}^{(m)} \mathbf{B}^{(m)} dV^{(m)}}_K \hat{u} = - \delta \hat{u}^T \mathbf{K} \hat{u}$$

Glg. 21

- Spaltenmatrix **F_{ext}** der äußeren Kräfte

Hier werden die äußeren Kräfte zusammengefasst. Diese bestehen aus Volumen- und Oberflächenkräften.

$$\delta W_{ext} = \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^B dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}^S dS$$

Glg. 22

$$\delta W_{ext} = \delta \hat{u}^T \underbrace{\sum_{(m)} \left[\int_{V^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}^B dV^{(m)} + \int_{S^{(m)}} \mathbf{H}^{(m)T} \mathbf{f}^S dS^{(m)} \right]}_{\mathbf{F}_{ext}} = \delta \hat{u}^T \mathbf{F}_{ext}$$

Glg. 23

- Massenmatrix **M**

Die Massenmatrix wird in der Darstellung der virtuellen Arbeit der Trägheitskräfte verwendet. Im statischen Fall ist sie daher unbedeutend.

6.7.6 Numerische Integration

Ein wichtiger Aspekt der Finiten Elemente Methode ist die numerische Integration von Matrizen (etwa bei der Bestimmung der Steifigkeitsmatrix), bzw. derer Matrizenelemente. Dazu sollen hier kurz zwei mögliche Verfahren vorgestellt werden:

6.7.6.1 Allgemein

Numerische Integration einer beliebigen Funktion $F(x)$ wird ausgedrückt durch:

$$\int_a^b F(x) dx = \sum_i \alpha_i F(x_i) + R_n \quad \text{Glg. 24}$$

α_i ... Gewichte

$F(x_i)$... Funktionswerte an den Stützstellen x_i

R_n ... Restglied

Diese Betrachtung gibt noch eine exakte Lösung an. Wird jedoch das Restglied R_n vernachlässigt ergibt sich die Approximation:

$$\int_a^b F(x) dx \approx \sum_i \alpha_i F(x_i) \quad \text{Glg. 25}$$

6.7.6.2 Newton-Cotes-Quadratur

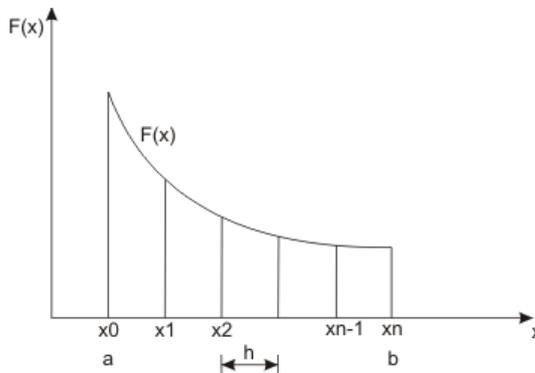


Bild 6.47: Schrittweiten und Stützstellen

Dieses Verfahren beruht darauf, dass der Integrationsbereich in n gleiche Intervalle unterteilt wird und somit auch die Anzahl der Stützstellen ($n+1$) und deren Positionen x_i festgelegt sind. Die Schrittweite ergibt sich zu $h = \frac{b-a}{n}$ (Bild 6.47).

6.7.6.3 Gauß-Quadratur

Bei der Gauß-Quadratur werden im Integrationsbereich n Stützstellen gewählt. Die Position dieser Stützstellen ist jedoch vorerst noch unbekannt und die Schrittweite h somit – im Gegensatz zur Newton-Cotes Quadratur – nicht konstant (Bild 6.48).

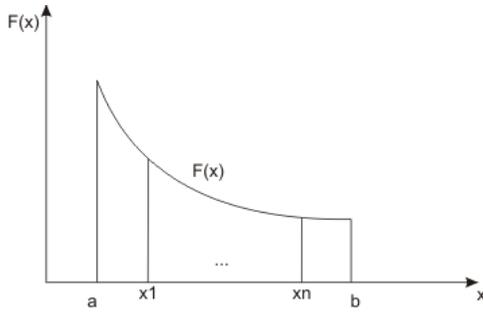


Bild 6.48: Gauß-Quadratur

6.8 Grundlagen, Wirkprinzipien und Submodelle zur Modellbildung technischer Simulationsmodelle in der Logistik mit MKS (inkl. Exkurs zu DEM)

Nach [VWB+09] sind Mehrkörpersysteme (MKS , bzw. im Englischen Multibody Systems , abgekürzt MBS) Modelle, die zur Beschreibung der Bewegung an realen Objekten, wie Maschinen, Fahrzeugen, Robotern, Produktionsanlagen, Transporteinrichtungen usw. dienen. Es wird dabei nicht nur die Bewegung selbst (Kinematik) beschrieben, sondern auch der Zusammenhang der Bewegung mit den dafür notwendigen bzw. auftretenden Kräften (Kinetik) hergestellt (siehe Originalquellen in [VWB+09], S. 286).

„Eine grundlegende Modellvorstellung für Mehrkörpersysteme besteht darin, dass sie sich aus einer endlichen Anzahl von massebehafteten Körpern zusammensetzen, die durch weitere Elemente (Koppelemente) miteinander verbunden sind, über die Kräfte und Momente zwischen den einzelnen Körpern übertragen werden und die in der Regel an diskreten Punkten der Körper angreifen. Darüber hinaus können auf die Körper von außen Kräfte und Momente wirken.

Bezüglich der Modellvorstellung der Koppelemente ist folgende Unterscheidung sinnvoll:

- Koppelemente, durch welche die Bewegungsmöglichkeiten der Körper über sogenannte kinematische Bindungen eingeschränkt werden. Dies sind z.B. starre Gelenke, Führungen, Lagerungen oder Regeleinrichtungen wie etwa Stellantriebe, die bestimmte Bewegungen (Trajektorien) zwischen den Körpern rückwirkungsfrei erzwingen (ideale Lagestellglieder). Diese Elemente werden in (Shabana 2001 in [VWB+09]) als „joints“ bezeichnet.
- Koppelemente, durch welche die Bewegungsmöglichkeiten der Körper nicht eingeschränkt werden. Dies sind z.B. masselose Federn, Dämpfer oder Regeleinrichtungen wie etwa Stellantriebe, die Kräfte oder Momente zwischen den Körpern übertragen, deren Bewegung aber darüber hinaus nicht behindern (Kraftstellglieder). Derartige Elemente werden in (Shabana 2001 in [VWB+09]) als „force elements“ bezeichnet.

Zusätzliche Verbindungen einzelner Körper mit dem Umgebungssystem (das als weiterer unbeweglicher, meist starrer Körper aufgefasst werden kann) werden als Lagerungen bezeichnet, die beweglich (z.B. Gelenke, Führungen) oder unbeweglich (z.B. Einspannungen) sein können.

Koppelemente der erstgenannten Art („joints“) schränken die Bewegungsfreiheit der einzelnen Körper ein, was durch kinematische Beziehungen ausgedrückt werden kann, die als „kinematische Bindungen“ bezeichnet werden. Zur Realisierung dieser kinematischen Bindungen werden an den Verbindungsstellen Kräfte und Momente benötigt, die als Zwangskräfte bezeichnet werden, da sie an den Verbindungsstellen die vereinbarte kinematische Bindung erzwingen.

Zwangskräfte können dem mechanischen System keine Energie zuführen. Kräfte, die dem mechanischen System Energie zu- oder abführen können, werden „eingeprägte Kräfte“ genannt (z.B. Gewicht, Feder-, Dämpferkräfte, im Zeitverlauf vorgegebene äußere Kräfte, Gleitreibung).

Charakteristisch für Mehrkörpersysteme ist weiterhin, dass die einzelnen Körper große Translationen und Rotationen („Starrkörperbewegungen“) durchführen können, ihre Verformungen im Vergleich dazu aber klein sind. Die Anzahl n der Freiheitsgrade des Mehrkörpersystems wird aus der Anzahl N der im Mehrkörpersystem vorhandenen Körper und der Anzahl r der vorliegenden Zwangsbedingungen (kinematischen Bindungen) ermittelt. Bei der Betrachtung einer räumlichen Bewegung (drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade pro Körper) beträgt die Anzahl der Freiheitsgrade $n = 6N - r$ und bei einer ebenen Bewegung (zwei translatorische und ein rotatorischer Freiheitsgrad pro Körper) $n = 3N - r$. [VWB+09]

Die Entwicklung der MKS bezog sich primär auf starre Körper, später auf elastische und inzwischen auf allgemein verformbare (flexible) Körper. Dazu wurden Methoden entwickelt, bei denen auch die Verformungen der Körper berücksichtigt werden können. Dies führt im Falle elastischer Körper auf sogenannte Elastische Mehrkörpersysteme (EMKS) und bei nichtelastischem (z.B. elasto-plastischem oder visko-elastischem) Verhalten der Körper auf sogenannte Flexible Mehrkörpersysteme). Der Unterschied zu Mehrkörpersystemen mit starren Körpern besteht darin, dass zusätzliche Freiheitsgrade zur Beschreibung der Verformungen in die Formulierung aufgenommen und berechnet werden müssen [VWB+09].

Tabelle 25: Unterschiede zwischen MKS- und FEM-Modellen [VWB+09]

Kategorie	MKS	FEM
Anwendungszweck	Betrachtung von Bewegungen und Kraftgrößen (Kräften, Momenten)	Betrachtung von Verformungen und mechanischen Spannungen
Anzahl der Körper	groß	klein (meist 1)
Starrkörperbewegung	groß	klein, von untergeordneter Bedeutung
Verhältnis: Verformung zu Starrkörperbewegung	klein	groß
Modellelemente	Einzelkörper, Kopplungselemente	finite Elemente
Übertragung von Kräften	über Kopplungselemente	über Element-Knoten
Anzahl der Freiheitsgrade	niedrig (starre Körper), mittel (flexible Körper)	hoch
Ortsdiskretisierung	Ansatzfunktionen über gesamten Körper	Zerlegung in finite Elemente

Die Mehrkörpersystem-Modellierung unterscheidet sich wesentlich von der in Kap. 6.7 vorgestellten Finite-Elemente-Modellierung. Während im Falle von MKS

die Kinematik und Kinetik von großen Starrkörperbewegungen im Vordergrund stehen und die Verformungen der einzelnen Körper im Vergleich dazu klein sind (null bei starren MKS), verhält es sich bei der FEM-Modellierung in der Regel gerade umgekehrt. Dort stehen die Verformungen und Spannungen der Körper im Vordergrund, die jedoch in der Regel keine großen Starrkörperbewegungen ausführen. Tabelle 25 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen MKS und FEM [VWB+09].

Die zu untersuchenden mechanischen Systeme (der Technischen Logistik) sind in der Regel technische Konstruktionen oder Ausschnitte daraus. Zu ihrer mathematischen Untersuchung ist die Beschreibung durch Ersatzsysteme und Modelle erforderlich, wozu Mehrkörpersysteme häufig mit großen Vorteilen verwendet werden können. Die Maschinendynamik stellt ein klassisches Teilgebiet des Maschinenbaus dar, das heute ohne den Einsatz von Computern nicht mehr auskommt und beschäftigt sich mit dem Bewegungsverhalten und der Beanspruchung mechanischer Systeme und stützt sich dabei auf die Kinematik, die Kinetik und die Prinzipien der analytischen Mechanik [VWB+09].

Da Schwingungen in fast allen Maschinen auftreten und mit steigender Arbeitsgeschwindigkeit und höherer Materialausnutzung (Leichtbau) die Schwingungsanfälligkeit von Maschinen zunimmt, während andererseits die Anforderungen an die Präzision der Maschinen steigen, gewinnt auch die Maschinendynamik immer mehr an Bedeutung. Die Aufgaben der Maschinendynamik (mit [DH06] als einem ihrer Standard-Lehrbücher) bestehen im Wesentlichen darin, eine Maschine so zu gestalten, dass

- unerwünschte Schwingungen möglichst klein bleiben,
- erwünschte Schwingungen die geforderten Eigenschaften haben und
- unvermeidbare Schwingungen nicht zu Schäden führen [VWB+09].

Nach [VWB+09] ist es wichtig, maschinendynamische Untersuchungen möglichst früh durchzuführen, da sich das Schwingungsverhalten einer Maschine durch einfache konstruktive Veränderungen in der Entwurfsphase oft (noch) günstig beeinflussen lässt. Abhilfemaßnahmen in späteren Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind in aller Regel aufwändig und teuer. Darüber hinaus sind Schwingungsüberwachung, Schadensfrüherkennung und Schadensdiagnose weitere Aufgaben der Maschinendynamik. Fast alle Maschinen enthalten heute Regelungs- oder Steuerungseinrichtungen, die dafür sorgen, dass die erwünschten Betriebszustände (z.B. Beschleunigen, Verzögern, Betrieb mit konstanter Geschwindigkeit) erreicht und eingehalten werden. Die mechanische Grundstruktur einer Maschine wird durch Sensoren und Aktoren sowie Steuer- und Regelungseinrichtungen ergänzt. Man kann in diesem Zusammenhang zurecht von einem mechatronischen System sprechen. Auf diese Art entstehen hochdynamische Systeme, deren Verhalten in immer stärkerem Maße durch die nicht-mechanischen Komponenten bestimmt wird. Es ist daher entscheidend, fachübergreifende Systembeschreibungen einzuführen, da es nur auf diese Weise gelingt, die komplexe Dynamik moderner Maschinensysteme zu erfassen, zu beschreiben, zu analysieren, zu bewerten und zu optimieren.

Zur Abgrenzung des Funktionsumfangs und des effizienten Einsatzes von MKS im Gegensatz zur abstrahierenden Simulation (AS) sei hier nochmals auf die Differenzierung und das erläuternde Beispiel des Kettenzuges (Bild 6.24) in Kap. 6.5.1 verwiesen.

Einen Überblick über den Einsatz und die Auswirkungen bzw. Erfolge mit und durch Mehrkörpersimulation (auch AS) geben die Arbeiten [P1], [P2], [P5], [LAN14a], [P8], [P11], [P12] und [LAN14b]

Die Ausführungen dieses Abschnittes dienen der Abgrenzung zu kommerziell verfügbaren MKS-Modulen (ADAMS.Machinery [MSC10], RecurDyn fullflex [REC08]) und Ergänzung bzw. modellbildnerischen Kombination von Standardfunktionen (joints, force elements) für die Themenstellungen der Technischen Logistik.

Für die Einordnung und Möglichkeiten in der Produktentwicklung mittels MKS sei auf die CAx-Prozessketten in Kap. 6.10.2 und im Speziellen auf Bild 6.74 verwiesen.

6.8.1 Numerik

Bei der Erstellung von v.a. MKS-Modellen ist schon im Vorhinein ein Augenmerk auf die Lösungsmöglichkeiten des zu entwickelnden Systems zu legen. Durch die numerische Integration der Bewegungs- und Zwangsgleichungen können sich bei hoher Modellierungstiefe (z.B. zu hohe Detailtiefe bei Geometrien, Berücksichtigung von nicht relevanten Bewegungen, Kontakte mit zu hohen Steifen und geringen Massen, ...) Probleme ergeben, die numerisch nicht mehr lösbar sind. Eine gute Einführung zur Theorie der Modellbildung und einen Einblick in den Nutzen unterschiedlicher Modellierungstiefen gibt Dresig in seinem Buch [D05].

Zur Vertiefung der mit der Liste der Anforderungen an das Systemverständnis des simulierenden Ingenieurs definierten Inhalte (Kap. 6.5.1) sind hier einige Details zu numerischen Lösungsverfahren aufgelistet, bewertet und die Theorie hinter einem verbreiteten Simulationswerkzeuges (MSC.ADAMS®) kurz umrissen. Obwohl zum Gebiet der MKS umfangreiche Fachliteratur existiert (z.B.: [SCH90], [DAN05], ...) muss den Ingenieuren ein Mindesteinblick in die begründende Theorie gegeben werden, was Ziel dieses Abschnittes und der Lehrveranstaltung CAE an der TU Graz, ergänzend zu den facheinschlägigen Veranstaltungen, ist.

Numerische Integration.

Numerische Integrationsregeln haben meist die Form [WS89]

$$\mathbf{x}_{i+1} = \sum_{n=0}^k a_n \mathbf{x}_{i-n} + \sum_{m=-1}^1 b_m \dot{\mathbf{x}}_{i-m} \quad \text{Glg. 26}$$

mit den Koeffizienten a_n und b_m , die nach einer Taylor-Reihe bestimmt werden, die die Grundlage für numerische Integration darstellt. Aus der Art dieser Koeffizienten, aus dem Abbruch der Taylor-Reihe nach dem n -ten Glied folgend, ergibt sich dann das Integrationsverfahren:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \dot{\mathbf{x}}_i \Delta t + \ddot{\mathbf{x}}_i \frac{\Delta t^2}{2!} + \ddot{\mathbf{x}}_i \frac{\Delta t^3}{3!} + \dots \quad \text{Glg. 27}$$

Eine Einteilung der numerischen Lösungsverfahren kann nach [WS89] und inhaltlich auch nach [SCH99] und [DR06] getroffen werden:

- Klassifikation nach der Integrationsart
 - explizite Verfahren
 - Predictor-Corrector-Verfahren
 - implizite Verfahren
- Klassifikation nach Art der Stützstellen
 - Einschrittverfahren
 - Mehrschrittverfahren
 - Extrapolationsverfahren

Beispielhaft seien dazu aufgeführt und kurz kommentiert (*in Klammer*):

- **explizite Verfahren**

- **Einschritt**

- **Euler:**

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i \cdot \Delta t \quad \text{Glg. 28}$$

- **Runge-Kutta 4. Ordnung:**

$$x_{i+1} = x_i + \frac{\dot{x}_i + 2\tilde{\dot{x}}_{i+1/2} + 2\tilde{\tilde{\dot{x}}}_{i+1/2} + \tilde{\tilde{\tilde{\dot{x}}}}_i}{6} \cdot \Delta t$$

Glg. 29

$$\text{mit } \tilde{\dot{x}}_{i+1/2} = x_i + \dot{x}_i \frac{\Delta t}{2} \quad \text{Glg. 30}$$

$$\text{und } \tilde{\tilde{\dot{x}}}_{i+1/2} = x_i + \tilde{\dot{x}}_i \frac{\Delta t}{2} \text{ genauer als Euler}$$

Glg. 31

- **Mehrschritt**

- **Adams-Bashfort**

- **1. Ordnung:**

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i \cdot \Delta t \text{ vgl. Euler} \quad \text{Glg. 32}$$

- **2. Ordnung:**

$$x_{i+1} = x_i + \left(\frac{3}{2} \dot{x}_i - \frac{1}{2} \dot{x}_{i-1} \right) \cdot \Delta t \quad \text{Glg. 33}$$

- **3. Ordnung:**

$$x_{i+1} = x_i + \left(\frac{23}{12} \dot{x}_i - \frac{16}{12} \dot{x}_{i-1} + \frac{5}{12} \dot{x}_{i-2} \right) \cdot \Delta t$$

schon wesentlich genauer als Euler **Glg. 34**

- **Predictor-Corrector-Verfahren (gut für kontinuierliche Systeme)**

- **ABAM:**

mit Adams-Bashfort (predict explizit $x_{p_i+1}=x_{i+1}$ s.o.) und Adams-Moulton (correct implizit)

- **3. Ordnung:**

$$x_{ci+1} = x_i + \left(\frac{5}{12} \dot{x}_{i+1} + \frac{8}{12} \dot{x}_i + \frac{1}{12} \dot{x}_{i-1} \right) \cdot \Delta t$$

Glg. 35

*alle auch mit Schrittweitenmodifikation aus
Abbruchfehler*

$$x_{pi+1} - x_{ci+1}$$

Glg. 36

- **implizite Verfahren** (*günstig für die Stabilität, alle Variablen der neuen Zeitebene sind miteinander gekoppelt – daher Lösung eines Gleichungssystems nötig*)

- **Einschritt**

- **Euler:**

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t$$

Glg. 37

- **Trapezregel:**

$$x_{i+1} = x_i + \frac{\dot{x}_{i+1} + \dot{x}_i}{2} \cdot \Delta t$$

Glg. 38

*unbedingt stabil und wenig aufwändiger als Euler
implizit, auch Crank-Nicolson-Verfahren genannt,
genauestes Verfahren 2. Ordnung.*

- **Mehrschritt**

- **BDF:**

- **1. Ordnung:**

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t$$

Glg. 39

wie Euler implizit

- **2. Ordnung:**

$$x_{i+1} = \frac{4}{3} x_i - \frac{1}{3} x_{i-1} + \frac{2}{3} \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t$$

Glg. 40

häufig verwendete Parabelapproximation

- **3. Ordnung:**

$$x_{i+1} = \frac{18}{11} x_i - \frac{9}{11} x_{i-1} - \frac{29}{11} x_{i-2} + \frac{6}{11} \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t$$

Glg. 41

- **Gear** (GSTIFF in ADAMS):

- **1. Ordnung:**

$$x_{i+1} = \alpha_i x_i - \beta_0 \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t$$

Glg. 42

- **k-te Ordnung:**

$$x_{i+1} = \sum_{n=1}^k \alpha_n x_{i-n+1} - \beta_0 \dot{x}_{i+1} \cdot \Delta t \quad \text{Glg. 43}$$

Bewertung der Lösungsverfahren nach Dahmen & Reusken [DR06]:

Euler: Das explizite Euler- und verbesserte Euler-Verfahren sind aufgrund der niedrigen Ordnung für die meisten praktischen Belange ungeeignet. Für extrem steife Probleme ist jedoch das implizite Euler-Verfahren durchaus wichtig. Als Einschrittverfahren bieten Runge-Kutta-Verfahren die Möglichkeit, die jeweilige Schrittweite an das Verhalten der Lösung bequem anzupassen.

Mehrschrittverfahren: Der Rahmen der (linearen) Mehrschrittverfahren bietet im Vergleich zu Einschrittverfahren eine sehr effiziente Möglichkeit, hohe Ordnung zu realisieren. Die bei steifen Problemen oft beobachteten quantitativ besseren Stabilitätseigenschaften impliziter Verfahren können zugunsten einer Aufwandverringerung durch Prädiktor-Korrektor-Verfahren zumindest teilweise bewahrt werden. Ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren ist explizit, hat jedoch im allgemeinen bessere Stabilitätseigenschaften als das entsprechende (explizite) Prädiktor-Verfahren.

Rückwärtsdifferenzenmethoden (BDF-Methoden): Diese Verfahren sind implizit, verbinden aber zumindest für $k \leq 6$ die in diesem Rahmen möglichen Effizienz- und Ordnungsvorteile von linearen Mehrschrittverfahren mit einer sehr guten Verwendbarkeit bei steifen Systemen. Zwar erfüllen sie den stärksten Stabilitätsbegriff (A-Stabilität) nur für $k \leq 2$, haben aber auch für höhere Ordnung bis zu $k \leq 6$ immer noch für viele Anwendungen akzeptable Stabilitätsbereiche.

Steife Systeme: (Anm.: Ein steifes System muss nicht aus starren Körpern bestehen. Hohe Frequenzen können beispielsweise ausgedämpft werden und können aber durch äußere Anregungen wieder nicht-steif werden. Somit können ODEs zu gewissen Zeitpunkten steif, zu anderen nicht-steif sein. Das Steifigkeitsverhältnis errechnet sich aus der höchsten inaktiven Systemfrequenz dividiert durch höchste aktive; steife Systeme haben Verhältnisse > 200 , nicht-steife < 20). Solche Probleme treten zum Beispiel bei chemischen Reaktionen, oszillierenden mechanischen Systemen und Diffusionsprozessen auf. Der Einsatz expliziter Verfahren ist bei solchen Anwendungen nicht sinnvoll. A-stabile implizite Methoden niedriger Ordnung sind das implizite Euler-Verfahren (BDF1), die Trapezmethode und BDF2.

Das **BDF-Verfahren** als implizites Mehrschrittverfahren ist mit seinen Rückwärtsdifferenzenformeln (BDF) ein wichtiger Bestandteil fast aller Simulationsprogramme und nähert die unbekannte Funktion mittels Parabeln zu den Zeitpunkten t_{n-1} , t_n und t_{n+1} an. Es ist stabil und nur wenig aufwändiger als das implizite Euler-Verfahren. Das GSTIFF Verfahren nach Gear [GEA71], das zum standardmäßigen Solver in ADAMS gehört, baut auf dem BDF-Verfahren auf. Es entspricht einem Predictor-Corrector-Schema, das aus der Historie auch die beste Schrittweite und Ordnung für den nächsten Rechenschritt vorherberechnet (z.B. [GDL+06]).

Beim **ABAM-Verfahren**, als Kombination aus explizitem Prädiktor-Verfahren und implizitem Korrektor-Verfahren, nach Adams-Moulton und Adams-Bashfort,

werden die DAEs in ODEs übergeführt und es ist nur für nicht-steife Systeme geeignet.

Gleichungserstellung und Solver in der Simulationssoftware MSC.ADAMS®.

Die folgenden Ausführungen sind Extraktionen aus den folgenden Quellen und dienen einem vereinfachten Einblick in die Struktur der numerischen Lösung des Verhaltens von Mehrkörperstrukturen mit Simulationswerkzeugen, wie sie aus Sicht des Autors zur Bedienung des Systems notwendig ist (v.a. Solver-Einstellungen), ([NH01], [SCH90], [ADA14]).

ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) von MSC Software stammt aus einem Raum- Luftfahrt Tool aus dem Jahre 1964 (Hooker and Margulies in [SCH90]). Schon 1980 taucht dafür der Name „ADAMS“ auf und das Programm ist voll validiert mit ca. dem Umfang von heute, allerdings relevant anderem In- und Output bzw. Pre- und Post-Processing; die Numerik hinter den Mehrkörperstrukturen wurde durch die Arbeit von Gear beherrschbar [GEA71]. Das Programm ist sehr allgemein aufgebaut mit einer open-ended architecture und vielen vordefinierten sowie speziell programmierbaren Features. Die mächtigen Solver sind in der Lage, steife differential-algebraische Gleichungssysteme zu lösen. Die Modellierung mittels vordefinierter Objekte (wie Gelenke, Sensoren,...) ist weniger aufwändig als die mathematische Beschreibung dieser Zusammenhänge (vgl. die Ausführungen „Simulationskonzepte“ zu AS und MKS in Kap. 6.5.1). Ausgegeben werden unterschiedlichste Lösungsfiles, u.a. zur animierten optischen Wiedergabe und zur zahlenmäßigen Beschreibung aller Zustandsgrößen aller beteiligten Teile.

Die Bewegungsgleichungen zur dynamische Analyse des Mehrkörpersystems werden in ADAMS mittels der Lagrange'schen Gleichungen aufgestellt, womit die allg. Differentialgleichung unten zu lösen ist:

$$\frac{d}{dt} \left[\begin{pmatrix} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} \end{pmatrix}^T \right] - \begin{pmatrix} \frac{\partial K}{\partial q} \end{pmatrix}^T + \Phi_q^T \lambda = Q \quad \text{Glg. 44}$$

mit K der kinetischen Energie nach:

$$K = \frac{1}{2} u^T M u + \frac{1}{2} \bar{\omega}^T J \bar{\omega} \quad \text{Glg. 45}$$

mit λ den Lagrange'schen Multiplikatoren und Q der generalisierten angreifenden Kraft und $\Phi_q^T \lambda$ zur Berücksichtigung der constraints.

Hinzu kommt die Lösung der Zwangsbedingungen (constraints – algebraische Gleichungen) womit ein differential-algebraisches-System entsteht (DAE: z.B. $F(\dot{y}, y, t) = 0$). DAE-Systeme werden durch ihren Index charakterisiert, dem die Anzahl der zeitlichen Ableitungen entspricht um das DAE-System in ein ODE-System ($\dot{y} = f(y, t)$) überzuführen, worin \dot{y} explizit angeschrieben werden kann, also eine Differentialgleichung, bei der zu einer gesuchten Funktion nur Ableitungen nach genau einer Variablen auftreten. Nun gilt je höher der Index des DAE-Systems ist, umso schwieriger gestaltet sich dessen Lösung. Die DAE-

Systeme in ADAMS haben gewöhnlich Index I3 (mit periodischer Erzwingung der kinematischen Zwangsbedingungen). Wenn man statt nach den Positionskoordinaten nach den Geschwindigkeiten löst, kann man die Ordnung, durch Differentiation der constraints, auf SI2 reduzieren. Die Lösung ist dann langsamer, aber robuster und genauer mit einer Error-Kontrolle für Wege und Geschwindigkeiten.

ADAMS verwendet ein Newton-(Raphson) ähnliches Verfahren zur Nullstellenbestimmung bei nichtlinearen Systemen – also zum Lösen der aufgestellten Bewegungsgleichungen, in denen die Ableitungen mit der Integrationsvorschrift (standardmäßig GSTIFF) ersetzt sind. Zum Verständnis ist folgend die Iterationsvorschrift des einfachen Newton-Ansatzes angeführt:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{N}_f(\mathbf{x}_n) = \mathbf{x}_n - \frac{\mathbf{f}(\mathbf{x}_n)}{\mathbf{f}'(\mathbf{x}_n)} \quad \text{Glg. 46}$$

Der Startwert für die Iteration kommt aus einem Predictor-Prozess, der aus einem expliziten Integrator konstruiert wird. Die Jacobi-Matrix des Systems wird berechnet und der Prozess der Iteration solange wiederholt, bis die Error-Vorgabe unterschritten ist. Konvergiert die Iteration nicht, wird der Zeitschritt und dessen Lösungsversuch verworfen und ein feinerer Zeitschritt vorgenommen.

D. Ryan meint zu diesem Programm in [SCH90] sehr treffend: "IF ONLY NEWTON COULD HAVE SEEN ADAMS!"

6.8.2 Reibung und 3D-Kontakte

Zwischen Körpern besteht in Mehrkörpersystemen die Möglichkeit zur Verbindung über Gelenke, woraus algebraische Gleichungen erwachsen, oder über kraftgesteuerte freie Beziehungen, zu denen die Kontaktbedingung (mit Reibung) zählt. Reibung und Kontaktverhalten sind diskrete Vorgänge die ereignisgesteuert auftreten und im Falle der Haftreibung mehrfache Zustandswerte für eine Eingangsgröße aufweisen; dies ist numerisch nur aufwendig behandelbar.

STEP und STEP5 – Funktion.

Zum weiteren Verständnis muss die in numerischen Systemen (und damit auch ADAMS) oft, wegen ihrer guten Differenzier- und numerischen Behandelbarkeit, verwendete STEP (einfach stetig differenzierbar) bzw. STEP5 (zweifach stetig differenzierbar) – Funktion erläutert werden. Da Sprungfunktionen numerisch nur äußerst problematisch behandelbar sind, wird dieser „verrundete“ Sprung endlicher Dauer eingeführt und somit die Heavyside-Funktion durch quadratische bzw. kubische Polynome approximiert [ADA14]. In einem Bereich für x zwischen x_0 und x_1 wird von h_0 auf h_1 „gesprungen“ mit:

$$a = h_1 - h_0 \quad \text{und} \quad \Delta = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad \text{Glg. 47}$$

$$\text{STEP} = \begin{cases} h_0 & x \leq x_0 \\ h_0 + a\Delta^2 (3 - 2\Delta) & x_0 < x < x_1 \\ h_1 & x \geq x_1 \end{cases} \quad \text{Glg. 48}$$

$$\text{STEP5} = \begin{cases} h_0 & x \leq x_0 \\ h_0 + a\Delta^3 (10 - 15\Delta + 6\Delta_2) & x_0 < x < x_1 \\ h_1 & x \geq x_1 \end{cases} \quad \text{Glg. 49}$$

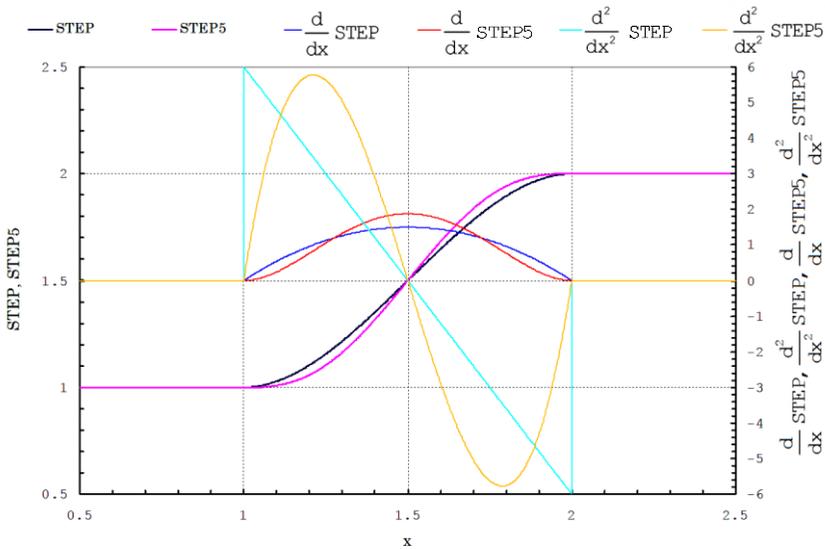


Bild 6.49: STEP- und STEP5-Funktion und Ableitungen bei Einheitssprung

In Bild 6.49 zeigt sich der Unterschied der beiden Ansätze in der stetigen zweiten Ableitung nach x der STEP5-Funktion.

Reibung in ADAMS.

Die Modellierung von Reibungsvorgängen gehört zu den am schwierigsten beherrschbaren Problemen in MKS-Systemen. Dabei ist die Haftreibung, mit einer doppelten Definition des Reibkoeffizienten bei Haften (je nach wirkender Kraft kehrt sich das Vorzeichen um), numerisch aufgrund ihrer Unstetigkeit nur sehr schwer zu behandeln. Haftreibung bedeutet eine Zustandsänderung im System und kann dessen Freiheitsgrade ändern, was nur unter großem Aufwand beherrschbar ist [HAR02]. Spätestens an diesem Problem klappt wieder der Erkenntnis- und Wissenshorizont des Anwendungsingenieurs mit dem des Entwicklers mechanischer Systeme auseinander. Die Literatur zu diesem Thema

ist umfangreich und in einem review-paper übersichtlich gelistet [BER02]. Natürlich existieren Ansätze der angewandten Mechanik, um auch Haftreibungsvorgänge bei Solid-Solid-Kontaktproblemen anzuwenden [HAR02], sie sind aber in die kommerziellen MKS-Systeme nur durch Eigenprogrammierung implementierbar. Spätestens hier stellt sich die Frage zwischen Aufwand und Nutzen eines Teilmodells.

So kann man mit den systemeigenen Ansätzen (s.u.) die Haftreibung beispielsweise annähern, wenn man die beschreibenden Parameter passend wählt. Bei vielen Simulation in der Technischen Logistik erscheint dies ausreichend, da die Kontaktpartner zueinander entweder ständig in Relativbewegung sind und somit Haften bei nicht existenter Gleitgeschwindigkeit kaum auftreten würde. Oder der Betrachtungszeitraum ist derart gering (wenige Sekunden), dass ein Quasi-Haften mit kleinen Rutschbewegungen als Näherung modelliert werden kann.

Wenn man nun die Parameter im ADAMS-Ansatz so wählt, dass die Reibung schon bei sehr geringen Rutschgeschwindigkeiten (viel kleiner als die tatsächlich dann auftretenden Rutschgeschwindigkeiten zufolge der äußeren Kräfte) den Wert μ_s erreichen kann, kann man von Quasi-Haften sprechen, da die somit zugelassene Geschwindigkeit wesentlich kleiner als die Rutschgeschwindigkeit ist. Stick-Slip-Effekte und reales Haften werden dadurch ausgeschlossen.

$$\mu(v_{slip}) = \begin{cases} -\text{sign}(v_{slip}) \cdot \mu_d & |v_{slip}| > v_d \\ -\text{STEP}\left(|v_{slip}|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s\right) \cdot \text{sign}(v_{slip}) & v_s < |v_{slip}| < v_d \\ \text{STEP}\left(|v_{slip}|, -v_s, \mu_s, v_s, -\mu_s\right) & -v_s < v_{slip} < v_s \end{cases}$$

$$= \begin{cases} -\text{sign}(v_{slip}) \cdot \mu_d & |v_{slip}| > v_d \\ \left[\mu_d + (\mu_s - \mu_d) \cdot \left(\frac{|v_{slip}| - v_d}{v_s - v_d} \right)^2 \cdot \left(3 - 2 \frac{|v_{slip}| - v_d}{v_s - v_d} \right) \right] \cdot \text{sign}(v_{slip}) & v_s < |v_{slip}| < v_d \\ \mu_s - 2\mu_s \cdot \left(\frac{v_{slip} + v_s}{2v_s} \right)^2 \cdot \left(3 - 2 \frac{v_{slip} + v_s}{2v_s} \right) & -v_s < v_{slip} < v_s \end{cases}$$

Glg. 50

ADAMS verwendet die geschwindigkeitsproportionale Definition des Reibkoeffizienten nach Glg. 50 um den Sprung bei Richtungsänderung und Haften zu vermeiden, damit das Gleichungssystem mit einem Standardintegrator für steife Differentialgleichungssysteme lösbar wird [SEX02]. Die Reibungsfunktion ist polynomisch durch die STEP-Funktion angenähert (s.o. und [ADA14]). Bild 6.50 stellt Glg. 50 in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit v_{slip} der Reibpartner dar, für das Coulomb'sche Reibungsverhalten würde dann $v_d=v_s=0$ gelten.

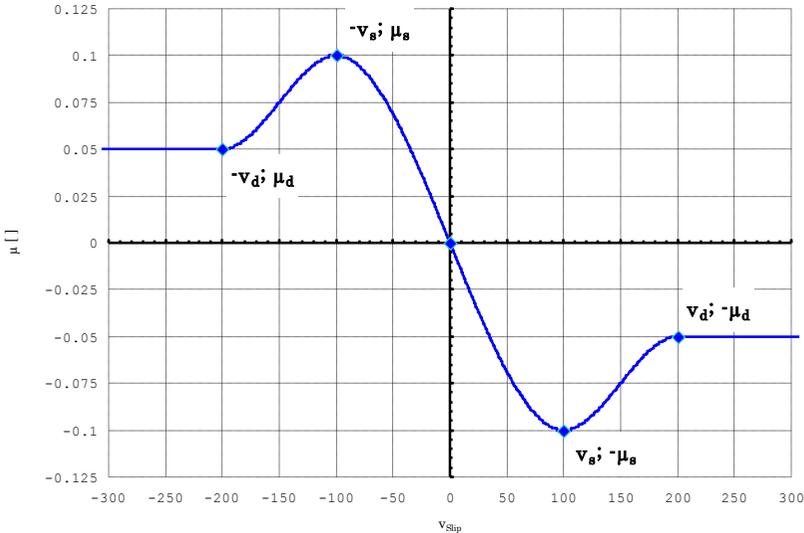


Bild 6.50: Reibung in Abhängigkeit der Rutschgeschwindigkeit

3D-Solid-Solid-Kontakte in ADAMS.

Der numerische Solver in ADAMS definiert Kontakte zwischen einem Geometriepaar als einseitige Zwangsbedingung (unilateral constraint) als Kraft, die null ist wenn keine gegenseitige Durchdringung stattfindet und die einen positiven Wert bei Durchdringung der beiden Kontaktpartner aufweist [ADA14]. Diese Kontaktpartner können unterschiedliche Geometrien haben (idealisierte 2D und reale 3D Kontaktdefinitionen) und reibungsbehaftet sein. Der verwendete Parasolid-Geometriealgorithmus (geometry engine) ist verantwortlich zur Auffindung und Detektion des Kontaktes und für die Berechnung der Kontaktnormalen im Kontaktpunkt. Wenn dann die Kontaktprüfung abgeschlossen ist, die aus der Kontaktkinematik stammt, werden die Kontaktkräfte aufgebracht, die über die Normal- und Rutschgeschwindigkeiten im Kontaktpunkt berechnet werden. Eine Prüfung des durchdringenden Volumens, die immer sehr viel kleinere Werte als das Einzelvolumen eines Kontaktpartners ergeben muss, bricht bei zu großen Durchdringungen die Kontaktberechnung ab. Man kann zwischen zwei Hauptkontaktarten unterscheiden:

- impulsiver Kontakt (intermittierend):
Nach einer Kollision trennen sich die Kontaktpartner unter Änderung der Körperdynamiken. Die erste Phase ist Kompression wobei kinetische Energie in potentielle und Verlustenergie (Dämpfung) übergeht. Nach Abbau der kinetischen Energie dreht sich der Vorgang um und die zweite Phase beginnt – Dekompression.
- dauernder Kontakt (persistent):
Die Kontaktpartner haben hierbei für lange Zeitintervalle Kontakt zueinander, der durch auf die Körper von außen einwirkende Kräfte aufrechterhalten wird. Ein nichtlineares Feder-Dämpfer Element bildet

das Kontaktverhalten in Oberflächensteifigkeit und Energieverlust bei Verformung ab. Die Kontaktkräfte werden so für jeden Kontaktpunkt errechnet und aufsummiert.

Die Berechnung der Kontaktkraft kann nun mit dem `IMPACT` - oder `POISSON` - Modell (über Stoßziffer, hier nicht ausgeführt) erfolgen, s. Glg. 53. Diese Modelle resultieren aus einer penalty regularization (Regel für sog. Strafkraft) Technik. Dabei handelt es sich um eine mathematisch erzwungene Randbedingung durch aufbringen einer Kraft entlang des Gradienten der Randbedingung, deren Betrag eine Funktion der Regelverletzung ist.

Kontakt erfordert nun, dass sich die beiden Partner nicht durchdringen, was mit eben dieser Randbedingung erreicht werden kann. Die Kontaktkraft hängt also mit dem Erzwingen dieser Bedingung zusammen. Die Behandlung dieser zusätzlichen Randbedingung erfolgt mittels Lagrange Multiplikatoren oder penalty regularization. Die letztere Methode, die in ADAMS verwendet wird, hat den Vorteil der Einfachheit und keine zusätzlich notwendigen Gleichungen und Variablen. Anders gesagt werden in ADAMS alle Kontaktbedingungen durch penalty regularization erzwungen. Der Benutzer hat lediglich für die Wahl tauglicher Parameter zu sorgen – vor allem der Materialsteifigkeit. Vier Gleichungen beschreiben diese Randbedingungen:

- Undurchdringbarkeit zweier sich nähernder Körper, gemessen durch eine gap-Funktion g , mit positivem g für Durchdringung, führt zu $g \geq 0$.
- Die Kontaktnormalkraft F_n ist positiv für eine die Körper trennende Kraft $F_n > 0$.
- Die Kontaktnormalkraft ist nur bei Kontakt ungleich null $F_n \cdot g = 0$
- Und schließlich ist die Kontaktnormalkraft nur genau dann ungleich null, wenn die Bewegung der Körper zueinander (Trennungsgeschwindigkeit) null ist $F_n \cdot \frac{dg}{dt} = 0$.

Die ersten drei Hilfsregeln können zusammengefasst werden und man kann schreiben,

$$F_n = k \cdot g^e \quad \text{Glg. 51}$$

mit k als penalty- Parameter. Exakt wäre die Lösung mit unendlichem k , aber einerseits ist die Lösungsstabilität zu betrachten und andererseits möchte man oft das Materialverhalten und die Geometrie durch eine Steifigkeit annähern. ADAMS nähert nun dieses Verhalten mit der `IMPACT`-Funktion an:

$$F_n = k \cdot g^e + \text{STEP}(g, 0, 0, d_{\max}, c_{\max}) \cdot \frac{dg}{dt} \quad \text{Glg. 52}$$

$$\text{IMPACT} = \begin{cases} \text{Max}(0, k(x_1 - x)^e - \text{STEP}(x, x_1 - d, c_{\max}, x_1, 0) \cdot \dot{x}) & x < x_1 \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases}$$

Glg. 53

Bspw. ist dann die Kontaktkraft null wenn keine Durchdringung p vorliegt. Die Durchdringung beginnt an der Seite näher zum Marker J der ortsfesten

Oberfläche. Die Dämpfung ist eine kubische Funktion der Eindringtiefe p und ist maximal bei $p > d$. Die Kontaktkraft ist immer positiv und die Steifigkeit geht exponentiell zur Durchdringung ein, wobei $e > 2,1$ für numerische Stabilität zu wählen ist [ADA14].

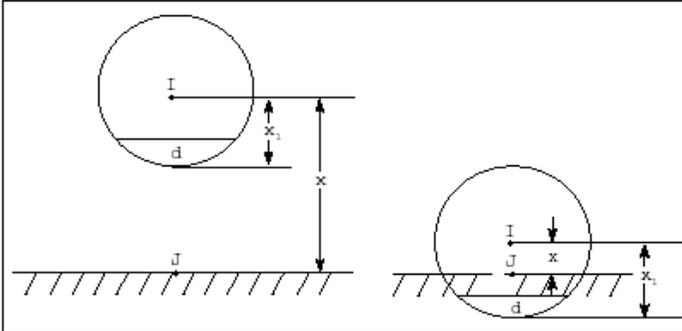


Bild 6.51: Größen der `IMPACT`-Funktion in ADAMS [ADA14]

Endlich ist noch das numerische Lösungsverfahren in ADAMS zu besprechen. Darin behandelt das Simulationswerkzeug das Kontaktproblem folgendermaßen:

- Kontakt-Predictor (Vorhersage) markiert den wahrscheinlichen Zeitpunkt des Auftretens von Kontakt und passt die Integrationsschrittweite an.
- Durchdringung und –geschwindigkeit werden berechnet woraus ein verfeinerter Kontaktzeitpunkt folgt.
- der aktuelle Zeitschritt wird verworfen und der verfeinerte herangezogen um den Kontaktzeitpunkt neu zu berechnen.
- Ordnung des Integrators wird auf 1 gesetzt, womit die Zeithistorie des Systems ausgeblendet wird (Einschrittverfahren).
- Somit bleibt die Durchdringung minimal.

Für die CAD-Geometrie stellt Hartmann [HAR02] fest, dass an sie hohe Anforderungen besonders der begrenzenden Oberflächen zu stellen sind, und sie mindestens zweifach stetig nach den Parametern differenzierbar sein müssen für Konvergenz der Numerik, die auf der Kollisionserkennung mit den Kontakt-Bindungsgleichungen aufbaut. Die in ADAMS vorzugsweise zu verwendende Parasolid-Geometrie erfüllt diese Anforderungen in der Regel.

6.8.3 Güter

Die Abbildung der Wechselwirkung zwischen transportiertem Stückgut und Transportorgan ist essenziell für die Beschreibung des gesamten Transportvorganges. Für die Einteilung der Güter [DIN 3569], deren Verpackung [DIN 55405] und das Ladewesen [DIN 30781] ist eine Fülle von Regelwerken bekannt. Für die Modellbildung sind daraus Gemeinsamkeiten ableitbar die wie folgt systematisiert werden können, wenn die Güter einzeln verpackt oder

unverpackt vorliegen und zu Ladeeinheiten oder auch nicht unifiziert sind; es wird für das so betrachtete Objekt der Begriff „Gut“ verwendet:

- starre, formstabile Güter (Beispiel: Kleinladungsträger als Ladehilfsmittel, Kiste)
- elastische und weitestgehend formstabile Güter (Beispiel: Kartonschachtel)
- formunstable Güter (Beispiel: verschweißte Textilien)

Für die Gruppe der formstabilen Güter ist im intralogistischen Prozess auch noch die Wechselwirkung zwischen Gut und Ladehilfsmittel zu betrachten, wenn zwischen Gut und Ladehilfsmittel Relativbewegungen möglich sind.

Die Wechselwirkung der Güter mit Förderern und anderen logistischen Gewerken kann nun mit der oberen Systematik wie folgt modelliert werden:

- starre, formstabile Güter:
Modellierung Gut als Starrkörper (ggf. Wechselwirkung im Falle eines Ladehilfsmittels mit seinem beinhaltenden Gut) mit Solid-Solid-Kontakt zum Förderer.
- elastische und weitestgehend formstabile Güter:
Modellierung Gut als flexibler Körper (im einfachsten Fall modal reduziert) mit Flex-Solid-Kontakt zum Förderer.
- formunstable Güter:
Modellierung nur über plastifizierbare Ansätze (nichtlineares Materialverhalten) möglich; Integration in ein MKS nach derzeitigem Stand nicht möglich. Betrachtung von relevanten Einzelvorgängen durch Übertragung der Randbedingungen aus MKS in einem nichtlinearen FEM-Programm.

Zum starren, formstabilen Gut (siehe Bild 6.52) sei angemerkt, dass bei der oben angegebenen Modellierung zwei ebene Flächen miteinander in Kontakt treten und der Algorithmus nach 6.8.2 kein eindeutiges Ergebnis liefern kann. Dafür wird empfohlen, dem Gut geometrisch auf der Aufstandsfläche höher gekrümmte Bereiche aufzuprägen (beispielsweise definierte Aufstandspunkte als Kugelkalotten), um Eindeutigkeit in der Lösung zu erreichen und diese zu beschleunigen.

Die Simulationswerkzeuge sind zwar durchaus in der Lage, auch zwei völlig ebene Flächen miteinander in Kontakt zu bringen, allerdings kommt es dabei stets zum undefinierten „Springen“ des einen Aufstandspunktes.

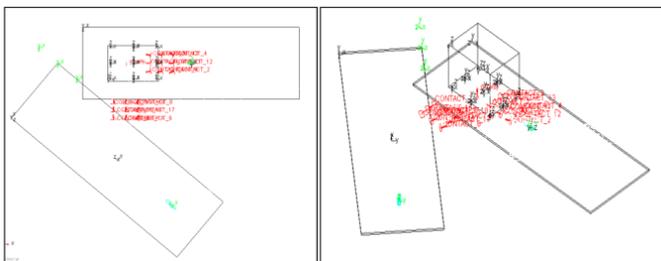


Bild 6.52: Einschleusen eines starren, formstabilen Behälters von einem Bandförderer auf einen weiteren [ADA14]

Neue Trends in der Modellbildung und Simulation bringen ein Verschwinden der Grenzen zwischen Stückgut und Schüttgut. Mit dem Aufkommen immer höherer Gutströme werden in der Logistik Stückgüter teilweise als Schüttgüter behandelt, wie in Bild 6.53 dargestellt. Methodisch kommt es hier vor allem aufgrund der hohen Anzahl an Körpern zu einem fließenden Übergang zwischen Mehrkörpersimulation und Diskrete-Elemente-Methode (DEM) zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der einzelnen Güter und jenes als Pulk. Erste Arbeiten geben Einblick in diese Ansätze [FWJ13], [CRR13]. Deren Potenzial ist aus aktueller Sicht als hoch einzuschätzen, da die mit schüttgut-ähnlicher Behandlung von Stückgut verbundenen komplexen Vorgänge in der Produktentwicklung nur durch Simulation im Vorfeld beherrschbar sind; der Aufwand für physische Modelle zur Grundlagenuntersuchung wäre hier unverhältnismäßig hoch (s. auch Kap. 6.8.7).

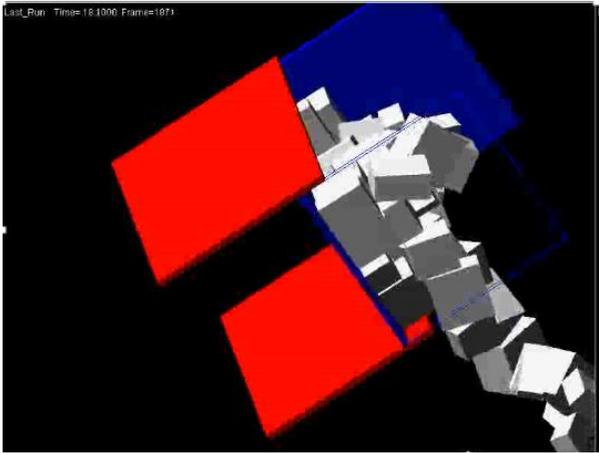


Bild 6.53: Entleerung von Paketen eines Wechselbehälters mit MKS [FWJ13]

6.8.4 Zugmittelgetriebe

Zugmittelgetriebe [FUN95], [NW03] sind häufige Kraftübertragungs- und Tragorgane der Technischen Logistik und der Fördertechnik im Speziellen. Durch die Errungenschaften der Werkstoffwissenschaften liegen diese Maschinenelemente der Materialflusstechnik mittlerweile in immer spezifischer Form dem Entwickler vor und die Lebensdauervorhersage ist durch empirische Versuche der Hersteller gut abgesichert.

Die folgenden Ausführungen stellen einen Beitrag zur Detailbetrachtung dynamischer Phänomene durch Modellbildung und Simulation von Zugmittelgetrieben dar. Weiters wird die Wechselwirkung zwischen Zugmittel und transportiertem Gut betrachtet, wenn es sich um die Bauform Zugmittelförderer (Ketten- und Bandförderer) handelt und das Zugmittelgetriebe eine Zug- und Tragfunktion erfüllen muss. Es lässt sich also grundsätzlich festhalten, dass in der Technischen Logistik folgende Funktion von Zugmittel(getriebe)n herangezogen wird:

- Antriebsfunktion:
Zwei- oder Mehrscheibenriebe zur Leistungsübertragung mit direktem An/Abtrieb oder tangentialer Anpressung des Zugmittels.
- Förderfunktion:
Zwei- oder Mehrscheibenriebe zur Förderung von Stück- oder Stückgut mit ein- oder mehrfachen Antrieben.

Die räumliche Anordnung der Zugmittel (mit- und ohne Tragfunktion) ist dabei horizontal als auch vertikal gekrümmt möglich und der Wert der Krümmung direkt zur Zug- und Tragfähigkeit des Zugmittels proportional.

Aufgrund der Unterschiedlichkeiten des Auftretens der Zugmittelgetriebe in der Technischen Logistik ist auch im modellbildnerischen Ansatz zu differenzieren zwischen den Möglichkeiten mit (vgl. dazu auch Bild 6.25):

- Mehrkörpersysteme mit flexiblen Körpern (modal reduziert oder „nodal“)
- Mehrkörpersysteme mit starren Körpern

Für beide Domänen der MKS wird kommerzielle Software angeboten und es sind auch ausreichend theoretische Grundlagen zur Weiterentwicklung und Adaption der Systeme vorhanden [BHC+11]. Auch und vor allem hier (vgl. auch Kap. 6.8.2) stellt sich wieder die Frage nach Nutzen und Aufwand der Modellbildung und Simulation sowie der technischen Möglichkeit und Sinnhaftigkeit. Während Teilbereiche von Anlagen der Technischen Logistik (wie beispielsweise Abschnitte von oder ganze Förderer) mit starren Mehrkörpersystemen noch abbildbar sind, kann eine Systembetrachtung mit Flexiblen nur mehr auf kleine Systemausschnitte beschränkt erfolgen, wobei die Wechselwirkung über die Systemgrenze hinaus vereinfacht oder mit Simulatorkopplung realisiert werden kann. Der Modellbildner und simulierende Ingenieur hat somit stets zu über Abbildungsgenauigkeit, Ergebnisqualität daraus und Aufwand eine Balance herzustellen.

Riemen, Bänder und Bandförderer

Band- und Riemtriebe mit Zug- und Tragfunktion gehören zu den kraftschlüssigen Zugmittelgetrieben und sind in der Stückgut- und Schüttgutförderertechnik vertreten. Das Band oder auch der Riemen ist eine homogene Struktur, die sich meist aus dem klassischen Aufbau von Laufschiene, Trägermaterial, Zugträger und Deckschiene zusammensetzt. Dieses Maschinenelement ist in allen Raumrichtungen flexibel, die Hauptverformung ist um Achsen normal zur und in der Ebene des Zugmittels. Dies stellt für die Modellbildung eine Herausforderung dar, mit Starrkörpern können nur Teilaspekte des Transportvorganges betrachtet werden; oftmals genügt dies aber.

Folgend wird eine Modellbildung von Bandförderern vorgestellt, die den Transport und die Übergabe von Stückgütern (oder Ein- und Ausschleusung von/zu nicht bewegten Objekten) [VDI 3618], [VDI 2340] von einem zu einem nächsten Förderer abbildet und dabei den Bewegungsvorgang des Gutes schwerpunktmäßig betrachtet. Auf die dynamischen Eigenschaften des Zugmittels kann damit nicht eingegangen werden, dies ist mit beispielsweise flexiblen Körpern oder approximierenden Gelenkstrukturen mit Verdrehsteifen möglich.

- Modellierung Förderer:
 - Ein Starrkörper (Quader) repräsentiert die Tragfunktion des Bandförderers.
 - Die Bewegung wird durch Kraft- oder Geschwindigkeitsvorgabe auf den Förderer erzeugt.
- Kontakt zum Stückgut:
 - Wird über einen Solid-Solid-Kontakt hergestellt (s. Kap. 6.8.2).
 - Das Stückgut wird als Starrkörper mittels geometrisch definierter Aufstandspunkte abgebildet (s. Kap. 6.8.3).
 - Der Kontakt wird zur Auf- Ab- oder Übergabe positionsgeregelt aktiviert und deaktiviert.
- Anmerkungen:
 - Der „Förderer“ kann damit ungehindert angrenzende weitere Förderer oder statische Übergabestellen durchdringen.
 - Die Wechselwirkung aus der Umlenkung des Zug/Tragmittels um eine Scheibe kann damit nicht abgebildet werden.

Bild 6.54 zeigt die oben beschriebene Modellbildung zur Simulation des Einschleusverhaltens eines Kleinladungsträgers (blau) von einem Band mit Geschwindigkeit v_1 auf ein weiteres unter 30° geneigtes mit Geschwindigkeit v_2 . In [C42] findet sich ein Vergleich unterschiedlicher Modellierungsarten (AS bzw. MKS – Definition s. „Simulationskonzepte“ Kap. 6.5.1).

Eine Herangehensweise mit finiten, sehr kleinen und gelenkig verbundenen Starrkörper-Abschnitten, die Bänder abbilden sollen, wird von den Herstellern mit div. Toolkits angeboten (MSC.ADAMS Machinery, RecurDyn BeltTool). Ihre Performance und Validität ist gegenwärtig Objekt der Überprüfung.

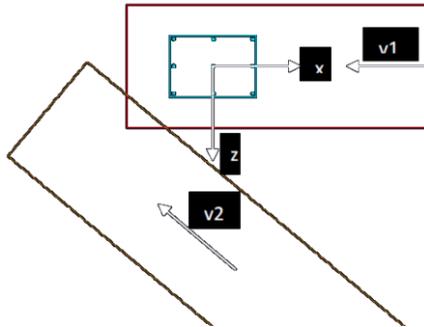


Bild 6.54: Beispiel einer Einschleusung oben angegebener Modellierung [P11]

Ketten und Kettenförderer

Die Literatur [RAC62], [NW03] differenziert die Ketten vor allem nach ihren Bauformen (analog der DIN-Bauformen) und nicht vorrangig nach deren Funktion. Für deren Modellbildung ist aber das funktionale Verhalten relevant und es kann prinzipiell unterschieden werden zwischen:

- Gelenkketten
- Rundstahlketten

Ähnlich wie bei den Riemen und Bändern kann den Ketten eine Zug- oder eine Zug/Tragfunktion zur Leistungsübertragung oder Förderung zugewiesen werden. Die Modellierung der Vorspannung durch Spannmechanismen ist hier ebenso bedeutend wie bei den Riemen und Bändern, um reale Betriebsverhältnisse abzubilden. Sie kann, dem konstruktiven Wirkprinzip entsprechend, als Kraftvorspannung oder Wegvorgabe (Verschiebung) modelliert werden. Relevant ist dabei, dem Modell genügend Einschwingzeit zu hinterlegen, um nicht durch die Spanneffekte Phänomene hervorzurufen, die im transienten Betrieb so nicht auftreten.

Die Gelenkkette ist aufgrund ihrer wenigen Freiheitsgrade prädestiniert für die Modellierung in MKS und viele Simulationswerkzeuge bieten fertige Toolboxes oder Zusatzmodule zur Modellbildung und Simulation an. Diese Entwicklung ist stark getrieben durch die Fahrzeugindustrie und die Verwendung im Verbrennungsmotor als Ventilsteuerkette. Auch aus der Entwicklung von Kettenfahrwerken existieren hervorragende Ansätze zur effizienten Modellbildung und Simulation von beispielsweise Panzerfahrwerksketten [FUN13]. Dafür wurden eigene Algorithmen zur effizienten Beherrschung der Simulation der dynamischen Vorgänge entwickelt [BHC+11].

Der Drehpunkt der Gelenkkettenglieder zueinander ist durch die Konstruktion der Kette vorgegeben und kann im MKS durch MKS-Gelenke starr oder elastisch mit und ohne Spiel und mit und ohne Reibung modelliert werden.

Die Rundstahlkette weist durch ihre Bauart keinen definierten Drehpunkt auf und ist auch raumbeweglich. Die Kettenglieder können aufeinander abrollen oder gleiten [P2], je nach angreifenden Lasten, Objektzuständen und der Systemdynamik. Eine Modellierung und Simulation ist hier nur mit Solid-Solid-Kontakten und den realen Kettengeometrien möglich, was ungleich aufwendiger ist als die Modellierung und vor allem Simulation von Gelenkketten (zur Modellbildung s. Bild 6.55). Die allgemeine Formulierung des Kontaktalgorithmus' gestattet das Berücksichtigen von Reibung zwischen den Rundstahlkettengliedern, die erheblich den Drehvorgang beeinflusst (Lage des Drehpunktes und wirkende Kräfte). Die Modellbildung und Simulation von Rundstahlketten zu Hebezwecken in Kettenhebezeugen ist ausführlich in [P1] beschrieben.

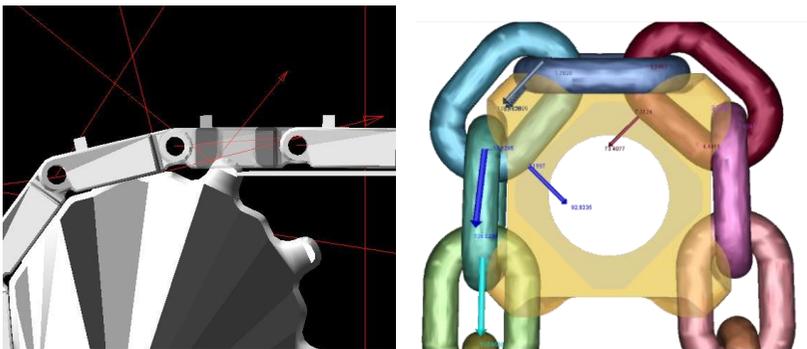


Bild 6.55: Raupenkettenfahrwerk (Gelenkkette) und Rundstahlkettentrieb (Details) in MKS

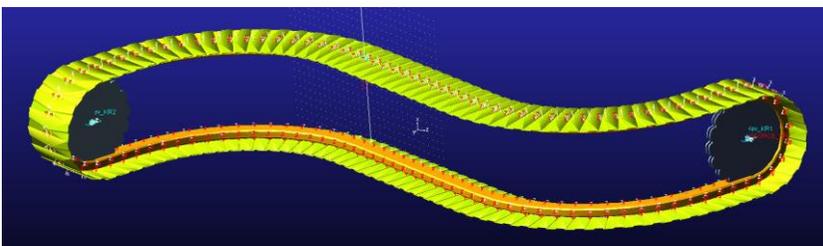
Beide Kettenarten können wiederum über feste Verbindungen oder Kontakte mit weiteren Objekten verbunden werden, womit die Abbildung von Förderern mit Tragfunktion – Tragkettenförderer – möglich wird.

Eine Besonderheit der Kettenförderer stellt der Plattenkettenförderer dar, da er einerseits eine Gelenkkette als Zugorgan besitzt, die Tragfunktion aber von Laufrollen in Schienensystemen übernommen wird. Dazu ist modellbildnerisch die Methodik der Gelenkketten mit jener des rollenden Rades (Kap. 6.8.5) zu kombinieren.



Bild 6.56: Plattenkettenförderer [VDI 2220] und MKS-Modell in MSC.ADAMS zur Analyse der Spurführungs- und Antriebskräfte

Mit dem MKS-Modell des Plattenkettenförderers (Modellbildung siehe Bild 6.56) können unterschiedlichste Aufbauten (Bild 6.57) durch skript-gesteuerte Generierung in kürzester Zeit erstellt werden, um beispielsweise Antriebsleistungen zu berechnen oder Wechselwirkungen zwischen Gut und Förderer zu untersuchen (nicht dargestellt). Durch die Abbildung der Wirkprinzipien der Kettenspannung im MKS kann der Einfluss der Kettenvorspannkraft auf den Betrieb der Anlage ermittelt werden. Daraus sind Zugkräfte im Kettenstrang und Stützkräfte auf das Schienensystem ableitbar, die zu einer optimierten und effizienten Dimensionierung der Bauteile führen. Mit im MKS simulierten Betriebsstrategien können natürlich Lastkollektive auf dimensionierungskritische Bauteile abgeleitet werden, um die Dauerhaltbarkeit zu gewährleisten.



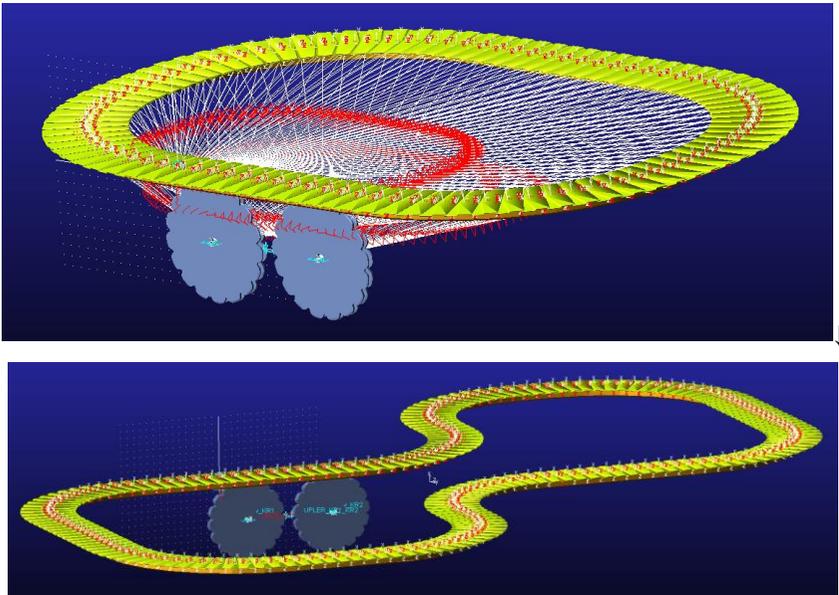


Bild 6.57: Settings eines Plattenkettenförderers in MKS (MCS.ADAMS)

Aktuell können mit dem noch nicht validierten Modell des Plattenkettenförderers Trends bei den unterschiedlichen Settings für die o.a. Untersuchungsziele qualitativ identifiziert werden. Da die quantitative Beurteilung der exakten Größen stets einer Validierung und einer Feintuning der Parameter bedarf ist von dieser noch abzusehen. Für die quantitativen Trends bietet das Modell aber im aktuellen Ausbauzustand schon ein wertvolles Instrument.

6.8.5 Rollen, Rollkontakt und Schienenführungen

6.8.5.1 Rad-Schiene System

Die Modellbildung des rollenden Rades ist in der Fördertechnik schon lange analytisch nachzuweisen [KPS75] und vernachlässigt alle der Theorie des Rad-Schiene-Systems hinterlegten Effekte der unterschiedlichsten Schlupffarten. Untersuchungsziele des Rad-Schiene-Systems in der Bahntechnik sind aufgrund hoher und höchster Geschwindigkeiten vielfältiger und daher ist die Modellbildung detaillierter (z. B. die Arbeiten von Polach zusammenfassend dargestellt in [KRA09]). Beispielsweise interessieren Schwingungsvorgänge des fördertechnischen Systems aus dem Lauf heraus oder auch die diversen Schlupfvorgänge zwischen Rad und Schiene nur marginal. Daher wird ein grundlegendes Minimalmodell für den Rad-Schiene-Kontakt herangezogen, wie es auch den analytischen Ansätzen von [KPS75] entspricht und in den einschlägigen MKS-Softwareprodukten effizient modellier- und berechenbar ist.

Modelliert wird für fördertechnische Belange lediglich, um den Fahrwiderstand errechnen zu können, ein Hebelarm der rollenden Reibung [JH12]. Dieses Modell

(Bild 6.58) lässt sich ebenso auf ortsfeste Fahrbahn und bewegtes Rad, wie auf ortsfestes Rad (Rolle) und bewegte Fahrbahn (Behälterstützfläche) anwenden. Kombiniert mit der Ermittlung der Kontaktkraft aus den MKS-Modellen (Bild 6.51 und Glg. 52) gelangt man so zu einem einfachen, aber aussagekräftigen Minimalmodell für den Fahrwiderstand im dynamischen Betrieb.

Je nach Modellierungstiefe und gewünschten Erkenntnissen ist grundsätzlich zu entscheiden ob man flexible Körper (s. Kap. 6.8.3) hinzuzieht (große ggf. modale Nachgiebigkeiten, die mit dem Kontaktansatz nach Glg. 52 nicht abbildbar sind), oder ob Starrkörperkinetik genügt.

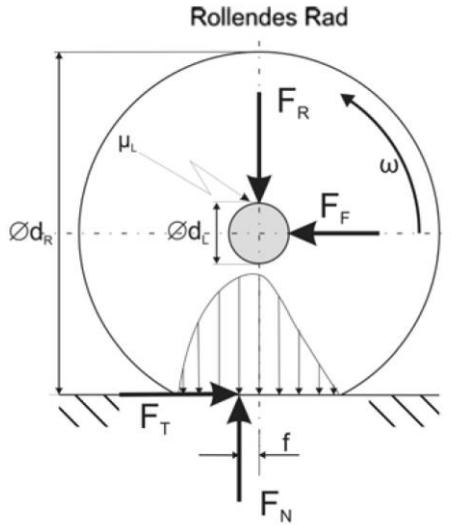


Bild 6.58: Modell der Rollreibung [JH12]

Mit der aus Glg. 52 zu jedem Zeitpunkt der Bewegung bekannten Radlast (Kontaktkraft) kann der Fahrwiderstand mit Glg. 54 berechnet werden [KPS75], [JH12]:

$$F_f = \frac{F_N}{d_R} \cdot (2 \cdot f + \mu_L \cdot d_L) \tag{Glg. 54}$$

Die geometrischen und kinetischen Bezeichnungen sind Bild 6.58 zu entnehmen. Die Parameter der Reibung μ_L und f sind im Einzelfall experimentell zu ermitteln. Für Laufräder typischer Sortieranlagen gibt [WIL98] für $f = 0,3 \div 0,5$ mm und [SCH87] für Wälzlagerungen $\mu_L = 0,3$ % an.

Für Schienenfahrzeuge ist das Thema des Rad-Schiene-Kontakts breit erarbeitet; nachfolgend sollen die Kontakttheorien³⁰¹ noch einmal in möglicher Kürze zusammengefasst werden (Originalquellen nach [POL15]):

³⁰¹ Dank für die Ausarbeitung dazu geht an meine Bacheloranden Franz Michael Eberhard und Christoph Kreis im Rahmen des Bachelorprojekts 2014.

- Die Lineare Theorie von Kalker ist durch die zweidimensionale Betrachtung sehr genau, ist jedoch nur für kleine Längs-, Quer-, und Bohrschlüpfе geeignet.
- Die vereinfachte Theorie von Kalker ist Grundlage für Kalker`s FASTSIM – Algorithmus. Die Rechenzeit ist im Vergleich zu seinen anderen Theorien sehr gut, im Vergleich mit anderen Methoden jedoch langsam.
- Die Theorie von JOHNSON und VERMEULEN ist die Weiterentwicklung der Theorie von CARTER in den dreidimensionalen Raum, der Bohrschlupf wird jedoch auch hier vernachlässigt.

Tabelle 26: Rad-Schiene-Kontakttheorien im Vergleich

	exakte Kalker	lineare Kalker	vereinfachte Kalker	Carter	Johnson u. Vermeulen
Schlupf (Schl.)	Längsschl., Querschl., Bohrschl.	Kleine Längs-, Quer-, und Bohrschlüpfе	Längsschl., Querschl., Bohrschl.	Längsschl.	Längsschl. und Querschl.
Kontakt-gebiet	Haftgebiet und Gleitgebiet	Haftgebiet	Haftgebiet und Gleitgebiet	Haftgebiet und Gleitgebiet	Haftgebiet und Gleitgebiet
Rechenzeit	Lang	Akzeptabel	Befriedigend	Akzeptabel	Akzeptabel
Raum	2 D	2 D	2 D	2 D	3 D

Bild 6.59 zeigt abschließend und übersichtlich die Stärken der unterschiedlichen Theorien im umgekehrten Schulnotensystem mit „5“ für die beste Eignung bzw. Beschreibung.

Die angegebenen Rad-Schiene-Theorien sind den bei Schienenfahrzeugen herrschenden „hohen Kontaktdrücken“ vorbehalten, die in der Technischen Logistik lediglich bei Kranlaufrädern auftreten. Bei Fahrwägen von bspw. Verteilförderern von Sortieranlagen kommen dies nicht zu Stande und es kann die o.a. Methode der 3D-Kontakte verwendet werden (Kap. 6.8.2).

Mit dem gegenwärtigen Stand der 3D-Kontakt-Modellbildung können je nach Fahrwerkstyp (Bild 6.60) bspw. die Kontakt- und Spurführungskräfte hinreichend genau ermittelt werden, um in unterschiedlichen Szenarien die Auswirkungen innerer und äußerer Einflüsse (z.B. Schienenstöße) auf das Verhalten des Fahrwerkes zu beurteilen. Die einzelnen Fahrwerkswägen sind dann mit den entsprechenden Verbindungen, gemäß einer induktiven Modellbildung, zu einem Endloszug verbunden und können mit bedienenden Technologien (Ein/Ausschleusung) ausgestattet werden.

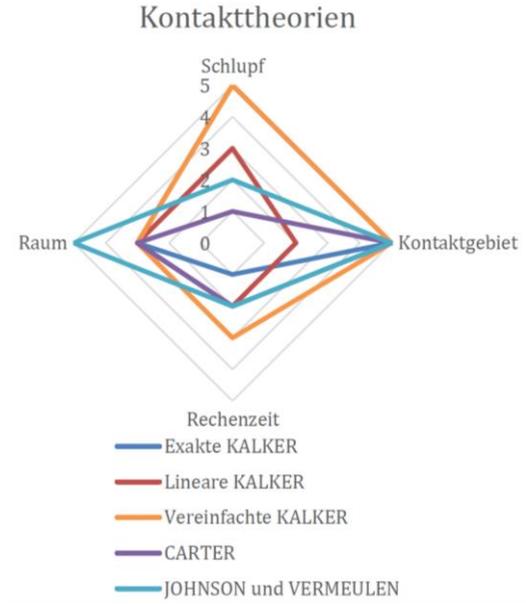


Bild 6.59: Netzdiagramm Rad-Schiene-Kontakttheorien

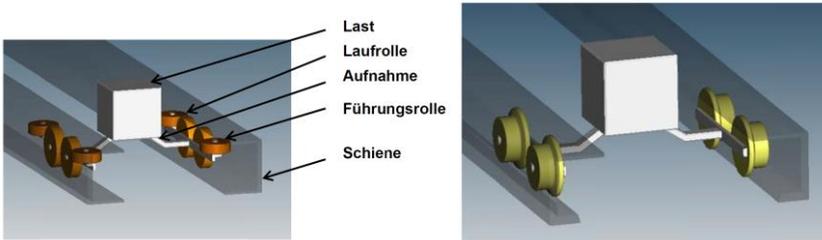


Bild 6.60: CAD-Modelle von Fahrwerken einzelner Verteilfördererwägen

6.8.5.2 Rollen und Rollenförderer

Das Minimalmodell, wie für das Rad-Schiene-System oben dargestellt, kann auch für die Abbildung der Vorgänge zwischen Behältern und ortsfest-drehbaren Rollen herangezogen werden. Damit lassen sich angetriebene (mit den verschiedensten Übertriebsprinzipien) und nichtangetriebene Rollenförderer und -bahnen modellieren, um das Verhalten der Ladungsträger darauf in unterschiedlichen Szenarien (Last, Verteilung der Last, äußere Einflüsse, ...) zu analysieren.

6.8.6 Ein- und Ausschleusen

Während bisher von der fördertechnischen Hauptfunktion „transportieren“ die Teilfunktion „fördern = tragen + bewegen“ beschrieben wurde, sind hier noch die bedienenden Technologien „Einschleusen“ und „Ausschleusen“ zu erläutern. Für deren physikalische Effekte können die o. a. Grundprinzipien (v. a. Bandtriebe und Kontakte) kombiniert werden, um alle dabei auftretenden relevanten physikalischen Effekte abzubilden. Einen systematischen Überblick darüber gibt [LAN14a].

Für eine möglichst breite Einsicht in hochdynamische Vorgänge der Stückgut-Intralogistik mit Stetigförderern hat sich die unabhängige Variation der folgenden Parameter und Größen der Systeme als zielführend erwiesen:

- Variation der Geschwindigkeiten aller bewegten Komponenten (v. a. Fördergeschwindigkeit und Ein-/Ausschleusgeschwindigkeit)
- Variation der Masse in den Ladungsträgern (leer bis voll in vier Stufen)
- Variation der Position der Massen in den Ladungsträgern (bis zu neun „Quadranten“ bei einzelnen Massen in Behältern, kann verringert werden, wenn die Behälter voller werden)
- Variation der Reibungen aller Kontaktpartner $\pm 50\%$ um verschiedene Lebenszykluszustände abzubilden (neu bis verschlissen)

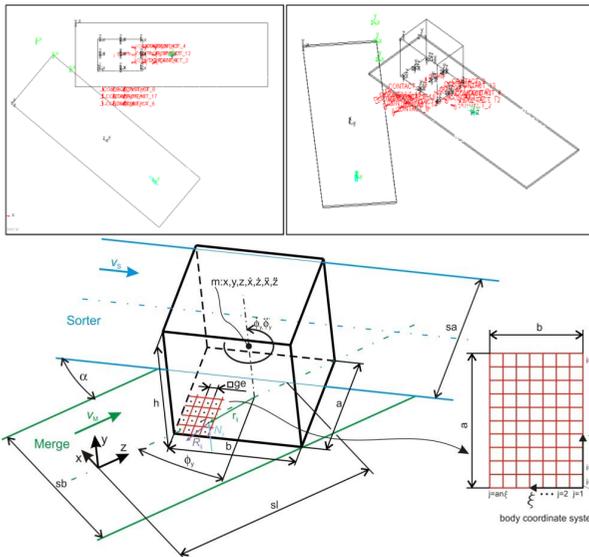


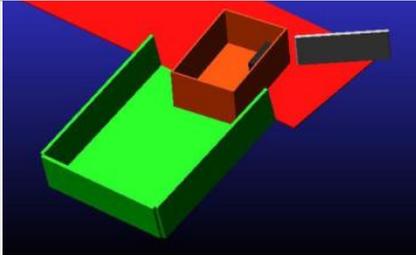
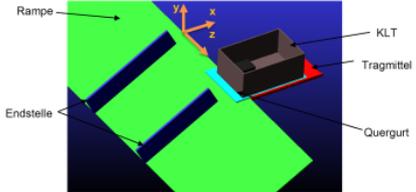
Bild 6.61: MKS- (MSC.ADAMS) und analytisches Modell eines Einschleusvorganges [P11]

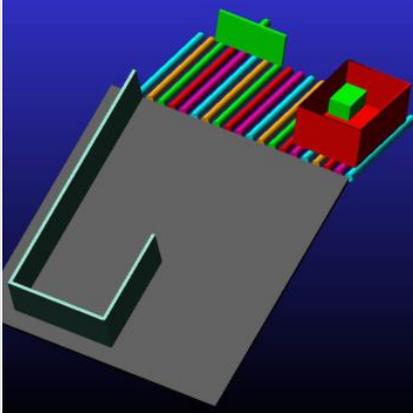
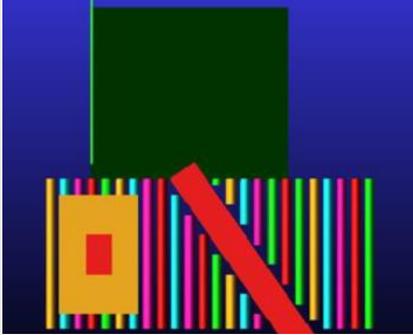
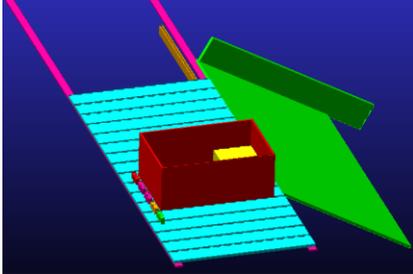
Für das Einschleusen wurde bisher das Setting nach Bild 6.61 untersucht. Im Vergleich eines MKS-Modells (3D) mit einem ebenen analytischen Ansatz (2D) zeigt sich weitestgehende Übereinstimmung der kinematischen und kinetischen Größen, obwohl die Diskretisierung der Aufstandspunkte im MKS gröber als im analytischen Ansatz gewählt wurde [P11].

Modellbildnerisch relevant in MKS ist die vorzugebende Diskretisierung und Aufbereitung der Berührfläche des Behälters, um plausible Kontaktkräfte zu erhalten. Gewählt wurde ein Ansatz mit ideal kleinen Kalotten, zur Definition eindeutiger Aufstandspunkte, da es im Fall der Berührung zweier komplette ebener Flächen mit dem Ansatz aus Kap. 6.8.2 zu undefinierten Kontaktpunkten und unverhältnismäßig hohen Kräften kommen kann.

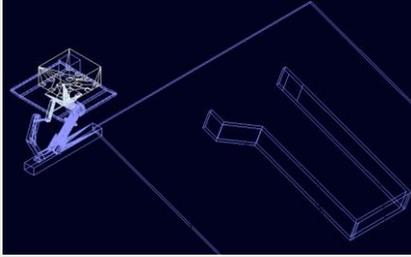
Für das Ausschleusen konnten unter Beachtung der Variations-Gesichtspunkte von oben unterschiedlichste Settings bereits analysiert werden (s. [P11]). Ziel der Simulation war dabei stets, die Funktionssicherheit des Mechanismus' im gesamten Parameterbereich zu gewährleisten und konstruktive Optimierungen zu identifizieren (z.B. Verringerung der Breite von Endstellen). Die Benennung der Technologien orientiert sich an der Systematik von [JH12] und ist hauptsächlich dem Bereich der Sortiertechnik zuzuordnen. Tabelle 27 gibt einen Überblick über die Modellbildung und die Simulationsziele einiger Ausschleusmechanismen.

Tabelle 27: MKS-Modelle (MSC.ADAMS) für Ausschleusvorgänge

Techno- logie	Bild MKS-MODELL (MSC.ADAMS)	Beschreibung
Flipper		<p>Behälter auf Bandförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Flippermechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
Quergurtsorter		<p>Behälter auf bewegtem Tablar mit Bandförderer zur Ausschleusung mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>

<p>Pusher</p>		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Pushermechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
<p>Bandabweise</p>		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Flipper- und Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
<p>Gurtransfer</p>		<p>Behälter auf Rollenförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der Bandmechanik und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>
<p>Schuhsorter</p>		<p>Behälter auf Bandförderer mit Endstelle.</p> <p>Abbildung der bewegten Schuhe und Fahrbewegung.</p> <p>Analyse des Abwurfverhaltens: Kräfte, Orientierung Behälter, Geometrien.</p>

Kippschalensorter



Kippschalensorter-
wagen
mit Endstelle.

Abbildung der
Kippmechanik und
Fahrbewegung.

Analyse des
Abwurfverhaltens: Kräfte,
Orientierung Behälter,
Geometrien.

6.8.7 Exkurs DEM

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist ein numerisches Berechnungsverfahren mit der die Bewegung einer großen Zahl von Teilchen beschrieben werden kann. Durch die Verbindung der vorrangig kugelförmigen Teilchen untereinander können beliebige geometrische Strukturen abgebildet werden. Sie ist eine der ältesten numerischen Methoden und neben FEM teilweise in Vergessenheit geraten [INS14]. DEM wird zur Risssimulation, seit neustem für numerische Lebensdauerabschätzung und die Simulation loser Partikel eingesetzt [INS14]. Die Theorie der DEM ist allen voran in [MUN04] herausgearbeitet und dargestellt.

Es liegt der Ansatz nahe, die DEM-Methode zur Abbildung von Systemen mit einer großen Anzahl von Teilchen bzw. Teilen in der Materialflusstechnik zu verwenden [FWJ13], [CRR13]. Die Notwendigkeit dafür liegt in der Beherrschung der Teilmengen bei akzeptablen Rechenzeiten. Somit kann „Stückgut als Schüttgut“ [CRR13] betrachtet werden und die große Anzahl von Gütern wird numerisch bearbeitbar. Die Gutparameter lassen sich über die Parameter der Kontaktmodelle der Einzelteilchen in DEM global (für den Stückgutstrom) als auch lokal (für das Verhalten des einzelnen Paketes) an die Realität in einem Validierungszyklus anpassen.

Die Rechenzeit-Unterschiede für die Simulation mit DEM bzw. MKS der Entleerung eines Pakete-Wechselbehälters (Bild 6.53) gibt [FWJ13] wieder. Ab einer Paketzahl von 90 ist die Rechendauer der DEM-Simulation kürzer, wobei jene der MKS exponentiell, jene der DEM linear zunimmt. Modellbildnerische Vorteile der MKS gegenüber der DEM werden in der detaillierteren Beschreibbarkeit der Oberflächen mit MKS, gegenüber den agglomerierten Kugeln der DEM gesehen [FWJ13]. Alternativ zur Starrkörpermodellierung mit beiden Systemen können auch flexible Körper in Betracht gezogen werden. Entweder durch Vernetzung der Pakete nach der Finite-Elemente-Methode in MKS oder durch Ersetzen der starren Kugelverbindungen durch sogenannte Bonds in der DEM.

„Module der Fördertechnik sind im Allgemeinen Mehrkörpersysteme, die mit Werkzeugen der Mehrkörpersimulation (MKS) abgebildet werden können. Für die Ermittlung der Belastungen auf Paket und Fördertechnik bietet sich die Vernetzung über die Finite-Elemente-Methode (FEM) an und geht man von interagierenden Paketen bis zu 1000 Stück aus, ist aufgrund der großen Anzahl von Kontakten die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) zu fokussieren. Einige

Anbieter von Simulationssoftware bieten für Überschneidungsbereiche Lösungen an, beispielsweise können bestimmte MKS-Tools mit einer größeren Menge an Kontakten umgehen oder DEM-Tools komplexere Körper integrieren, deren Freiheitsgrade entsprechend der MKS-Methode mit Einschränkungen und Zwangsbedingungen versehen werden können.“ [FWJ13]

Tabelle 28 stellt die Grundeigenschaften und Randbedingungen der Methoden FEM, MKS und DEM gegenüber. Betrachtet man die Bewegung eines Paketpuls noch als Fließvorgang, wäre auch die Methode CFD (Computational Fluid Dynamics) zur Beschreibung möglich [FWJ13].

Tabelle 28: Simulationmethoden und deren Eigenschaften [FWJ13] dort in Anlehnung an [VWB+09]

	FEM	MKS	DEM
Modellelemente	finite Elemente, Netzbildung	Einzelkörper, Kopplungselemente	Einzelkörper, Kontaktdefinition, Bindungen
Anzahl der Körper	~ 1	≤ 1e2	≤ 1e9
Anzahl der Freiheitsgrade	hoch	niedrig	niedrig
Körperbewegung	klein	groß	groß
Übertragung von Kräften	über Element-Knoten	über Kopplungselemente, Kontakte	über Kontakt- und Bin- dungskräfte, elektrische und chemische Potenziale
Zielsystem	Einzelkörper	Gekoppelte mechanische Systeme	Nicht gekoppelte Vielkörpersysteme
Anwendungszweck, Zielgrößen	Verformungen, Spannungen	Bewegungen, Kraftgrößen	Bewegungen, Kraftgrößen, Spannungen, Verformungen
Anwendungsbeispiel	Spannungsverteilung an einer belasteten Welle	Schwingungsanalyse eines Fahrwerks	Bunkeraustrag in der Schüttgutmechanik

[FWLJ15] setzt die Arbeiten von [FWJ13] fort und zeigt bereits die gute Eignung der DEM für die Modellierung von pulkförmigen gehandhabten Stückgütern durch die Übereinstimmung von Prüfstandsversuchen mit den DEM-Simulationen.

6.9 Aspekte der Arbeit mit FEM und MKS-Simulationsmodellen

„Die hinzugekommenen computergestützten Werkzeuge haben die Produktentwicklung stark in den virtuellen Bereich verlagert. Viele Möglichkeiten, die CAx-Systeme bieten, sind mit den herkömmlich verwendeten Methoden nicht vereinbar. Seitens der Softwarehersteller werden sichere Lösungen der Problemstellungen versprochen, der korrekte Umgang mit der Software wird jedoch in die Verantwortlichkeit des Benutzers gelegt. Hieraus resultieren diverse Probleme:

- Die Schulung der Anwender hält nicht mit dem Tempo mit, in dem die Leitungsfähigkeit der Software steigt, für realistische Simulationen ist immer noch zeitaufwendiges Einarbeiten nötig. Zudem erfolgen Aktualisierungen der Programme in zu kurzen Zyklen, die Versionsverbesserungen bringen unweigerlich eine geänderte Oberfläche mit sich, welche das Auffinden von Funktionen oder die Verwendung alter Datenbestände erschwert. ...
- ... Die Interpretation der Ergebnisse und die Abstraktion des Modells sind elementar für die Aussagekraft der Simulation. Das Rechnermodell stellt immer einen idealisierten Zustand der Realität dar und gibt die Unschärfe der Eingangsdaten weiter. Materialeinflüsse, wie Fertigungsungenauigkeiten (Werkzeugauslaufe, Rauheiten), unzureichende Materialdaten (Kennwertermittlung beim Rohstoffhersteller) oder geänderte Belastungskollektive können in der Simulation nicht berücksichtigt werden.
- Der Einsatz numerischer Methoden bedingt eine kritische Hinterfragung der Genauigkeit der Ergebnisse. Untersuchungen der Eindeutigkeit der Lösung einer numerischen Rechenmethode sind in kommerziellen Softwarelösungen nicht vorgesehen. So können eine fehlende Konvergenz der Simulation oder zu wenig Iterationen zwar ein visuelles Ergebnis liefern, den realen Sachverhalt aber komplett verfehlen.

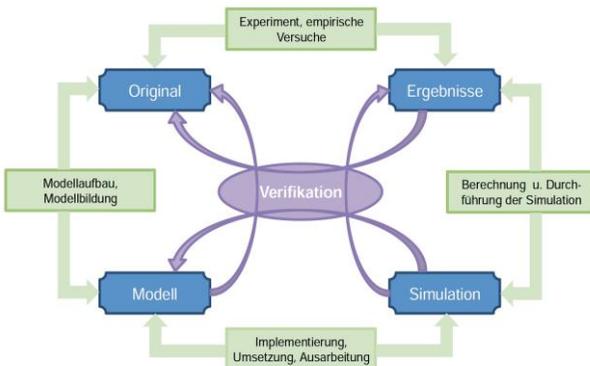


Bild 6.62: Die Stellung der Simulation innerhalb der Produktentwicklung [RS12]

Die Simulation kann bei richtiger Anwendung die Produktentwicklung vereinfachen und verbilligen, allerdings ist weiterhin der reale Versuch unumgänglich und bildet mit dem virtuellen Versuch eine Einheit.“ [RS12] Bild 6.62 widerspiegelt die Stellung der Simulation in der PE. Die folgenden Ausführungen richten sich an die im Bild 6.62 abgebildeten Kategorien „Verifikation“, „Ergebnisse“ und „Berechnung“, „Modellbildung“. Dazu sei auch noch auf Kap. 6.4 und 6.5 verwiesen.

6.9.1 Anforderungen an Simulierende

Die Ausführungen sind größtenteils eigene Erfahrungen im Umgang mit Simulation und simulierenden Ingenieuren. [VWB+09] führt eine taxative Liste für die Interpretation und Auswertung von FEM-Berechnungsergebnissen an

6.9.1.1 Qualitätsanforderungen an Ingenieure die mit Modellbildung und Simulation betraut sind

Es sind vor allem zwei Dinge, die den Arbeitsalltag eines Ingenieurs im Bereich Modellbildung und Simulation treffen. Das ist einerseits die große Themenvielfalt der zum Teil konstruktionsintegrierten Berechnungen, die eine nur geringe Detailwissenstiefe erlauben (v.a. aufgrund mangelnder methodischer Einsichtsmöglichkeit in viele CAD-integrierte Systeme). Und das ist andererseits der Prozess des simultaneous engineering (bzw. concurrent eng.) bzw. des frontloadings und rapid prototyping, wie heute weitverbreitet, die dem Entwicklungsingenieur keine Detailtiefe in seinen Überlegungen bzw. die Fokussierung auf Einzelthemen erlauben, da meist die Einarbeitungszeit für die umfangreichen Fachthemen nicht zur Verfügung steht. Besteht nun eine Berechnungsabteilung überhaupt nur aus Konstrukteuren, wie in der Materialflusstechnik üblich, so ist die Breite der durchzuführenden Analysen vorrangig gegenüber der Tiefe, womit Eigenlösungen in Form von Software so gut wie nie zu finden sind, ganz im Gegensatz zu den die Simulationswelt antreibenden Branchen wie Fahrzeug- und Consumerproduktindustrie. Selten werden in Zusammenarbeit mit Softwarehäusern Adaptierungen und Implementierungen an den kommerziell verfügbaren Tools vorgenommen, wo es hauptsächlich um die Simulationsprozessautomatisierung geht. Daraus ergibt sich der Konnex der Produktentwicklung und angewandten Forschung der Industrie mit den Herstellern von Berechnungstools. Hierin ist die entwickelnde und forschende Seite der Materialflusstechnik vielmehr Innovationstreiber an für sie maßgeschneiderten Software-Produkten (bzw. beginnt es zu sein), als Eigenentwickler von Lösungen. Das bedeutet aber wiederum nicht, dass diese Forschung abseits der Software-Welt basiert, ihre Ziele und Trends sind vielmehr in viele Produkte unsichtbar einverwoben. Eine Entstehung eines kommerziell erfolgreichen Einzelproduktes – wie im Falle des koreanischen MKS-Programmes RecurDyn [REC08] aus der Panzerfahrwerkssimulation – ist aufgrund der geringeren eingesetzten Mittel in diesem Fachbereich undenkbar, die daraus entstandenen Ketten-Modelle für die Fördertechnik aber gut verwendbar.

Nach [VWB+09] kann man einige Aspekte der Qualitätsanforderung zitieren. „Prinzipiell zeichnet den guten „Modellbildner“ aus, dass er einerseits Erfahrung im Bereich Modellbildung/ Simulation bzw. Versuchstechnik/ Messtechnik mitbringt und andererseits gute Kenntnisse über das zu untersuchende System

besitzt. Zusammen mit einer systematischen und methodenunterstützten Arbeitsweise sind diese hilfreich für die Anforderungsspezifikation. Gute Modellbildung bedeutet: „Das Richtige weglassen.“ Folgende Basisqualifikation muss/soll der „Modellbildner“ mitbringen (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

- Eingehende Kenntnis über das zu untersuchende System, weil sonst nicht entschieden werden kann, was vernachlässigt („weggelassen“) werden kann
- Kenntnis und Beherrschung der zur Verfügung stehenden Methoden und Werkzeuge für Modellierung und Simulation bzw. Versuchstechnik/ Messtechnik
- Erfahrung bei der Auswahl eines geeigneten Modells (Kosten, Zeit, Aussagefähigkeit der Modellergebnisse)
- Kreativität bei der Erstellung (Abgrenzung, Definition) des Modells
- Übung in der Interpretation von Ergebnissen: Dies bedeutet, Ergebnisse „richtig“ zu interpretieren, d. h. unter anderem zwischen physikalischen Effekten und Artefakten (z.B. Messfehlern bzw. numerischen Effekten) unterscheiden zu können.

Abhängig von der Aufgabenstellung (Domänen, Zweck, Nutzen-Aufwand) steht zur Modellbildung eine Vielzahl von rechnerunterstützten Hilfsmitteln (z.B. CAx-Systemen zur Modellbildung) zur Verfügung.“

6.9.1.2 Anforderungen an das FEM bzw. MKS Systemverständnis des modellbildenden und Ingenieurs

Aus Sicht des Autors stellt sich eine kleine Anforderungsliste, über deren Begriffe die simulierende Ingenieure Bescheid wissen sollten, die auf die Simulationsbereiche mittels MKS und FEM-Strukturberechnung anwendbar ist. Einen Einblick in die dieser Liste zugrundeliegende „Fachtiefe“ bietet Kapitel 6.8.1 für den Bereich „Lösung“.

- 
- **Möglichkeiten**
 - Leistungsumfang (Rechenkapazität vs. Elementanzahl)
 - Schnittstellen zu geometrienerzeugenden Programmen – CAD
 - **Programmkonzept**
 - Submodelltechniken, Modellierungsautomatisierung, Parameterverwaltung
 - Bibliotheken vorkonfektionierter Elemente
 - user-written subroutines und Gleichungen
 - **Abgrenzung zu anderen Programmen**
 - **Ergebnisexport**
 - Datenweiterverarbeitung und –visualisierung sowie Übergabe von Schnittstellengrößen (Dynamiklasten in stat. Strukturberechnung wenn sequentielle Simulation in untersch. Programmen)
 - Simulation Content Management (Einbindung der ges. Simulationsdaten in PLM-Systeme und standardisierte Dokumentation)
-



- **Modellbildung**
 - Ersatzmodell
 - Grundverständnis des realen Modellobjekts (erwartetes Bewegungs- bzw. Verformungsverhalten)
 - Einfluss der Randbedingungen (z.B. Punktlast vs. Flächenlast)
 - induktive od. deduktive Vorgehensweise
 - richtige Einschätzung des notwendigen Abstraktionsgrades (abhängig vom darzustellenden Ergebnis)
 - Synthese von gültigen Teilmodellen
 - Werkstoff- und Geometrieigenschaften
 - Nichtlinearitäten erkennen (geometrische, werkstoffbedingte) und richtig bewertet einsetzen (Vernachlässigung vs. aufwändiges nichtlin. Modell)
 - geeignete CAD-Geometrieformate zum Austausch auswählen
 - Kopplungsnotwendigkeit zu anderen physikalischen Domänen (Regler, elektrische Einflüsse, ...)
 - **Theorie hinter den beschreibenden Funktionen**
 - Verständnis beschreibende Gleichungen hinter vorkonfektionierten Objekten (v.a. Einflussabschätzung: z.B. linear, quadratisch, ...)
 - Einfluss der Parameter in den beschreibenden Gleichungen
 - Kopplungsvorschriften einzelner Elemente (z.B. rigid – flex – contact)
 - Verständnis von abstrahierenden Prozessen wie Netzerstellung, und Kontaktdefinition
-



- **Rechenprinzip** (Lösung einer numerischen Integrationsvorschrift mit Nullstellenverfahren)
 - **Unterschiede numerischer Lösungsverfahren** (Stabilität und Fehler f. unterschiedliche System steifer – BDF-Verfahren – und nichtsteifer Art)
 - **Steuerparameter des Lösungsverfahrens**
 - Schrittweite (wesentlich zur Auflösung gesuchter Frequenzen – Abtasttheorem) mit ggf. ereignisbasierter Schrittweitensteuerung
 - Genauigkeit – Fehler
 - Polynomgrad, Indexreduktion
 - **Solver(zeit)dominierende Prozesse erkennen** (z.B. kleine Massen mit hohen Steifen)
 - **Zusammenspiel Hardware – Solver**
-



- **Validierung**
 - Messung repräsentativer Größen (Dehnung, Beschleunigung) an Teil- od. Gesamtsystem
 - Analytik (Festigkeitslehre, Dynamik)
 - Extremverhalten (Austesten des Simulationsmodells in Richtung ingenieurmäßig zu erwartendes Verhalten und Beobachtung der Systemantwort: exemplarische Versteifung von Komponenten, Nullkraft aufbringen, Randbedingungen ändern)
 - **Vergleichs- und Analysekonzepte**
 - FEM-Struktur: nicht Beschränkung auf Vergleich Vergleichsspannung mit Werkstoff-Streckgrenzen (vgl. örtliches Konzept mit Konstruktionsfaktoren - Bauteilfestigkeiten, ... [FOR03])
 - FEM-Struktur: Dauerfestigkeitsbetrachtung meistens nötig
 - Dynamik: richtige Bewertung von Bewegungsgrößen die Bewegung bzw. nur Schall erzeugen
 - FFT (statt Darstellung im Zeitbereich)
 - Animation von Verformungen und Bewegungen und optische Plausibilitätskontrolle
-



- **Parameterstudien für Konstruktionsvarianten** (Systemverhalten in unterschiedlichsten Situationen - Robustheitsanalysen)
 - **Analyse und Nachrechnung existierender Systeme f. geforderte Nachweise**
 - **Visualisierung von Vorgängen**
 - Problemverständnis vertiefen (v.a. bei FEM und flexMKS kann aus einem Modell ein zuvor nicht erkennbares Verhalten folgen – im Gegensatz zur signalflussorientierten Sim)
 - Produktpräsentation
-

Aus dem Definitionsversuch dieser keineswegs vollständigen Liste können nun Aus- und Weiterbildungsprogramme erarbeitet werden und der Anwender von Simulation kann in seiner Praxis versuchen, sich und sein Know-how zu positionieren und Lücken und Zusatzkenntnisse zu erkennen. Wenn man sich nun das Programm für Schulungen der Software-Hersteller bzw. Ausbildungsprogramme sowie vor allem die verfügbare Literatur ansieht, so muss man leider feststellen, dass keineswegs ein Ingenieur in seinem Wissen Vertiefung erfahren kann, sondern dass vielmehr theoretische Literatur zur Erstellung von neuen Systemen bzw. reine Programmschulungen (wo-wofür-klicken!) dominieren. Nur selten wird die Funktionstheorie der Modellobjekte und noch seltener die Solver dahinter in einer vernünftig (v.a. hinsichtlich Einarbeitungszeit und –aufwand) verständlichen Weise beleuchtet. Ausbildungsbedarf stellt sich auch noch am Gebiete der Zieldefintion von Simulationen, die ja den Lösungsweg und v.a. die Modellbildung bestimmen, hinsichtlich Modellbildung und Werkstoffverhalten sowie am Gebiet der Ergebnisinterpretation.

Diese Listung könnte als Herausforderung für erfahrene Anwender dienen, die sich im Laufe ihrer Arbeit ein fundiertes und ausreichendes Theoriewissen erarbeitet haben, ein ingenieurtaugliches Buch über die in obiger Anforderungsliste definierten Aufgaben in mittlerer Detailtiefe zu verfassen. Als positives Beispiel sie hier [STE04a] sowie einige online-Programmhilfen genannt, denn nicht Literatur zum Programmieren eines Simulationssystems sondern jene für erfolgreiche Anwendung wäre für Ingenieure nötig.

6.9.2 Analysemöglichkeiten

Der nach Bild 6.63 stets zu durchlaufende Prozess der Systemanalyse mit Simulation kann unterschiedliche Ziele verfolgen. [EM13] spricht in diesem Kontext etwas allgemeiner von Berechnungsarten (Definitionen s. Kap. 6.9.3.2) und man kann erweitert mit [VDI 2211] unterteilen in:

- Auslegungsberechnung
- Nachrechnung
- Optimierungsrechnungen

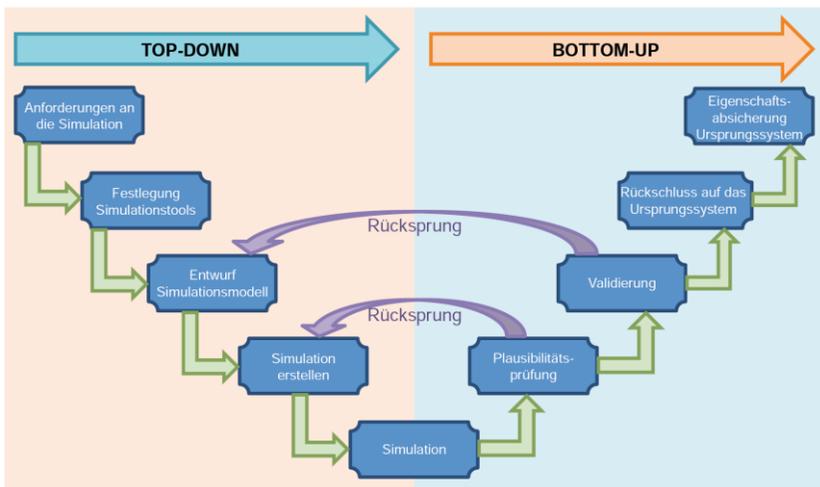


Bild 6.63: Möglichkeiten der Systemanalyse [RS12] nach [VDI 3633]

Zu den Optimierungsrechnungen zählen die Sensitivitätsanalysen und Strukturoptimierungen (Kap. 6.9.2.1, 6.9.2.2). Für diese und die Auslegungs- als auch Nachrechnung sind Hinweise der Interpretation und Bewertung der Ergebnisse in Kap. 6.9.3 und 6.9.3.2 angegeben.

6.9.2.1 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalyse ist nicht nur der Modellbildung und Simulation zuzuordnen. Sie wird allgemein eingesetzt, um die „die Auswirkungen einer innerhalb eines als zulässig erachteten Rahmens vorgenommenen Parametervariation auf das Endergebnis hinsichtlich der Gültigkeit und Richtigkeit

sowie der Empfindlichkeit gegenüber den Parametervariationen zu überprüfen.“ [LIN05] Sie wird zur Entscheidungsvorbereitung bei fast allen Verfahren der Bewertung angewandt. Sie ist vorrangig vorzunehmen, wenn die Aussagen aus bestimmten Gründen mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind. [LIN05].

Im Kontext der Analyse technischer Systeme mit Modellbildung und Simulation werden bei der Sensitivitätsanalyse Eingabewerte des Modells verändert und die Auswirkungen auf Ausgabewerte bestimmt. „Die Richtung der Auswirkung muss mit Beobachtungen in der Realität übereinstimmen. Besonders kritisch betrachtet werden müssen „sensitive Parameter“, bei denen kleine Änderungen starke Schwankungen der Ergebnisgrößen bewirken. Bei der Untersuchung ist zu beachten, dass ein Parameter möglicherweise nur bei bestimmten Konstellationen der anderen Parameter sensitiv wirkt. Darüber hinaus können sich beispielsweise die Effekte mehrerer Parameter bei gleichzeitiger Änderung gegenseitig verstärken. Wenn der Verdacht auf solche Abhängigkeiten von Parametern besteht, muss unterstützend die statistische Versuchsplanung eingesetzt werden.“ [RSS08]

6.9.2.2 Optimierung im CAE

Optimierungsverfahren können mit [VDI 2211] wie folgt gegliedert werden:

„Nachdem durch die so genannte Sensitivitätsanalyse, die einen Zusammenhang zwischen den problembeschreibenden Größen (z.B. Spannungen) und den Geometrieparametern (z.B. Knotenkoordinaten eines FEM-Netzes) herstellt, der Einfluss von Parameteränderungen auf die beteiligten Funktionen bekannt ist, kann ein Optimierungsverfahren verwendet werden, um ein verbessertes Design zu finden. Dieses Verfahren kann entweder auf der ingenieurmäßigen Intuition oder einer strengen Herleitung beruhen. Man klassifiziert in Optimalitätskriterienmethoden und in die Mathematische Programmierung. Zur ersten Klasse gehört das Konzept des „Fully Stressed Design“ (FSD) und verwandte gradientenfreie Verfahren. Hier werden Spannungswerte so lange reduziert bzw. angehoben, bis eine Grenzspannung erreicht oder dies durch Restriktionen nicht mehr möglich ist. Beispiele zeigen, dass in vielen Fällen ein Ausgleich des Spannungsverlaufs zu einer Konstruktion mit minimalem Gewicht führt. Optimalitätskriterien müssen für jede spezifische Aufgabenstellung entwickelt werden, können aber deshalb Problemeigenschaften effizienzsteigernd nutzen. Die zweite Klasse verwendet Verfahren zur Lösung allgemeiner, nichtlinearer restringierter Optimierungsprobleme, so z.B. die Sequentielle Lineare bzw. Quadratische Programmierung (SLP bzw. SQP). Somit können verschiedenste Fragestellungen mit dem gleichen Verfahren untersucht werden.

Die Eingabe der Funktionswerte und der Gradienten durch Unterprogramme ermöglicht die Definition einer Schnittstelle zu modernen Bibliotheksprogrammen. An dieser Stelle muss vermerkt werden, dass Strukturoptimierungsprobleme zumeist nicht konvex sind. Das bedeutet, dass die berechneten Lösungen zwar (lokale) Minima bzw. stationäre Punkte sind, aber durchaus nicht immer die absolute Idealstruktur des globalen Minimums gefunden werden kann. Mit nachgeschalteten Suchverfahren kann man versuchen, das globale Minimum zu erreichen, was aber sehr rechenzeitintensiv ist.

Ein integriertes Konzept für die Strukturoptimierung besteht damit aus folgenden Teilaufgaben: Der Geometriebeschreibung, der Strukturanalyse, der Sensitivitätsanalyse, der mathematischen Optimierung und einem „Postprocessing“ zur Datenaufbereitung für eine übersichtliche Beurteilung der Ergebnisse. In einem iterativen Prozess wird nun für das in der Regel nichtlineare Optimierungsproblem die Lösung gesucht. Die berechnete Optimalkonstruktion kann abschließend als Ausgangspunkt für einen Prototypen verwendet werden.

Ein Optimierungssystem wird sinnfällig modular aufgebaut, wozu ein geeigneter Datentransfer konzipiert werden muss. Die Einzelprogramme werden über definierte Schnittstellen verknüpft. Dies hat den Vorteil, dass man sich für die Wartung und die Weiterentwicklung der Software nur um Programm-Module zu bemühen hat. Moderne Softwaresysteme sollen für den Benutzer transparent und erweiterbar sein, da sich fortlaufend neue Aufgaben ergeben können. Außerdem bedarf es der Möglichkeit des interaktiven Eingriffs in den Optimierungsprozess. Die Module sollten so aufgebaut sein, dass man Standard-Software verwendet, um ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Komfort für den Benutzer sowie billigere Lösungen zu gewährleisten.

Bei kommerziellen Optimierungspaketen ist auf eine umfassende Integration der oben aufgeführten Teilaufgaben zu achten.

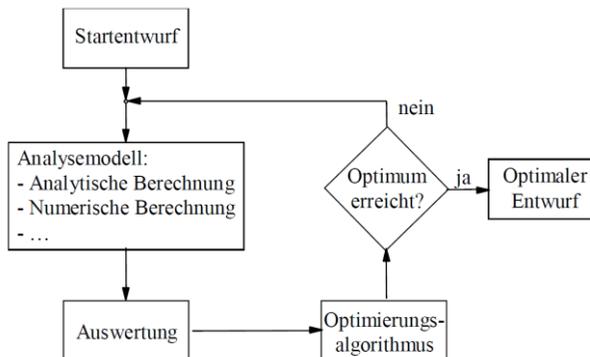


Bild 6.64: Optimierungsschleife [SCH05]

Da viel ingenieurmäßiges Fachwissen notwendig ist, damit ein Optimierungsprozess erfolgreich abläuft, ist eine Benutzungsschnittstelle notwendig, die den Zugang zum Programmsystem vielfältig öffnet, indem man z.B. menügesteuert die einzelnen Module ansprechbar macht. In dieser Schale sollten Fachwissen gesammelt und experimentelle Daten zu geleisteten Optimierungsaufgaben abgespeichert sein, damit der Benutzer für weitere Fragestellungen daraus lernen kann. Die Entwicklung geht dahin, ein lernfähiges Expertensystem aufzubauen, d.h. zu „knowledge-based structural optimization“-Konzepten zu gelangen.“ [VDI 2211] Die Verfahren und mathematischen Grundlagen der Optimierung sowie Programmsysteme und Strategien dazu beschreibt [SCH05] detailliert.

Ansätze der Topologie- und Strukturoptimierung mit bionischen Prinzipien erfolgen nach der oben beschriebenen Vorgehensweise. Mit dem Ziel, unnötiges

Material aus Gewichtsgründen zu vermeiden, stellen diese einen interdisziplinären Ansatz dar (s. Bild 6.34, [NAC10]).

Strukturoptimierungsprobleme werden nach [SCH05] nach der Art der Entwurfsvariablen unterteilt, weil danach auch die anzuwendenden Lösungsstrategien auszuwählen sind:

- Wahl der Bauweise: Es ist zu entscheiden, ob z.B. ein Vollwandträger, eine fachwerkartige Struktur oder eine Verbundstruktur eingesetzt werden soll.
- Wahl der Materialeigenschaften (z.B. Stahl, Aluminium, Magnesium, Verbundwerkstoffe)
- Topologieoptimierung: Die Entwurfsvariablen beschreiben die Lage und Anordnung von Strukturelementen.
- Gestaltoptimierung: Bei dieser Art der Entwurfsvariablen wird die Geometrie des Bauteils ohne Änderung der Topologie verändert.
- Dimensionierung: Wanddicken und Querschnittsgrößen sind die am einfachsten zu behandelnden Entwurfsvariablen.

Der Standardprozess der Optimierungsverfahren (Bild 6.64) ist naturgemäß iterativ und wird, wie o.a. [VDI 2211] in modernen Systemen automatisiert iteriert.

6.9.3 Ergebnisinterpretation

Dresig [DS08] fasst die Bedeutung der Ergebnisinterpretation wie folgt zusammen:

„Bei der Modellierung, der Eingabe von Parameterwerten, der Berücksichtigung von Maßeinheiten oder bei der Formulierung von Abhängigkeiten und Bedingungen können Fehler unterlaufen. Auch müssen Verfahrensparameter wie Schrittweiten und Fehlergrößen passend eingestellt sein, um das System richtig berechnen und die Ergebnisse mit der benötigten Aussagefähigkeit (wie zum Beispiel Genauigkeit und Auflösung) darstellen zu können. Der Anwender muss sich von der Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse überzeugen und zwischen numerischen und physikalischen Effekten unterscheiden können. Dabei ist er nicht allein von den Ergebnissen abhängig, die der Computer liefert. Die physikalischen Zusammenhänge, die für das analysierte System bestehen, erlauben es, "computerunabhängige" Aussagen zu treffen.

Der Wunsch besteht, zuverlässig vorzuberechnen, um Versuche zu sparen und Entwicklungszeit zu gewinnen. Man darf aber Rechenergebnissen nicht blind vertrauen. Unkontrollierte Ergebnisse gehören in den Papierkorb! Fehlerhafte Ergebnisse können zu kostspieligen Fehlentscheidungen bei der Entwicklung und Konstruktion führen. Richtige Interpretation der Ergebnisse ist wichtig, um einwandfreie Schlussfolgerungen ziehen zu können. Der Ingenieur - und nicht der Computer - ist verantwortlich für die Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen! Einblick in die Physik und Verständnis der dynamischen Vorgänge erleichtert die Entscheidungsfindung. ...

... Ein Simulationsergebnis hängt im Allgemeinen von vielen Einflussgrößen (Parametern) ab. Die technische Aufgabe besteht stets darin, aus den Simulationsergebnissen konkrete Schlussfolgerungen für die konstruktive

Umsetzung zu ziehen. Es kommt deshalb darauf an, die dominierenden Parametereinflüsse zu erkennen, die das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Dazu ist es wichtig zu erkennen, welche physikalischen Ursachen den jeweiligen Vorgang bestimmen, um z.B. extreme Belastungen gezielt vermindern zu können. Um Ergebnisse der numerischen Simulation richtig zu deuten und zu "verstehen", muss man versuchen, sie auf bekannte elementare Tatsachen zurückzuführen. Eine Interpretation der physikalischen Erscheinungen ist desto leichter möglich, je mehr Erfahrungen zu elementaren Vorgängen vorliegen. Die Fragen nach dem physikalischen Verständnis sind leichter zu beantworten, wenn das konkrete Problem einer Problemgruppe zugeordnet werden kann, für die gewisse Gesetzmäßigkeiten gelten. Die Ergebnisinterpretation kann auch den Prozess der Modellbildung unterstützen, wenn der Benutzer bisherige Parameter variiert oder neue Modellelemente hinzufügt. So können bestimmte Gesetzmäßigkeiten quasi experimentell nachvollzogen werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse können bisher nicht erkannte Zusammenhänge gefunden und durch nachträglichen Einbau (oder Weglassen) von Modellelementen bei nachfolgenden Analysen neue Erkenntnisse gewonnen werden."

6.9.3.1 Verifikation und Validierung

Für materialflussmodellierende Simulationssysteme der Logistik ist das Thema der Verifikation und Validierung umfangreich aufgearbeitet; u.a. in VDI 3633ff. [VDI 3633] und [RSS08]. Für technische Simulationsmodelle existiert ein diverses Spektrum in den Fachmonographien, allen voran Bathe [BAT02], [D05] und [DH06].

Auf den Zusammenhang zwischen Modell, Modellbildung, Simulation, Verifikation und Validierung wurde nach [DAS06] schon in Bild 6.17 eingegangen. Verifikation und Validierung wird in [VDI 2206] mit Eigenschaftenabsicherung subsumiert.

Verifikation ist der Prozess der Überprüfung, ob das Modell die spezifizierten Anforderungen erfüllt und für die Simulation im Rechner korrekt implementiert wurde (wurde dies alles richtig gemacht?). Verifikation wird meist anhand von „Schreibtischtests“ auf Basis eigener oder fremder Erfahrungen durchgeführt [DAS06]. Nach [RS12] und ist sie auch etwas allgemeiner eine Prüfung gegen die Produktspezifikation.

Verifikation [VDI 2206] meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Programms wird auch von der Programmverifikation gesprochen. Die Verifikation wird im Allgemeinen formal realisiert. Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: Wird ein korrektes Produkt entwickelt?

Werden technische Simulationsmodelle mit abstrahierenden Systemen erstellt und sind dabei die Modellgleichungen selbst abzuleiten, ist besondere Vorsicht geboten. Hier kann nicht von gültigen Submodellen zu einem Gesamtmodell assembliert werden, wie im Falle von Programmen mit Modellbibliotheken. Für diesen Einsatzfall gibt Dresig [D05] hilfreiche Prüffregeln zur Verifikation von Modellgleichungen an.

Validierung überprüft die hinreichende Übereinstimmung zwischen Modell und dem zu untersuchenden Original. Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des Originals im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt (wurde das Richtige gemacht?). Besondere Bedeutung haben die ersten Simulationsläufe, die der Validierung des Simulationsmodells dienen. Die Validierung kann z.B. durch Sensitivitätsanalysen (s. Kap. 6.9.2.1), Plausibilitätsprüfungen oder den Vergleich mit Messungen am realen Objekt (umfangreiche Theorie nötig – hier nicht dargestellt) oder an einem Prototyp durchgeführt werden [VDI 2206].

„Validierung meint ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein. Die Validierung beinhaltet z.B. die Prüfung, ob die Beschreibung eines Algorithmus mit dem zu lösenden Problem übereinstimmt.

Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen. Umgangssprachlich ist die Validierung die Beantwortung der Frage: Wird das richtige Produkt entwickelt?“ [VDI 2206]

Wenn z.B. wie in der Materialflusssimulation Zufallszahlengeneratoren eingesetzt werden, ist auf **interne Validität** zu prüfen. „Der Test der internen Validität („Internal Validity Test“) basiert auf einem stochastischen Modell, mit dem bei unveränderten Parametern mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startwerten der Zufallszahlengeneratoren durchgeführt werden. Eine signifikante Abweichung der Ergebnisgrößen zwischen diesen Läufen kann zu zwei verschiedenen Folgerungen führen. Einerseits kann die Abweichung nur im Modell auftreten. In diesem Fall spiegelt das Modell bezüglich dieser Schwankungsbreite das Verhalten des realen Systems nicht wider und muss als fehlerhaft angesehen werden. Andererseits könnte das Modell die tatsächliche Schwankungsbreite korrekt abbilden. In diesem Fall muss hinterfragt werden, ob diese Schwankungen im Verhalten des realen Systems hinnehmbar sind. Im Unterschied zur Sensitivitätsanalyse werden bei dem Test auf interne Validität mehrere Simulationsläufe mit identischen Parameterkonstellationen verglichen. Diese Technik zeigt also statistische Unsicherheiten bereits für eine einzige Konstellation von Eingabegrößen auf, während die Sensitivitätsanalyse untersucht, wie deutlich die Ausgabegrößen von Schwankungen in den Eingabegrößen abhängig sind.“ [RSS08]

6.9.3.2 Regeln zur Ergebnisinterpretation und Plausibilitätsprüfung maschinendynamischer Berechnungen nach [DS08]

Die folgenden Interpretationsregeln sind einem Anwendungsseminar zur Ergebnisinterpretation maschinendynamischer Berechnungen mit der Software SimulationX® entnommen. Aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit über das Softwareprodukt hinweg und aufgrund ihrer Einzigartigkeit – kein monographisches Werk oder Artikel geben Regeln dieser Art wieder – seien diese hier in Auszügen angeführt [DS08]. Sie helfen v.a. bei der Beurteilung von grafischen (Zeit)Verläufen von Ergebnisgrößen. Animierte Modelle sind zusätzlich noch durch Beurteilung plausiblen Verhaltens beurteilbar:

Allgemeine Regeln:

- Erwarte nie 100%ig exakte Lösungen! (und interpretiere sie auch nicht als solche...)
 - Mehr als 2 Nachkommastellen sind im Allgemeinen überflüssig
- Prüfe Tendenzen, wie sich variierende Eingabeparameter auf die Ausgabegrößen auswirken!
 - Eigenfrequenzen dürfen sich nicht erhöhen, wenn eine Masse vergrößert wird oder die Federsteifigkeit verringert wird
 - Innere Zwangskräfte (Bindungskräfte, Gelenkkkräfte etc.) ändern sich mit dem Quadrat der Drehzahl
- Man wähle extreme Parameter zur Kontrolle!
 - Eine Massenträgheit, die gegen ∞ geht (entspricht einem sehr großen Wert i.d. Realität) sollte ähnlich wie eine Einspannung wirken
 - Eine gegen 0 gehende Federsteifigkeit sollte wie das Lösen der entsprechenden Federbindung wirken
- Sofern möglich: Einfache Gleichungen der Mechanik zur Kontrolle verwenden!
- Nutze Symmetriebedingungen!
 - In der Modellbildung: Verringert den Rechenaufwand
 - In der Ergebnisinterpretation: Bei symmetrischen Belastungen müssen mechanische Größen an allen Symmetriepunkten gleich sein (bei antisymmetrischen Belastungen entgegengesetzt gleich groß)
- Gemessene Eigenfrequenzen sind meist tiefer als berechnete, da durch ideale Einspannungen, Vernachlässigung von dämpfenden Schichten etc. steifere Systeme entstehen!
- Vergleiche Extremwerte und Nullstellen!
 - Geschwindigkeitsverläufe haben Nullstellen, wo Wegverläufe Extremwerte haben
 - Beschleunigungsverläufe haben Nullstellen, wo Geschwindigkeitsverläufe Extremwerte haben
- Differentiation raut auf, Integration glättet!
 - Sprünge und starke Auslenkungen können bei abgeleiteten Größen leichter identifiziert werden (Beschleunigungsverlauf!)
 - Amplituden sind im Beschleunigungsverlauf relativ größer als im Geschwindigkeitsverlauf, analog bei Geschwindigkeit und Weg
- Man versuche, kinetostatische (durch das Starrkörpermodell verursachte) und überlagerte Vibrationsschwingungen zu unterscheiden!
- Kinetostatische (Antriebs- und Gelenk-) Kräfte sind linear abhängig von Masseparametern und Beschleunigung des Antriebs sowie quadratisch abhängig von der Geschwindigkeit des Antriebs
- Bei großen Wertebereichen der Ausgangsgrößen kann eine logarithmische Skalierung sinnvoll sein!

Regeln und Tipps zur Schwingungsanalyse:

- Die Wahl des Ortes bei der Betrachtung eines Systems ist von Bedeutung!
 - Jede Frequenz besitzt Schwingungsknoten – und kann dementsprechend dort nicht analysiert werden (keine Amplitude)
 - Knotenfrei ist immer ein freies Ende
- Analysiere die Energieverteilung!
 - Parameter mit großem Energieanteil haben auch großen Einfluss auf die Eigenfrequenzen (Änderungen solcher Parameter sind daher sinnvoll)
 - Änderungen von Masseparametern wirken sich in Schwingungsbäuchen auf die entsprechende Eigenform stark aus
 - Änderungen von Steifigkeitsparametern wirken sich auf die entsprechende Eigenform dort stark aus, wo der Gradient sehr groß ist (die zwei anschließenden Amplitudenhöhen liegen weit auseinander)
- Die Änderung eines Masseparameters /Steifigkeitsparameters bewirkt maximal eine Änderung einer Frequenz um die Wurzel des Faktors!
- Zusätzliche Bindungen (Einspannung, Lager, ...) im Modell sollten die Eigenfrequenzen erhöhen!

6.9.4 Bewertung von Simulationsergebnissen - Berechnung technischer Sicherheiten

Die Berechnung technischer Sicherheiten bzw. der Zuverlässigkeit technischer Komponenten und Systeme ist ein breites Gebiet des Engineerings. Im Kontext soll hier auf die richtige Bewertung von Simulationsergebnissen fokussiert werden. Für das Thema im Allgemeinen sei auf die Fachliteratur z.B. [FOR03] verwiesen.

Nach [EM13] wird bei der Berechnung versucht, die aus Versuchen oder Praxisbeobachtung gewonnene Erfahrung in einem modellhaften Algorithmus zu erfassen. Das Modell soll die realen Verhältnisse möglichst genau vorhersagen. Dieses kann ein Simulationsmodell sein. Man unterscheidet Auslegungsberechnungen und Nachrechnungen.

- „Die **Auslegungsberechnung** (Überschlagsberechnung) liefert Dimensionierungsdaten für ein Produkt aufgrund geforderter Eingangsdaten. Es geht hier um eine vorläufige Dimensionierung.
- Die **Nachrechnung** liefert auftretende Beanspruchungen aufgrund der ersten konstruktiv gewählten Dimensionierung. Diese Berechnungsansätze berücksichtigen wesentlich mehr Einflussgrößen als diejenigen der Auslegungsberechnung. Falls Grenzwerte überschritten werden, muss die Gestalt oder müssen stoffliche Eigenschaften angepasst werden.
- Bei **Optimierungsrechnungen** soll über die Auslegung hinaus zugleich ein bestimmtes Ziel möglichst weitgehend erreicht werden.

Die Optimierung des Systems mit möglichst rationalen Mitteln ist das Ziel eines jeden Konstruktionsprozesses. Hierbei muss die ingenieurmäßige Aufgabe der Konstruktion eines optimalen Bauteils zunächst präzise formuliert werden, d.h. es müssen Optimierungsziele bzw. Kriterien für die Optimalität des Bauteils festgelegt werden. Häufig sind dies minimales Gewicht, möglichst niedrige Kosten, minimale Maximalbeanspruchung, maximale erste Eigenfrequenz oder maximale Dauerfestigkeit. Die zu minimierende Größe wird als Ziel- oder Kostenfunktion bezeichnet. Ebenso ist oft eine Reihe von fertigungs- oder einsatzbedingten Randbedingungen zu berücksichtigen. Dies können materialabhängige Festigkeitsgrenzen, geometrische Anforderungen hinsichtlich des Einbaus, der Funktionalität oder der zur Verfüugung stehenden Herstellungsverfahren sein. Man spricht von den Nebenbedingungen oder Restriktionen des Problems.“ [GER99]

„Man kann ferner die heute üblichen Berechnungsarten in drei Gruppen aufteilen, die zunehmend mehr Einflussgrößen berücksichtigen:

- **Deterministische Verfahren** berücksichtigen i. a. nur die wichtigsten Einflussgrößen. Hierzu zählen die Sicherheitsberechnungen einfacher Maschinenelemente. Am besten gesichert ist die statische Festigkeitsrechnung. Verschleiß-, Korrosions- und thermische Probleme werden meist nur überschlägig erfasst.
- **Halbdeterministische Verfahren** berücksichtigen weitere Einflussgrößen aus praxisnahen Versuchsreihen. Beispiele hierfür sind Wälzlager-Berechnungen unter Berücksichtigung von Öl-/Umgebungsverschmutzung, Verformungs- und thermischen Bedingungen. Erwähnenswert ist ferner die Betriebsfestigkeitsberechnung von Bauteilen aufgrund von Last-Kollektiven unter Berücksichtigung der Werkstoffstreuung.
- **Probabilistische Verfahren** schließen aus der Beobachtung des realen Verhaltens von technischen Systemen, z.B. auf die Wahrscheinlichkeit des Versagens einer Maschine. Hierzu zählen Zuverlässigkeitsberechnungen für die Entwicklung von Flugzeugen oder von elektronischen Systemen und im Reaktor- und Kraftwerksbau.“

Simulationsmethoden erlauben infolge der DV-technischen Fortschritte zunehmend die fast vollständige Voraussage der Produkteigenschaften und können wesentlich schneller und kostengünstiger sein als Versuche (virtuelle Produktentwicklung). Man muss sich allerdings Klarheit über die Realitätsnähe der verwendeten Modellannahmen verschaffen.“ [EM13]

Simulationen und Berechnungen mit Modellen können immer nur vorhandene Größen wie Spannungen, Kräfte und Beschleunigungen ausgeben. Es obliegt dem erfahrenen Berechner zu beurteilen, welche zulässigen Größen den vorhandenen zuzuordnen sind und wie diese ermittelt werden können. Für diese umfangreiche Thematik muss natürlich auf die Fachliteratur verwiesen werden (z.B. [SAN08]).

Im Falle der Beurteilungen vorhandener Spannungen aus statischen und dynamischen Lasten, sind umfangreiche Regelwerke vorhanden. Für die Beurteilung der örtlichen Spannungen aus FEM stellt die FKM-Richtlinie [FOR03]

ein Regelwerk bereit. Im Falle dynamischer Lasten sind die zu erwartenden Schädigungen mit unterschiedlichen Theorien der Ermüdungs- und Betriebsfestigkeit zu ermitteln, z.B. mit [HAI06]. Viel zu oft zeigt die Erfahrung, dass dem Ermitteln von Spannungsgrößen mehr Aufmerksamkeit als der Beurteilung jener gewidmet wird. Dann müssen einfache Tabellenwerte, wie Streckgrenzen und Bruchfestigkeiten, die Referenz zur Spannungsbeurteilung bilden. Dies führt zu unaussagekräftigen und teils sogar gefährlichen Aussagen aus den Simulationsrechnungen und zur vielbeschworenen „Rechnergläubigkeit“ [EM13]. Dabei ist niemals das Simulationsmodell „falsch“, sondern lediglich sein Einsatz und v.a. seine Beurteilung unzureichend. Bei der Auswertung von Ergebnissen der FEM kann es zu gravierenden Fehlinterpretationen kommen [VWB+09].

Die Dynamik bewegter Teile kann sich in zusätzlichen Bauteilspannungen als auch in zusätzlichen Schnittstellenlasten äußern und kann mit FEM als auch MKS ermittelt werden. Diese zusätzlichen Spannungen sind denen von statischen Lasten stets zu überlagern. Die Lasten an Schnittstellen aus der Dynamik haben Auswirkungen auf die Dimensionierung der Anschlussteile wie Lager und Verbindungen. Hier ist der Konnex zur Dimensionierung der Maschinenelemente z.B. mit [RS12], [NAC10] gegeben. Wenn höherfrequente dynamische Vorgänge stattfinden ist zu prüfen, ob eine akustische Bewertung des Modells nötig ist. Die Aussagen zu den Risiken mit FEM-Simulation gelten für jene mit MKS ebenso.

6.10 Arten der Produktentwicklung

Stetiges Wirtschaftswachstum und erfolgreiche Player darin setzt erfolgreiche Produkte voraus. Die Nachfrage von Kundenseite ist ebenso wichtig, wie die Leistung der Anbieter von Produkten wie Dienstleistungen hin zu Naturprodukten und technischen Produkten. Die Ausführungen hier konzentrieren sich auf die technischen Produkte und darin jene des Maschinenbaus mit Fokus auf die Technische Logistik. Die Entwicklung der Produkte ist zunehmend interdisziplinär und kann sowohl eine Neu- als auch Varianten- bzw. Anpassungsentwicklung sein. Durch die Fülle der Aufgaben ist die effiziente Organisation der Entwicklung ein Schlüssel zum wirtschaftlichen und technischen Erfolg des Produktes.

Ein grundsätzliches Dilemma der Produktentwicklung besteht nach [LIN05] darin, dass die Festlegung bestimmter Produktmerkmale (zum Beispiel Abmessungen) zu einem Zeitpunkt erfolgt, zu dem daraus resultierende Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit oder Herstellkosten noch kaum ermittelt werden können. Daher müssen Erfahrungen und Wissen um aus vergangenen Projekten gewonnene Informationen erweitert werden, um zukünftige Produkte mit höheren Anforderungen erfolgreich zu realisieren.

Die Ausführungen dieses Abschnittes beleuchten die Herausforderungen multidisziplinärer Produktentwicklung und zeigen Strategien und Lösungen dafür auf.

6.10.1 Produktentwicklung

Bei der Entwicklung neuer Produkte muss man sich mit einigen grundsätzlichen Fragen zur Arbeitsweise des einzelnen Entwicklers wie auch ganzer Entwicklungsteams auseinandersetzen. Da durch eine Produktentwicklung etwas Neues geschaffen wird, sollten die grundsätzlichen Mechanismen der hierfür einzusetzenden Kreativität bekannt sein. In konkreten Situationen müssen die Betroffenen schnell und mit begrenztem Aufwand die vereinbarten Ziele erreichen und dabei möglichst optimale Ergebnisse generieren. Produktentwicklung ist ein komplexer Prozess mit vielen Beteiligten. Auch das Produkt an sich stellt sehr oft schon ein komplexes System dar. Mit beiden Formen der Komplexität muss hier umgegangen werden [LIN05]. Um nun eine erfolgreiche Produktentwicklung zu betreiben, ist es notwendig, die Planung dreier verschiedener Produktraspekte zu beachten. Neben der *inhaltlichen Planung*, welche den Arbeitsfluss des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses darstellt, ist auch eine *zeitliche und terminliche Planung* und eine *Kostenplanung* erforderlich [FEL13a].

6.10.1.1 Inhaltliche Planung

Die inhaltliche Prozessplanung beschreibt den Arbeitsfluss des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses, beginnend mit der Aufgabenstellung über das Ermitteln der Funktionen, das Suchen nach Lösungsprinzipien, das Gliedern und Gestalten der Module beziehungsweise des Produktes bis hin zur gesamten Produktdokumentation.

Hierzu sind die Vorgehensmodelle, wie das Vorgehen nach Pahl/Beitz und nach VDI 2221 zu erwähnen (Details s. Kap. 6.11). Der Entwicklungsprozess kann subsumierend über viele unterschiedliche Ansätze in Hauptphasen gegliedert werden, welche Arbeitsschritte enthalten, sogenannte Hauptarbeitsschritte. Am Ende einer Phase beziehungsweise eines Hauptarbeitsschrittes stehen Arbeitsergebnisse. Zum Erreichen eines Arbeitsergebnisses sind in der Regel wiederum untergeordnete Arbeitsschritte auszuführen. Die inhaltlichen Phasen der Produktentwicklung können identifiziert werden mit:

- Planen und Klären der Aufgabe
- Konzipieren
- Entwerfen
- Ausarbeiten

6.10.1.2 Zeitliche und terminliche Planung

Die in den letzten Jahrzehnten zu beobachtende, in fast allen Branchen zu verzeichnende Verkürzung der Produktlebensdauer, stellt die Produktentwickler vor neue Herausforderungen. Nicht nur die daraus resultierenden kürzeren Entwicklungszeiten sind die logische Konsequenz, sondern auch dem Begriff „Time to Market“ kommt immer mehr Bedeutung zu. Das Ziel eines Unternehmens muss es sein, als erster Hersteller das Produkt auf den Markt zu bringen, um den Umsatz zu maximieren. Bild 6.65 stellt die Vorteile des Innovators gegenüber dem Nachzügler am Markt nach Kramer dar [RS12]. Zum Erreichen dieses nötigen Vorsprunges in der Entwicklung und damit im Markteintritt sind Strategien und Prozesse, wie simultaneous engineering (s.u.), entwickelt worden, die die Erfolgswahrscheinlichkeit erhöhen. Der Einsatz von CAE und die dadurch mögliche virtuelle Produktentwicklung ist der key-enabler dieser Strategien.

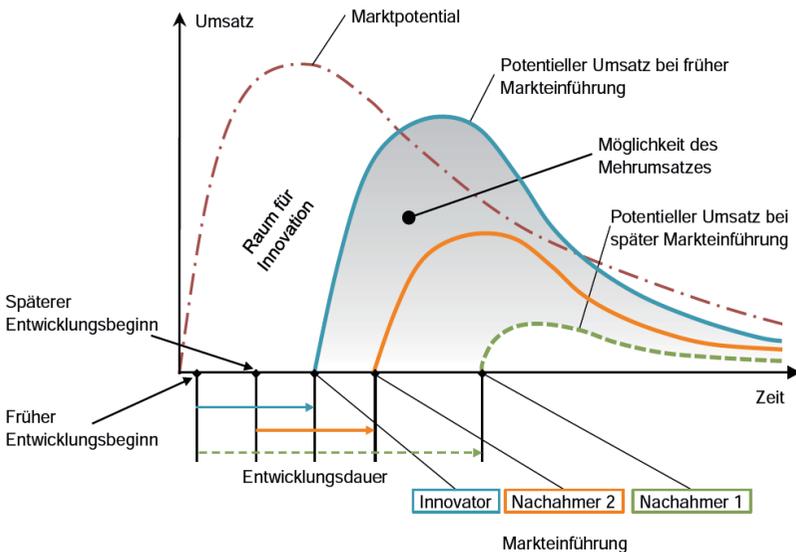


Bild 6.65 Time to Market nach Kramer [RS12]

Bild 6.66 zeigt das Phänomen der immer kürzer werdenden Produktlebigkeit am Beispiel des Automobilherstellers Volkswagen. Der Generationswechsel zwischen den beiden ersten Golfmodellen betrug neun Jahre, hingegen wurde das Modell der Baureihe VI nur von 2008 bis 2012 gebaut. Im Gegensatz zur Automobilbranche, in der ein Generationswechsel von mittlerweile weniger als fünf Jahren Standard ist, ist die Lebensdauer der Produkte in der Logistik noch sehr lange. So beträgt die Lebensdauer von Fördertechnik-Komponenten durchaus 15 Jahre und mehr [PUC11].

Golf VII	Golf VI	Golf V	IV	III	II	I
2012-.....	2008-2012	2003- 2008	1997- 2003	1991- 1997	1983- 1991	1974- 1983



Bild 6.66 Generationswechsel bei VW [VOL12]

Als sehr hilfreiches Mittel für eine zeitliche und terminliche Planung hat sich der Netzplan herausgestellt. Er stellt graphisch die logische Verknüpfung zwischen den auszuführenden Aufgaben und den vorhandenen Ressourcen dar. Mittels Netzplan lassen sich die Durchlaufzeiten und der Ressourcenbedarf bestimmen. Dabei spielt der kritische Pfad eine sehr wichtige Rolle. Er markiert jene Folge von Vorgängen, welche über keine Pufferzeiten verfügen und damit auch die Gesamtdauer des Projektes bestimmen. Das bedeutet, dass eine Verzögerung von nur einem einzigen Prozessschritt entlang dieses Pfades, die gesamte Projektdurchlaufzeit stört und es damit zu Zielabweichungen beim Projekt kommt. (vergl. (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2006), S.202f; (Lindemann, 2005), S.184)

6.10.1.3 Kostenplanung

Natürlich spielen neben der Zeit auch die Kosten eine entscheidende Rolle, um marktfähige Produkte anbieten zu können. Der Erfolg eines Produktes hängt also auch entscheidend von einer guten Kostenplanung ab. Interessant ist dabei, dass nach Eversheim [ES05], die Entwicklung und Konstruktion ca. 75% der im Produktentwicklungsprozess anfallenden Kosten bestimmt, aber selbst nur ca. 10% der Gesamtkosten verschlingt. Ehrlenspiel greift diese Thematik auch auf und setzt 70% der Kostenfestlegung auf den Unternehmensbereich der Konstruktion und Entwicklung [EKL+14]. Beide Autoren trennen die Entwicklung und Konstruktion für Ihre Kostendarstellung nicht weiter auf. Wenn man aber die nach [CP99] interessante Kurve des Design-Wissenszuwachses über den Produktentwicklungsprozess hinzunimmt, ergibt sich die folgende Darstellung (Bild 6.67) mit nach [ES05] und [EKL+14] gemittelten Kosten.

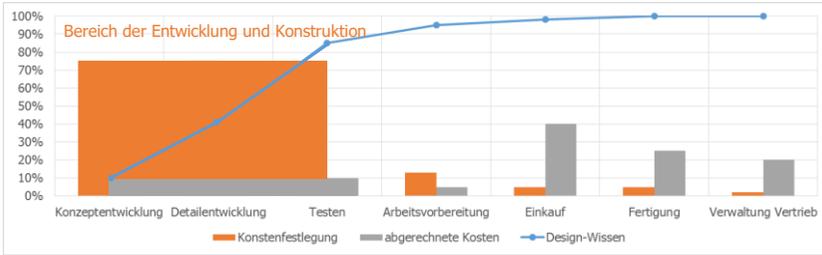


Bild 6.67 Produktkostenfestlegung und –entstehung im Kontext des Design-Wissenszuwachses nach [CP99] mit [ES05], [EKL+14]

Wenn es nun in v.a. Anpassungs- und Variantenkonstruktionen gelingt, das am Ende des Testens verfügbare Design-Wissen einer Produktentwicklung in die nächste Produktentwicklung mitzunehmen, können die abzurechnenden Kosten der Entwicklung und Konstruktion gesenkt werden, indem das Wissen effizienter zum Einsatz gelangt. Die absoluten Kosten des Produktes sind durch erhöhtes Design-Wissen zu einem frühen Zeitpunkt ebenso positiv beeinflussbar, da technische Fehlschritte vermieden werden können; die Kostenfestlegung ist davon allerdings nicht betroffen.

6.10.1.4 Strategien der Produktentwicklung nach [LIN05]

Strategien sind langfristig angelegte Pläne zur Erreichung grundlegender Ziele. Sie sind daher auch Grundlage für die Auswahl geeigneter Methoden und Hilfsmittel zur Zielerreichung und geben dem Entwicklungsprozess einen Handlungsrahmen. Übergeordnete in der Produktentwicklung angewandte Strategien sind zum Beispiel:

- Integrierte Produktentwicklung (auch Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung (s. Kap. 6.10.1.5))
- Projektmanagement
- Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering/Cross Enterprise Engineering (s. Kap. 6.10.2)
- Fraktale Unternehmen
- Total Quality Management

Diese Strategien verfolgen als Ziele die Beschleunigung der Unternehmensprozesse, die Verbesserung der Produktqualität, die Senkung der Kosten und die Erhöhung der Flexibilität. Sie beinhalten Ansätze hinsichtlich der Verbesserung der Prozesse, der Beeinflussung des Verhaltens aller Beteiligten, der klaren Ausrichtung aller Handlungen auf Ziele sowie der Förderung ganzheitlichen Denkens:

- *Systemorientiertes Arbeiten* basiert auf Vorgehensmodellen, denen das Systemdenken zugrunde liegt und die eine ganzheitliche Vorgehensweise unterstützen. Dieses Prinzip ist ein wesentliches Element im Umgang mit der Komplexität von Produkten und Prozessen.

- *Zielgerichtetes Vorgehen* unter Nutzung geeigneter Methoden spiegelt sich zum Beispiel in der Orientierung an verbindlichen Anforderungslisten neuer Produkte wieder. Diese quantifizieren die gesetzten Ziele und ermöglichen die Überprüfung der erarbeiteten Ergebnisse. Die Konstruktionsmethodiken haben als primäres Ziel das fokussierte, zielgerichtete Vorgehen.
- *Vorgehensweisen* bestimmen den organisatorischen Rahmen. Konstruktionsmethodiken und organisatorische Ansätze wie Simultaneous Engineering unterstützen die Ablauforganisation.
- *Verhaltensweisen* können die Individualarbeit durch das Bewusstmachen von Stärken und Schwächen sowie erfolgreichen Handlungsweisen unterstützen. Sie fördern in gleicher Weise sowohl interdisziplinäre Projekt- als auch Teamarbeit. Grundlage für eine erfolgreiche Arbeit sind Methoden und Werkzeuge der Kooperation und der Kommunikation, der Konsens- und Kompromissfindung sowie eine systematische Koordination der Handlungen. Es ist oft weniger wichtig, welche Strategie im Unternehmen als Motor für Veränderungen genutzt wird. Wesentlich ist die Ausgestaltung der System- und der Zielorientierung sowie der Vorgehens- und Verhaltensweisen und deren konkrete Umsetzung und stetige Weiterentwicklung.

Lindemann [LIN05] beschäftigt sich ebenfalls (wie Ehrlenspiel [EM13]) mit den Aspekten der Menschen als Handelnde im Vordergrund der Produktentwicklung und erläutert die Aspekte zu SoftSkills, Teamarbeit und Soziologie im Spannungsbogen eigener, persönlicher Ziele und jener des Produktentwicklungsprozesses.

So gibt [LIN05] an „Produktentwicklung heißt auch, dass wir etwas Neues schaffen wollen. Daher müssen wir das richtige Maß an schöpferischer Kreativität ergänzend zur Systematik in unsere Arbeit einbringen.“ Über die Systematik und Methoden der Produktentwicklungsprozesse gibt Kap. 6.11 Auskunft.

6.10.1.5 Reverse Engineering nach [RS12]

Im Gegensatz zum in der Produktentwicklung geläufigen vorwärtsgerichteten top-down-Vorgehen, wo von einem hohen Abstraktionsgrad mit zunehmenden Gestaltungsdetails ein Gesamtprodukt entwickelt wird, steht das Reverse engineering. Wenn von einem Produkt keine technischen Unterlagen mehr vorhanden sind, daran aber Änderungen, Optimierungen und Weiterentwicklungen zu vollziehen sind behilft man sich bottom-up mit der Analyse des Bestehenden (die Begriffe bottom-up und top-down sind hier nicht direkt dem forward und reverse engineering zuzuordnen, was bei der Betrachtung der Modellierungsstrategien im CAD – Kap. 6.6.1 – widersprüchlich wäre!).

Reverse engineering bezeichnet einen Prozess, bei welchem ein bestehendes System analysiert wird, um dessen Teile, Aufbau, Strukturen, Zustände, Verhaltensweisen und Eigenschaften möglichst für die Aufgabenstellung ausreichend exakt abzubilden. Auf diese Weise wird aus einem physikalisch vorliegenden Objekt eine abstrakte Beschreibung abgeleitet. Im Maschinenbau dient das Reverse Engineering hauptsächlich der Rekonstruktion von geometrischen Flächen, ausgehend von physikalisch vorliegenden Teilen, um

letztlich die Teilegestalt hinreichend genau zu beschreiben. Anwendungsgebiete und Zielsetzungen des Reverse Engineering auch außerhalb des Maschinenbaus können sein:

- Produktdesign: Übertragen von Designstudien in CAD-Modelle
- Produktentwicklung: Rückführen von Erkenntnissen aus dem Modellbau, aus manuellen Bauteiloptimierungen sowie von Versuchsergebnissen aus dem Physical Mock-Up bzw. Erstellen digitaler Simulations- oder Versuchsmodelle aus vorliegenden Teilen oder Versuchsmustern
- Produktion: Vorbereitung der schnellen Nachfertigung von Teilen durch Rapid Technologien (Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing)
- Qualitätssicherung: Geometrienachbildung zum Zweck des Soll-/Ist-Vergleichs z.B. in CAD
- Montagekontrolle: Kontrolle der richtigen Montage von Einzelkomponenten
- Ersatzteilmanagement: Anfertigung spezieller Ersatzteile
- Produktaufarbeitung: Ermittlung und Beschreibung von Referenzgeometrien als Ausgangspunkt von Refabrikations- oder Weiterentwicklungsprozessen.

Der Ablauf des Reverse engineering im Sinne der geometrischen Rekonstruktion beinhaltet folgende Schritte:

- Bauteilerfassung/Digitalisieren (3D-Vermessung oder Scanning)
- Geometrieverarbeitung (Abmaßverarbeitung/Flächenrückführung) z.B. in CAD
- ggf. Weiterverarbeitung/Modifikation der erhaltenen Flächenmodelle z.B. in CAD

Ein kritischer Aspekt des Reverse Engineering ist dessen rechtliche Einordnung. Da das Reverse Engineering dazu verwendet werden kann, Urheber- und Schutzrechte zu umgehen, bewegt es sich entsprechend in einer rechtlichen Grauzone. Reverse Engineering ist in hohem Maße dazu geeignet, Plagiate herzustellen. Während das Nachahmen allgemein nicht verboten ist, kann das Reverse Engineering zu Rechtsverletzungen führen, wenn es zum gewerblichen Nachbau verwendet wird und Urheberrechte, gewerbliche Schutzrechte wie Patente, Gebrauchsmuster, Geschmacksmuster oder Marken verletzt werden. In diesem Fall sieht die Gesetzgebung je nach Tatbestand die Androhung mehrjähriger Strafen vor (Kochmann in [RS12]).

6.10.2 Virtuelle Produktentwicklung

Der Produktentstehungs- bzw. der Produktentwicklungsprozess (in der Literatur gerne quasi synonymisch gebraucht) hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Als Teil des Produktlebenszyklus¹ ist darin die Abnahme fachlich-kreativer Ingenieurstätigkeiten zu beobachten [ES09]. Dem wird versucht durch zunehmenden IT-Einsatz zu begegnen um schwerpunktmäßig die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklern und die Herausforderungen durch erhöhte Produktkomplexität und individuelleren Kundenanforderungen zu bewältigen bzw. optimieren. Organisatorische Ansätze wie simultaneous und

cross enterprise engineering zur Parallelisierung vormals sequentieller Prozesse bringen nur durch den heute verbreiteten IT-Einsatz Effizienzsteigerungen in der Produktentwicklung. Im Umfeld der multidomänen und interdisziplinären Art moderner Produkte aller Bereiche des Maschinenbaus und der Technischen Logistik („Mechatronik“) sind in den jeweiligen Bereichen (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software und Dienstleistung) unterschiedlichste Methoden und Werkzeuge der Produktentwicklung beheimatet. Für ein erfolgreiches (Gesamt)Produkt sind nicht nur in der Entwicklung sondern auch in Marketing, Fertigung bis hin zum Recycling Querschnittssichten und integrierende Prozesse zur Beherrschung der Komplexitäten genauso notwendig, wie die Spezialisten in den einzelnen Domänen (s. dazu auch Kap. 6.10.3). Entwicklungspartnerschaften der Unternehmen intern, intern über mehrere Standorte hinweg und extern sind notwendige Ansätze zur Durchlaufzeitverkürzung; die Rolle der externen Zulieferer hat sich ebenfalls erhöht von einem Verhältnis extern/intern 60/40% im Jahre 1989 zu >80/<20% im Jahre 2000 (Sparte „Automotive“; ProSTEP AG in [ES09]). Die Integration der Zulieferer, deren Rolle vom Teilezulieferer bis zum Systemzulieferer reichen kann, in die unternehmenseigenen Prozesse ist eine Herausforderung und ebenso nur durch IT-Einsatz bewältigbar. Die Durchdringung des Produktlebenszyklus durch IT-Lösungen gibt Bild 6.68 an. Die Kostenbetrachtung darin ist vergleichend mit Bild 6.67 zu betrachten und zeigt die Übereinstimmung der Quellen, dass durch die Entwicklung und Konstruktion bis zu 75% der Kosten determiniert werden. Das Potenzial zur Kostenreduktion ist in den Frühphasen der Produktgestaltung am größten und nimmt ab, während die Änderungskosten mit dem Reifegrad des Produktes zunehmen. Auf die Höhe der Änderungskosten hat die Effizienz und Strategie des IT-Einsatzes Einfluss. Z.B. ermöglichen im konstruktiven Bereich mit CAD „änderungsfreudige“ Top-Down-Baugruppen rasche Änderungen, wohingegen sie in der Erstellung wesentlich aufwendiger und damit teurer als einfache Bottom-Up-Modelle sind (s. Kap. 6.6.1).

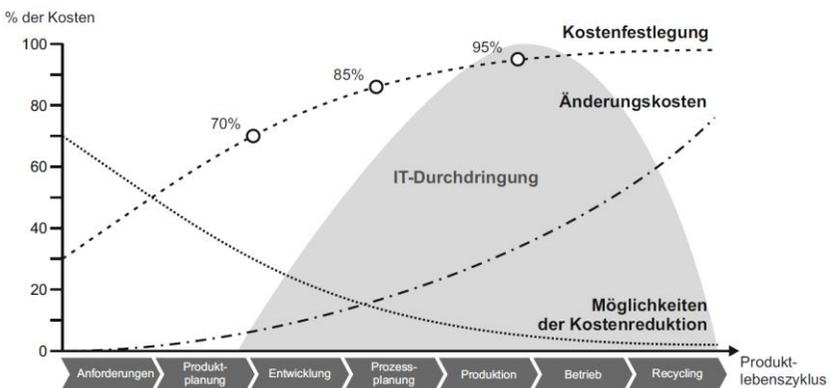


Bild 6.68 Kostenfestlegung und Änderungskosten in der Entwicklung und Konstruktion [ES09]

Die Anforderungen an die IT im Produktentstehungsprozess, die die Umgebung bzw. das Werkzeug der virtuellen Produktentwicklung darstellt, sind nach [ES09]:

- Integration über den Produktlebenszyklus hinweg
- Föderation von Daten und Prozessen in einem dezentral und verteilt arbeitenden Unternehmen
- Interdisziplinarität für die Kooperation verschiedener Domänen; neben dem mechatronischen Ansatz (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software) sollen auch die Hydraulik, Pneumatik und auch zum Produkt gehörige Dienstleistungspakete (Montage, Training, Instandhaltung und Instandsetzung, etc.) unterstützt werden.

Mit IT, die die o.a. Anforderungen erfüllen, können die folgenden Herausforderungen bewältigt werden [ES09]:

- frühzeitigere Erhöhung des Produktwissen und Absicherung von Entscheidungen in den frühen Entwicklungsphasen,
- vollständige und frühzeitigere Integration von Simulationen und Berechnungen in den Entwicklungsprozess, z.B. Digital Mock-Up bereits in der Konzeptphase,
- Unterstützung der firmeninternen und firmenübergreifenden Kommunikation von Ingenieuren in verteilten Produktentstehungsprozessen und verschiedenen Disziplinen sowie durch gemeinsamen Zugriff auf alle für das Produkt während aller Phasen des Produktlebenszyklus relevanter Informationen.

Die virtuelle Produktentwicklung steht nach [RS12] für einen „Teil der Phasen des Produktlebenszyklus und bezeichnet den durchgängigen Rechneinsatz in der Produktentwicklung und Produktionsplanung bis zum Produktionsanlauf. Die Phasen des Produktlebenszyklus, auf die die Virtuelle Produktentstehung zielt, umfassen die Produktplanung mit dem Anforderungsmanagement, die Konstruktion, die Produktionsplanung sowie das Integrieren, das Validieren und Verifizieren von Produktlösungen wie auch Produktionssystemlösungen.

Das Ziel der virtuellen Produktentstehung ist es, eine über alle Phasen durchgängig digitale Repräsentation der Ergebnisse aus den Phasen der Produktentstehung zu erreichen, um darüber die Prozessketten der Produktentwicklung auch mit den Prozessketten der Produktionsplanung zu integrieren. Dies schließt die Kooperation über Unternehmensgrenzen mit ein und fordert einen digitalen Informationsaustausch mit kooperierenden Unternehmen.“

Das führt (teilweise nach [AND10]) im Vorliegen eines virtuellen Produktes zu mehrfachem Nutzen desselben aus:

- Verständlichkeit durch räumliche Darstellung v.a. bei komplexen Produkten in virtueller Form (digital Mock-up) oder einfache Modellerstellung (rapid prototyping)
- Generierungsmöglichkeit weiterer Produktdaten für integrierte Prozessketten (CAD-CAE, CAD-CNC, CAD-rapid prototyping...)
- Ableitung von Dokumenten wie Stücklisten u.ä.
- Umfassender Prüfmöglichkeit des virtuellen Produkts auf Datenkonsistenz, geometrische Plausibilität (CAD), technische Funktion (CAE).

Die virtuelle Produktentstehung ist die Produktentwicklung und Produktionsplanung in einer so genannten virtuellen Welt und kann über mehrere nach Bild 6.69 über mehrere Stufen erreicht werden und mündet in einem durchgängigem integrierten Produktmodell.

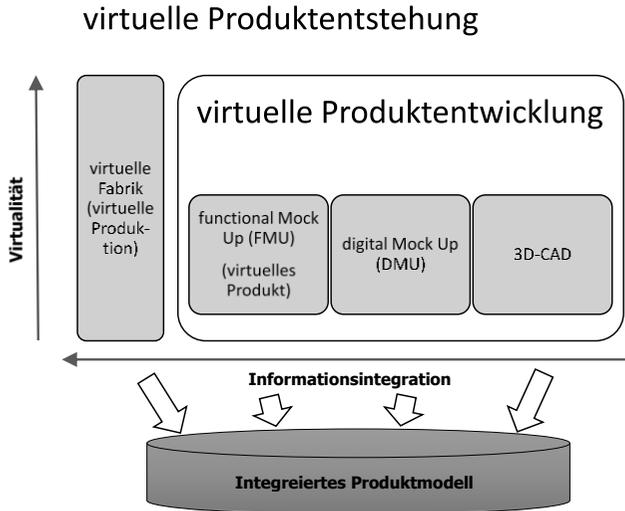


Bild 6.69 Konzepte der Virtuellen Produkentwicklung, nach [AND10]

Im Bereich des FMU mit dem digitalen Produkt sind v.a. die Disziplinen (Berechnung), Technische Produktdokumentation (TPD), FEM und MKS des CAx für die Entwicklungsarbeit in der Technischen Logistik und ihr Bezug zu CAD relevant (s. auch Kap. 6.6 mit Angabe von CAx-Prozessketten der Automobilindustrie). Die Interaktion und Verarbeitung von Informationen aus den o.a. Disziplinen ist effizient nur als Verknüpfung einzelner Prozesse zu einer Prozesskette möglich. Unter einer Prozesskette wird nach [AND10] die formale, hierarchisch strukturierte Zusammenfassung von Informationsverarbeitungsprozessen (Erzeugung, Verarbeitung und Austausch von Information), die einem gemeinsamen Prozessziel dienen, verstanden. Wenn Prozessketten miteinander verbunden werden und miteinander interagieren, entstehen Prozessnetze.

Im Folgenden sind für die Technische Logistik relevante Prozessketten in Form der Analyse- und Entwurfsmethode SADT als Graphiken dargestellt. Dieses graphische Darstellungskonzept (s. Bild 6.70) basiert auf strukturierten Sätzen von Diagrammen, die aufeinander bezogen werden können. Zur Modellbildung wird ein Rechteck zur Repräsentation einer Funktion bzw. einer Aktivität verwendet. Pfeile repräsentieren, abhängig von ihrer Anordnung am Rechteck, Datenklassen mit unterschiedlicher Bedeutung. Die Bezeichnungssystematik für die Datenklassen sieht die Abkürzungen I (für Input), O (für Output), C (für Control) und M (für Mechanism) vor. Diese Abkürzungen werden mit einer Nummer kombiniert, die auf die Funktion bezogen ist. Dies führt zu einer eindeutigen Zuordnung von Daten zu ihrer Datenklasse und der jeweiligen Funktion.

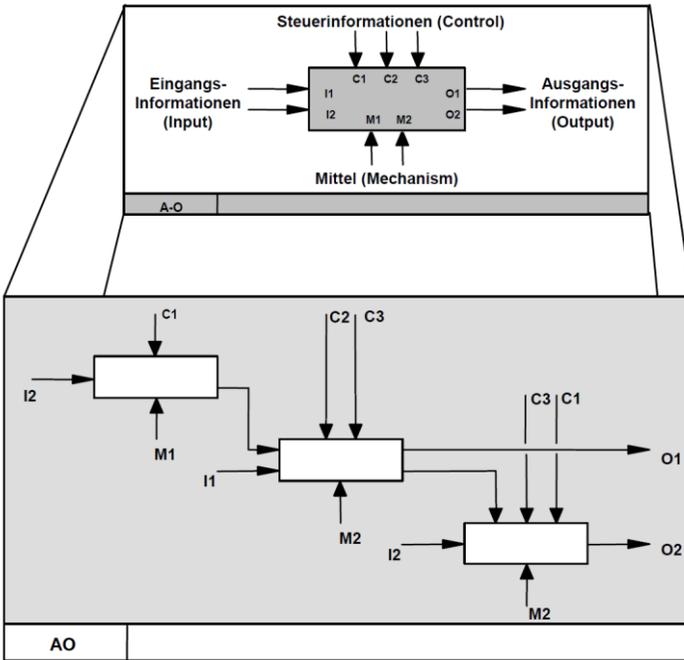


Bild 6.70 SADT-Methodik (nach Schäfer [AND10])

6.10.2.1 Einige CAx-Prozessketten für die Technische Logistik, adaptiert nach [AND10]

CAD – TPD (Technische Produktdokumentation)

Die Prozesskette CAD – TPD basiert auf der Ableitung technischer Dokumente aus der digitalen Produktrepräsentation für Zeichnungen, Fertigungsunterlagen und Arbeits- u. Montagepläne aus CAD-Daten. Auch dem Entwicklungsprozess nachgeschaltete Funktionen wie Einkauf, Vertrieb und Service können dadurch unterstützt werden.

Beispielsweise sind für den Zusammenbau Explosionsdarstellungen oder für Bedienungsanleitungen fotorealistische Darstellungen aus dem CAD-Modell ableitbar. Zunehmende Bedeutung gewinnt dabei das direkte, referenzierte Einbinden von CAD-Daten in Textdokumente. Dies ermöglicht es, das CAD-Modell im Kontext des Textdokuments zu laden und zu ändern, wofür unterschiedliche uni- bzw. bidirektionale Werkzeuge existieren. Man unterscheidet nach statischen und dynamischen Darstellungen insofern, ob dynamische Vorgänge abgebildet werden oder nicht (unabhängig der Änderungsrichtungen). Die Erstellung von Produktinformationen sowie die Qualität der Repräsentation wird durch eine integrierte TPD relevant verbessert und eine Durchgängigkeit der Änderungen erreicht (s. Änderungsanforderung in Bild 6.71).

Prozesskette CAD-TPD	Inhalt	Methoden/ Formate
1. Beschreibung der Prozesskette	Ableiten von Dokumenten aus 3D-CAD Daten. Dokumente können unterschiedlich ausgeprägt sein, wie techn. Zeichnungen, Stücklisten, Produktkataloge u. Ersatzteilkataloge, Prospekte etc.	Ableiten von Dokumenten (techn. Zeichnungen, Stücklisten, etc.) aus 3D-CAD Daten
2. Ausgangsmodell CAD	Produktmodell im CAD-System (Produktstruktur, Geometrie, Toleranzen, Oberflächenangaben, Materialangaben, Fertigungshinweise, produktdefinierende Daten)	CAD-native, STEP, IGES, DXF; Integrationstechnologien, wie OLE/DCOM
3. Zielmodell	Dokumentenerstellungssysteme, Textverarbeitungssysteme, Desk-Top Publishing Systeme, Computer Graphik Systeme, VR-Systeme	Textverarbeitungsmodelle (z.B. PDF), Computer, Graphikmodelle (Vektor- und Pixelgraphik wie GIF, TIFF), VR-Modelle, Hypermedia(HTML,XML)
4. Datentransformation	3D -> 2D Transformation, Projektionen, Dokumentenaufbau und -inhalte, Darstellungsnormen (Symbole, Ersatzdarst.)	3D -> 2D Transformation, Projektion, Normen
5. Zusatzinformationen	Normgerechte Darstellungen	Normen der Technischen Produktdokumentation
6. Ergebnisinterpretation und Rückführung	Normgerechte Dokumentation und Interpretation	Normen, Dokumentenprüfung, CE-Kennzeichnung

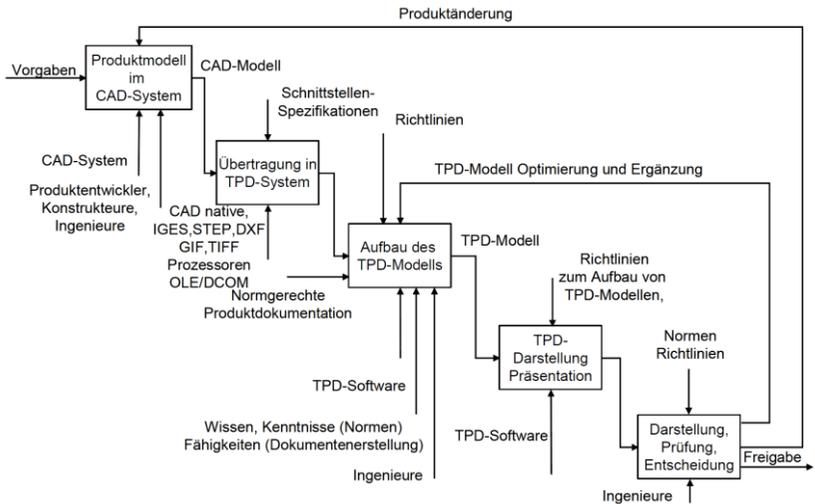


Bild 6.71 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-TPD [AND10]

Die Daten des virtuellen Produkts werden im Rahmen der TPD genutzt um die folgenden Ergebnisse zu erzielen:

- Zeichnungen (Einzelteil- oder Zusammenbauzeichnung)
- Dokumente mit 3D-Inhalt (z.B. 3D-pdf von Adobe), v.a. im unidirektionalen Zusammenarbeitsprozess nützlich
- Stücklisten (auch als Schnittstelle zu ERP)
- Arbeitspläne- u. Montagepläne in unterschiedlichen Sichten (z.B. weniger detailliert als eine Zusammenbauzeichnung)
- Technische Illustrationen für Produktkataloge

CAD – FEM bzw. CAD – Berechnung

Prozesskette CAD-Berechnung	Inhalt	Methoden/ Formate
1. Beschreibung der Prozesskette	Nutzung von CAD-Geometriedaten (Volumen- und Flächenmodelle) zur Berechnung für Analyse und Simulation Entwurfs- und Konstruktionslösungen	Kopplung und Integration von CAD und Berechnungsmethoden
2. Ausgangsmodell CAD	Volumen- und Flächenmodelle, meist als B-Rep Modelle.	CAD – native STEP, IGES, VDAFS
3. Zielmodell	Berechnungsmodelle, z.B. Gleichungssysteme	Matlab/Simulink, MatrixX, u.a.m.
4. Datentransformation	Datenselektion aus dem CAD-Modell	ASCII- und API-Schnittstellen
5. Zusatzinformationen	Zusätzliche physikalische Parameter, insbesondere Materialeigenschaften.	Modellierung/Programmierung im Berechnungssystem
6. Ergebnisinterpretation und Rückführung	Ergebnisse auf Plausibilität prüfen Modelländerungen direkt im CAD-System	Erfahrung, graph. Und textuelle Darstellungsmethoden

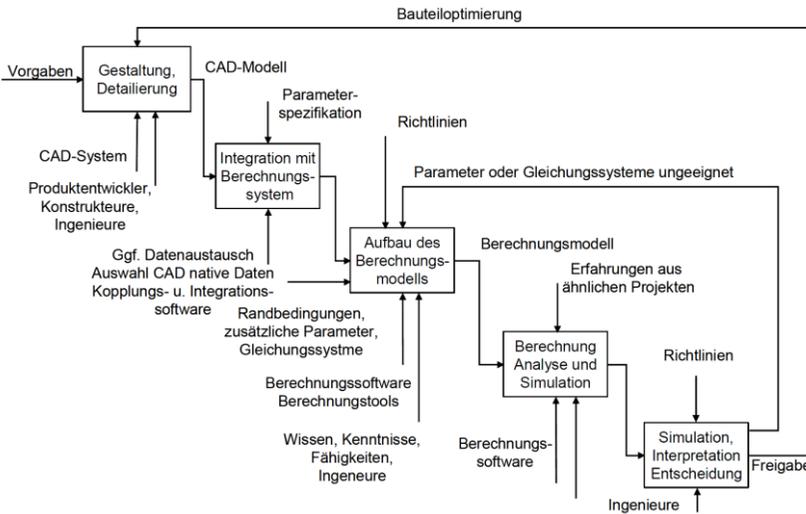


Bild 6.72 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-Berechnung [AND10]

In der Prozesskette CAD – FEM bzw. CAD – Berechnung-/Simulation werden Geometriedaten des CAD-Systems genutzt, um Berechnungs- und Simulationaufgaben zu lösen. Zur Berechnung werden aufbauend auf den Geometriedaten eines Bauteils, ggf. Finite-Elemente-Strukturen generiert, um Spannungsverteilungen oder Verformungen zu berechnen. Man unterscheidet darin zwischen Auslegungs-, Dimensionierungs-, Optimierungsberechnungen und Kontroll- und Nachrechnungen, was allerdings auf die Prozesskette CAD – FEM (Bild 6.73) keinen Einfluss hat. Relevant ist hierbei nur die Position im Produktentwicklungszyklus, worin erstere im Konzipieren und ggf. Entwerfen und letztere im Ausarbeiten und ggf. Entwerfen angesiedelt sind.

Man kann die IT-Lösungen dazu einteilen in jene die direkt im CAD-System auszuführen sind und jene, die eigene Systeme benötigen (zur Unterscheidung und Beurteilung des jeweiligen Einsatzes s. [KRA08], [KRA09]). Ihnen gemeinsam ist allerdings das Aufsetzen auf die CAD-Geometrien. Im Falle von im Rahmen der beschreibenden Analytik „manuellen“ Berechnungen (Modellierung und Lösung der beschreibenden Gleichungen ohne Verwendung von PreProzessoren) hat die Prozesskette CAD – Berechnung das Aussehen nach Bild 6.72 wobei CAD und das digitale Produkt mit den CAD-Analysefunktionen hier in erster Linie der Ermittlung von physikalischen Eigenschaften (Massen, Trägheiten,...) dient und die Prozesskette oft nicht vollständig integrativ ist.

Prozesskette CAD - FEM	Inhalt	Methoden/Formate
1. Beschreibung der Prozesskette	Nutzung der Bauteilgeometrie zur Berechnung der Festigkeit (Spannungsverteilung und Verformung), der thermischen und akustischen Belastung.	Finite Elemente Methode (FEM), Finite Elemente Analyse (FEA)
2. Ausgangsmodell CAD	Volumen- oder Flächenmodelle, meist nach dem B-Rep Modell, ggf. mit vereinfachter Geometrie.	CAD – native STEP, IGES VDAFS
3. Zielmodell	FE-Modelle auf der Grundlage eines Netzes, das aus finiten (endlichen) Elementen besteht.	FEM – native z.B.: NASTRAN, ANSYS
4. Datentransformation	Diskretisierung der Geometrie durch das Netz finiter Elemente. Dies entspricht einer Approximation der Geometrie.	Vernetzung
5. Zusatzinformationen	Randbedingungen, Kräfte, Momente, Materialeigenschaften (Materialkonstanten), Temperaturen, akustische Signale, etc.	Modellierung der Zusatzinformationen im FE-System
6. Ergebnisinterpretation und Rückführung	Ergebnisse auf Plausibilität prüfen Ergebnisse zu ungenau -> entscheiden, ob Vernetzungs- oder Modellfehler	Erfahrung Kontrollwerte

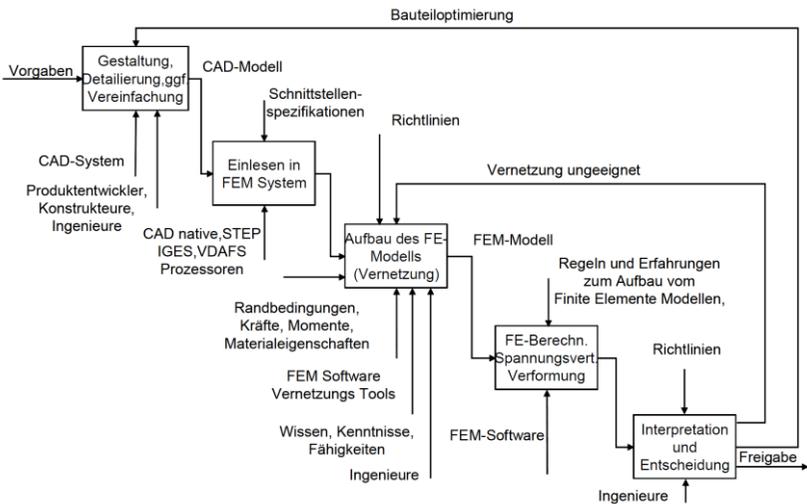


Bild 6.73 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-FEM [AND10]

Die Prozessketten CAD –FEM bzw. CAD – Berechnung kommen in den unterschiedlichsten Anwendungsfällen der Technischen Logistik nach Kap. 6.5.1 bzw. Kap. 6.9 zum Einsatz.

CAD – MKS

Die Einleitung zur Prozesskette CAD – FEM bzw. CAD – Berechnung gilt sinngemäß auch für CAD – MKS.

Prozesskette CAD-MKS	Inhalt	Methoden/ Formate
1. Beschreibung der Prozesskette	Nutzung der Baugruppenstruktur und der Bauteilgeometrie zur kinematischen und dynamischen Bewegungsanalyse	Kopplung CAD-MKS
2. Ausgangsmodell CAD	Baugruppenstruktur, Volumen- und Flächenmodelle	CAD – native STEP, MechaSTEP, IGES, VDAFS
3. Zielmodell	MKS-Modell, bestehend aus Gelenken und Gliedern sowie der Repräsentation offener oder geschlossener kinematischer Ketten.	MKS – native z.B. ADAMS, SIMPEX, u. a.m.
4. Datentransformation	Ableitung der Gelenke und Glieder aus der CAD-Geometrie; Ableitung der kinematischen Kette aus der Baugruppenstruktur.	Ableitung/Modellierung im MKS-System
5. Zusatzinformationen	Randbedingungen, Kräfte, Momente, Materialeigenschaften (Materialkonstanten), Freiheitsgrade der Bewegung	Modellierung im MKS-System
6. Ergebnisinterpretation und Rückführung	Simulation und Beurteilung des Bewegungsverhaltens, Änderung im CAD- und MKS-System	Erfahrungen, Kontrollwerte,

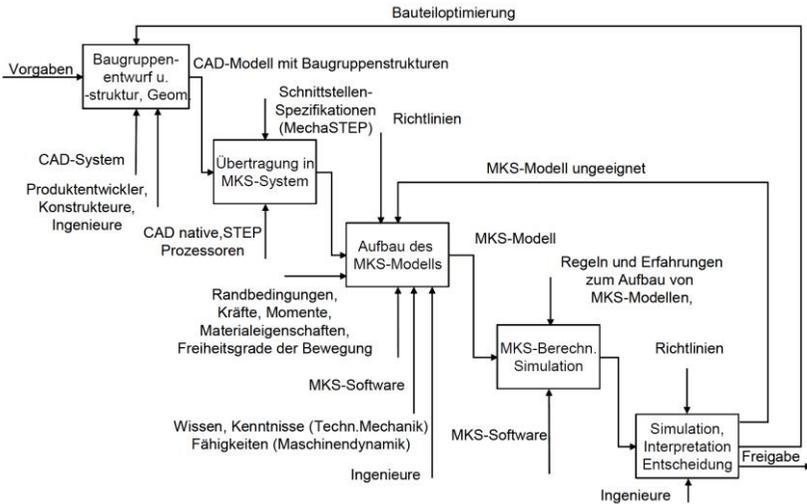


Bild 6.74 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-MKS [AND10]

Neben der Berechnung mechanisch-struktureller Eigenschaften wie Spannungsverteilung und Verformung eines Bauteils sind weitere Analysen bezüglich der Kinematik und Dynamik von Bauteilen und Baugruppen interessant welche mit MKS und AS möglich sind (s. Kap. 6.5.1).

Man unterscheidet nach dem Analyseergebnis zwischen kinematischer und dynamischer Simulation der Bewegungen von und in Baugruppen. Ergebnisse sind dementsprechend Stellungen und Koordinaten von Körpern ohne bzw. mit den wirkenden äußeren und inneren Kräften naturgemäß in zeitdiskreter Ausgabe; die Generierungsmöglichkeit von Animationen liefert wertvolle Einsichten zur Plausibilitätsprüfung sowie ein Marketing-Instrument für die Produktdarstellung. Sie werden zur Beurteilung der Funktion von Mechanismen (z.B. Kollisionsuntersuchungen) als auch zur Dimensionierung von Bauteilen herangezogen, wenn die dynamischen Belastungen einen relevanten Beitrag zur Gesamtlast liefern. Darüberhinaus sind viele der heute obligatorischen „Komfortansprüche“ an Produkte wie ruhiger und schwingungsarmer und daraus leiser Lauf nur mit Hilfe von MKS zu erfüllen. Wie bei den FEM-Systemen unterscheidet man zwischen CAD-integrierten und externen IT-Lösungen, die sich oft erheblich im Funktions- u. Leistungsumfang sowie in der Berechnungsqualität unterscheiden. Bild 6.74 zeigt die Merkmale und die Prozesskette CAD – MKS mit den obligatorischen Bauteiloptimierungs- bzw. Modelloptimierungsloops.

6.10.2.2 Daten und Datenmanagement in der virtuellen Produktentwicklung

Die **Produktlogik** [EM13] ist für die automatisierte und auch für die nachvollziehbare Konstruktion unabdingbarer Bestandteil, die ausgehend vom Sachsystem eine Basis für einen Vorgehensplan im Handlungssystem darstellt. Man kann die bei einem technischen Produkt vorhandenen Abhängigkeiten zwischen den Anforderungen, Restriktionen und den Elementen des Produkts sowie den Prozessen der Produktion, Nutzung und Entsorgung als Produktlogik verstehen (s. dazu auch Kap. 6.9). Produktlogik ist dann die Summe aus der Konstruktions-, Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungslogik und entspricht damit einer „Produktlebenslauflogik“. Die Logik eines Produktes benötigt für einen effizienten Bearbeitungsprozess die Produktdaten. Bisher ist die Konstruktions- und die Produktionslogik noch Gegenstand der Forschung.

Die **Produktdatentechnologie** ist nach [AND10] die Lehre der wissenschaftlichen Grundlagen (Prinzipien und Methoden) für die Funktionen zur Verarbeitung von Produktdaten, die die Produktlogik darstellen, bezogen auf alle Phasen des Produktlebenszyklus. Die Funktionen zur Verarbeitung von **Produktdaten** sind dabei insbesondere

- die Produktmodellierung,
- der Produktdatenaustausch,
- die Produktdatenspeicherung,
- die Produktdatenarchivierung und
- die Produktdatentransformation.

Grundlage der Produktdatentechnologie ist das integrierte **Produktmodell**, wie es in der Norm ISO 10303 festgelegt wurde [ISO 10303], das alle relevanten Produktdaten für die Produkterstellung, -nutzung und -entsorgung enthält. In der Praxis spricht man nach [EM13] vom Produktmodell als sämtliche geordneten Informationen in formaler Beschreibung, die zur Auftragsabwicklung für ein Produkt, über dessen Lebenszyklus hinweg, nötig sind.

Die Produktdatentechnik wird aufgrund dieses Ansatzes zunehmend zu einer Grundlage für die Informationsverarbeitung im Produktentwicklungsprozess.

Die umfangreiche Vielfalt in den digitalen Daten der CAx-Prozessketten und der gesamten Produktentwicklung und –herstellung benötigt zur Verwaltung und Verwendung dieser Produktdaten wiederum unterstützende IT; und dies nicht nur, wenn mit effizienzsteigernden Ansätzen wie *simultaneous engineering* (s.u.) agiert wird.

Rückgrat – aller verwaltenden Ansätze – ist die **Produktstruktur**, auch synonymisch als Erzeugnisstruktur bezeichnet [VDI 2219]. Die Produktstruktur (mechatronische Produkte) bildet nach [FEL14] den Zusammenhang der nach festgelegten Strukturierungskriterien gegliederten physikalischen Produktelemente wie Bauteile und Baugruppen ab. Ihr Ziel ist u.a. die Abbildung des Produktes im Unternehmen in PDM- und ERP-Systemen. Je nach Aufgabe interessieren verschiedene Sichten auf die Produktstruktur wie: Entwicklung/Konstruktion, Einkauf, Fertigung, Montage.

Die **Produktarchitektur** ist ein Ordnungsrahmen, um verschiedene Sichten auf ein Produkt zu ermöglichen. Sie stellt den Zusammenhang bzw. das Beziehungsschema zwischen der funktionalen Struktur (Markt- und Kundensicht) und der baulichen Struktur (Produktstruktur aus Unternehmenssicht) dar. Nach Feldhusen [FEL14] kann folgender Zusammenhang bildlich festgemacht werden:

Marktsicht → Funktionsstruktur ↔ Ausprägungsstruktur ↔ Produktstruktur → Unternehmenssicht

Die Gestaltung der Produktarchitektur ist unter technischen, variantenbildenden und organisatorischen Gesichtspunkten möglich.

Produktdatenmanagement-Systeme (PDM-Systeme) sind komplexe IT-Lösungen zur Verwaltung von Produktdaten, sowie der Steuerung von Produktdatenflüssen. Historisch lag der bisherige Fokus auf der Produktentstehung um diesen Prozess effizient handhabbar zu gestalten. Über das Datenmanagement hinaus sind weitere Funktionen heutzutage integriert, wie beispielsweise das Ablaufmanagement. Eine grafische Übersicht zur Architektur eines PDM – Systems gibt Bild 6.75. Eine Abgrenzung besteht zu den Enterprise Resource Planning – Systemen (ERP) darin, dass jene der Unterstützung betriebswirtschaftlicher Prozesse und der Logistik dienen. So findet sich PDM typischerweise in der Phase der Produktentstehung, während ERP in der Produktionsfreigabe angesiedelt ist [RS12].

Das im Rahmen von CAx erarbeitete Wissen um technische Funktionen einzelner und gesamter Produkte kann auch für verwandte Analyseprozesse herangezogen werden (z.B. Submodelltechnik in FEM und MKS) womit sich eine hohe Anforderung an die Handhabung der durch CAx erzeugten Daten ergibt. Mit dem integrierten Produktmodell ist PDM eine Integrationsdrehscheibe für alle an der Produktentwicklung beteiligten Systeme.

Aufgaben von PDM sind in den folgenden Bereichen definierbar [RS12]:

- *Produktstrukturierung und –konfiguration*: (bereichsübergreifende) Definition unterschiedlicher Sichtweisen
- *Variantenmanagement*: Beherrschung der Komplexität über klassische Stücklistenansätze hinaus, je nach Konstruktionsart (s. Kap. 6.11.2)
- *Klassifikation* von Teilen und Baugruppen nach Ähnlichkeitsmerkmalen
- *Sachnummerierung* zur Verwaltung von Teilen und Baugruppen

- *Freigabe- und Änderungswesen* zum Projektmanagement innerhalb von Entwicklungsprojekten
- *Elementverwaltung* in Klassen strukturierter Informationen zu Elementen über Stammdaten
- *Privilegienverwaltung* zur Zugriffsbeherrschung auf Daten über Rollen
- *Ablaufverwaltung*
- *Dateiverwaltung* zum Schutz des Zugriffs auf Daten außerhalb des PDM - Systems

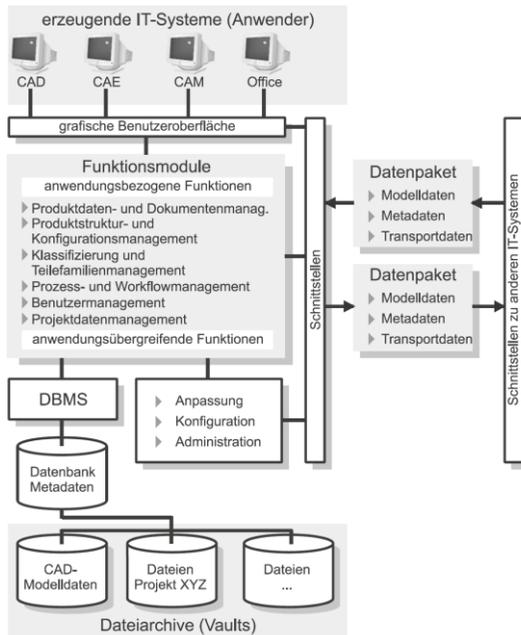


Bild 6.75 Prinzipielle Systemarchitektur von PDM - Systemen ([FG08] dort in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2219[VDI 2219])

Beim **Simulationsdatenmanagement (SDM)** werden die CAx-Daten verwaltet, archiviert und weiteren Prozessen zuführbar gemacht und in das PDM integriert. Die CAE-Prozessketten unterscheiden sich wesentlich von den übrigen Prozessen und Daten der Produktentstehung und so erfolgt die Strukturierung und Variantenbildung nicht produkt- sondern prozessbezogen z.B. nach Art der Lastfälle. Die Relation zwischen PDM und SDM ist bidirektional um die durch CAx identifizierten Optimierungsvorschläge im Produkt konstruktiv einzuarbeiten (s. Bild 6.76).

Die Verwaltung und Organisation der Beziehungen zwischen PDM- und SDM-Daten ist die Hauptaufgabe. Dafür sind von den namhaften CAx-Software-Herstellern eigene IT-Lösungen sowohl, als auch Module für gängige PDM-Systeme entwickelt worden. Die Herausforderungen für SDM wachsen mit der immer weiteren Verteilung der CAx-Aufgaben an „Zulieferer“ [RS12]. Erste Standardisierungsansätze sind über [VDA 4967] verfügbar.

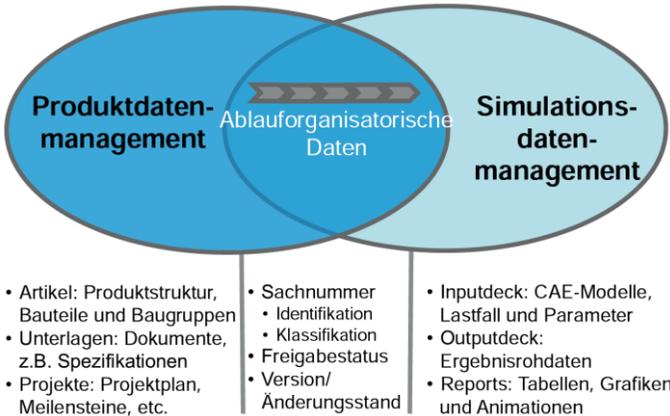


Bild 6.76 Integration von PDM- und SDM-Konzepten [RS12]

Fabrikdatenmanagementsysteme (FDM) zielen nach [RS12] darauf ab, den Stand aktueller Fabrikstrukturen identifizieren zu können, Fortschreibungsprozesse der Fabrik gezielt zu steuern und die Flexibilität von Fabrikstrukturen zu erhöhen. Sie dienen als integrative Gesamtlösung und Werkzeuge der Digitalen Fabrik der Harmonisierung disziplinspezifischer isolierter IT-Werkzeuge und Datenbestände. Damit werden die in [VDA 4967] definierten Ziele nach ganzheitlicher Planung, Evaluierung und laufender Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt erreichbar. Ziel der FDM-Systeme ist die Bereitstellung von Produkt-, Prozess- und Ressourcendaten und daraus die Beschleunigung und Absicherung der Produktionsplanung aufgrund der Reduzierung redundanter, inhomogener und inkonsistenter Datenhaltung.

**6.10.2.3 Strategien des virtual engineerings:
Simultaneous, concurrent und cross enterprise engineering**

Industrielle Entwicklungsprozesse kennen Zusammenarbeitsmethoden schon seit Jahren, die durch den Einsatz von IT-Lösungen zu neuen Möglichkeiten führen. Vernetzte Prozesse ermöglichen eine effizientere parallele Vorgehensweise anstelle der etablierten Seriellen. Dazu bedarf es neben einer der Hauptanforderungen, der Implementation von wissensbasierten workflows [HIR11], in frühen Entwicklungsphasen der Einhaltung einiger Punkte [FEL13a]:

- Iterationen, das heißt eine Wiederholung eines Arbeitsschrittes, eines Hauptarbeitsschrittes oder sogar nochmaliges Durchlaufen einer ganzen Konstruktionsphase, möglichst minimieren.
- Parallelisieren von Arbeitsschritten zur Förderung der Effizienz der Produktentwicklung.

Dazu haben sich die folgenden Methoden in der Entwicklung und Konstruktion mehr oder weniger verbreitet (s.u.).

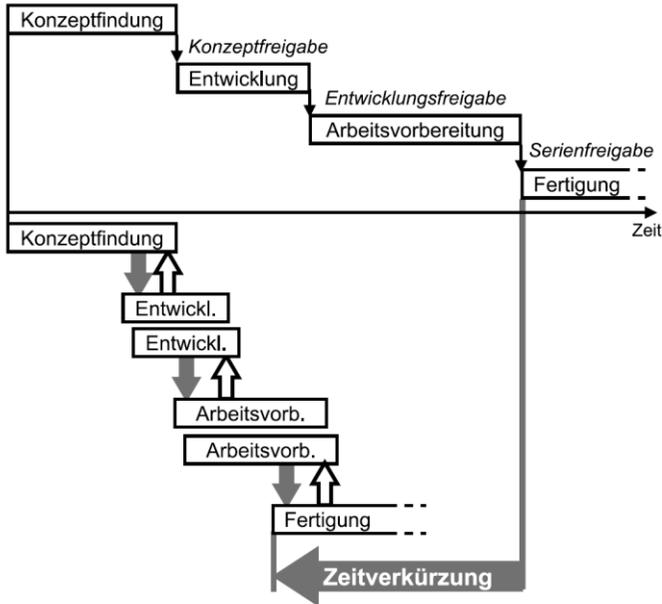


Bild 6.77 Durchlaufzeitverkürzung durch Simultaneous Engineering [VDI 2209]

Simultaneous engineering (SE) bedeutet nach [VDI 2209] „überlapptes (paralleles) Bearbeiten von unterschiedlichen Aufgaben mit laufender Abstimmung des Fortschritts. Beispielsweise kann die Planung der Herstellprozesse in der Prozessplanung fast parallel zur Konstruktion erfolgen, wobei ein gewisser Vorlauf der Konstruktion nötig ist, damit Daten vorhanden sind, auf die die Prozessplanung zugreifen kann. Die entscheidende Frage für die Parallelisierung von Aufgaben lautet: Wann sind die Ergebnisse der vorlaufenden Aufgabe so weit stabil, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung und die damit verbundenen Änderungskosten geringer sind als die Kosten, die durch zu spätes Weiterarbeiten verursacht werden?“

Bild 6.77 zeigt die Phasen eines Entwicklungsvorhabens mit dem zeitverkürzenden Effekt der simultanen Vorgehensweise: „Durch die intensive Kommunikation können Teil- oder vorläufige Ergebnisse frühzeitig weitergegeben werden, sodass die anschließenden Tätigkeiten eher begonnen werden können. Für die erfolgreiche Parallelisierung muss ein ständiger Informationsaustausch zwischen allen Beteiligten stattfinden.“

Das 3-D-CAD-System mit seiner allen zugänglichen und aktuellen gemeinsamen Datenbasis ist daher das wichtigste Hilfsmittel bei der parallelen Bearbeitung. Um Verluste zu vermeiden und eine volle Assoziativität zwischen allen erzeugten Modellen und Daten zu erreichen, muss eine durchgängige CAD-Unterstützung angestrebt werden“ [VDI 2209]. Der Änderungsaufwand aus beispielsweise FEM-Erkenntnissen (Bild 6.78) wird umso geringer, je integrativer Engineering betrieben wird – sprich simultaneous engineering eingeführt ist – und je leistungsfähiger das Datenmodell und die Handhabung der Daten durch unterstützende System (PDM, SDM) ist.

Simultaneous engineering reduziert nicht notwendigerweise den Aufwand an man-power für ein Vorhaben, aber in jedem Fall reduziert es den Zeitbedarf der Bearbeitung [HIR11]. Durch eine Bündelung verschiedener Kompetenzen und Disziplinen in einem Entwicklungsteam kommt es zu einer Reduzierung der Entwicklungszeit und dabei auch zu einer Qualitätssteigerung. Die Mitglieder eines zeitlich befristet zusammengesetzten simultaneous engineering Teams sollten aus allen an der Produktentwicklung beteiligten Bereichen besetzt werden. Auch die Einbindung des Kunden und der Lieferanten in die Entwicklung wird beim Simultaneous Engineering gefordert. Das Arbeiten nach dem Prinzip von SE erfordert ein hohes Maß an Planungsaktivitäten und bei Innovationen und Neuentwicklungen mit komplexen Aktivitäten ist dieses Vorgehen oft nur bedingt anwendbar (vgl. [FEL13a] und [EM13]).

Die Hauptvorteile und deren Auswirkungen können wie folgt zusammengefasst werden [GAR14]:

- Vorverlagern von Erkenntnisprozessen: Unnötige Schleifen in Entwicklungsprozess komplexer Varianten werden vermindert
- Kapazitätseinsatz konzentrieren auf frühere Phase der Entwicklung: Forderungen, die an die Variante gestellt werden, finden von Anfang an Berücksichtigung
- Erhöhung der anteilsdeterministischen Prozesse: Unsicherheiten bei hoher Variantenanzahl werden minimiert
- Parallelisierung von Arbeiten: Verringerung von Ineffizienzen bei komplexer Produktstruktur und hoher Variantenanzahl
- Zulieferer als Entwicklungspartner aufnehmen: Variantenaspekte fließen frühzeitig in die Überlegungen der Zulieferer ein
- Einsatz von Tools: Reduzierung der Teilevielfalt, Nutzung von Synergien

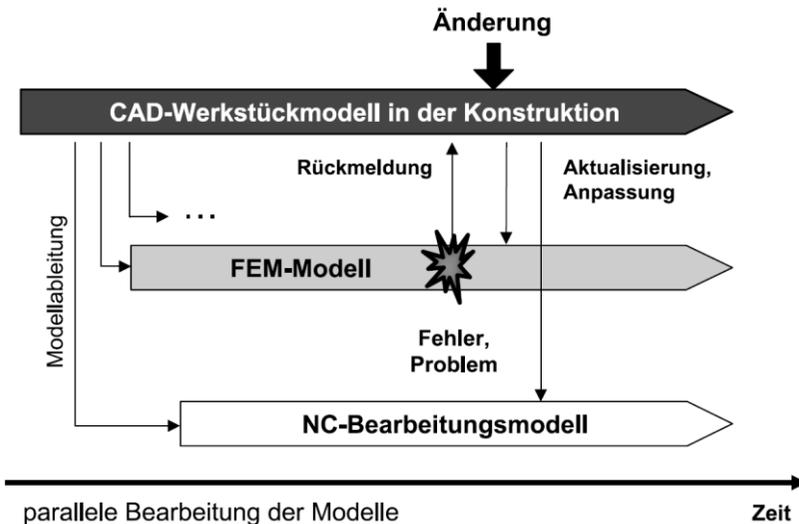


Bild 6.78 Parallele Bearbeitungsprozesse unterschiedlicher Domänen durch verknüpfte Datenmodelle [VDI 2209]

Ehrlenspiel und Meerkam geben in [EM13] eine kritische Betrachtung der Verbreitung und des Erfolgs des SE an. *Aus zwei Befragungen geht hervor, dass 39 % von ca. 1.700 Maschinenbauunternehmen SE vorwiegend aus Zeitgründen nutzen. 10 % davon in hohem Umfang, 29 % mittel bis gering. Noch mehr als im Maschinenbau wird SE in der Medizin-, Mess-, Steuer-, Regelungstechnik, sowie in der Optik und im Fahrzeugbau genutzt. Dort setzen 25 % der Unternehmen SE in hohem Umfang ein. In anderen Branchen trifft dies nur für 5 % der Unternehmen zu. Ähnliche Verhältnisse bestehen für den Einsatz von Computersimulation und Virtual Reality.* Für den Bereich der Technischen Logistik sind diese Zahlen nicht bekannt, es liegt aber die Vermutung nahe, dass aufgrund des hohen Zeitdrucks in der Branche bei den vorwiegend aus Variantenkonstruktionen bestehenden Projekten simultane Prozesse zwischen den folgenden Bereichen hauptsächlich zu finden sind:

- Projektierung auf Layout-Ebene (Materialflussrechnung)
- Produktkonfiguration durch Variantenkonfiguration
- Einkauf
- Fertigungsplanung u. Fertigung

„Über die Gründe dieser eher eingeschränkten SE-Nutzung kann man nur spekulieren. Eine Ursache für die doch gegenüber früheren Hoffnungen geringere Nutzung ist sicher die, dass die Maschinenbauunternehmen grundsätzlich neue Produktkonzepte eher selten realisieren und damit auch selten mit Zusammenarbeit der Spezialisten in SE-Teams. Es werden nämlich 84 % der Produkte aus einem Grundprogramm durch Variantenkonfiguration nach individuellen Kundenwünschen erstellt. Eine routinemäßige Arbeitsparallelisierung ist dann einfach aus Lieferzeitgründen zweckmäßig.“

Man meint nicht nur in der Forschung, sondern auch in der Praxis, dass Integration und Parallelisierung von Abläufen vornehmlich ein technisches Problem seien, was sie aber nur zu einem geringen Teil sind. Die Haupt-Reibungsprobleme und Fehlerquellen bei Projekten sind seit jeher menschlich bedingt. In der Technik und den sie befruchtenden Wissenschaften herrscht nämlich ein materialistisches Denken vor, das sich an technischen, naturwissenschaftlichen Fakten orientiert und begeistert. – „Human Factors“ oder „Soft Skills“ seien etwas für Psychologen oder Frauen und kein Thema in der Technik. – Man meint deshalb, die zur Zusammenarbeit notwendige menschliche Kompetenz, Verantwortlichkeit, Motivation und Gefühlslage stelle sich von selbst ein. Das stimmt einfach nicht! Nach der Erfahrung der Autoren (Anm.: Ehrlenspiel und Meerkamm) liegt hierin ein wesentlicher Grund für die relativ geringe Nutzung des SE und von integrierten Abläufen“ [EM13].

Concurrent Engineering ist nach [VDI 2209] das „Aufteilen und überlappte Bearbeiten eines einzelnen Arbeitsschritts. Beispielsweise wird eine Automobilkarosserie an vielen Stellen gleichzeitig konstruiert. Die Konsistenz dieser parallelen Bearbeitung wird durch die Definition von Bauräumen, Gestaltungszonen und den damit verbundenen Schnittstellen und Referenzen sichergestellt.“

Mansour stellt als Unterschied in seiner Arbeit heraus (aus [HER10]), dass Concurrent Engineering stärker auf eine durchgängige Rechnerunterstützung der Entwicklung abzielt, während im Simultaneous Engineering eher organisatorische

Maßnahmen und der Methodeneinsatz betont werden. Nach [EM13] ist der „Unterschied zwischen SE und Concurrent Engineering (CE) vor allem darin, dass SE bewusst auf die Parallelisierung von Produkt- und Produktionsentwicklung abzielt, während CE im Schwerpunkt eine optimale Produkterstellung durch interdisziplinäre Zusammenarbeit im Team anstrebt. In der Bundesrepublik Deutschland wird beides meist unter SE zusammengefasst. In der Praxis wird es auch einfach als (interdisziplinäre) Projektarbeit bezeichnet.“

Frontloading wird nach [RS12] im Kontext von Simulationsaufgaben genannt mit dem Ziel, möglichst früh im Entwicklungsprozess Fehler aufzudecken und diese mit geringem Aufwand zu beheben. Nach [HIR11] wird frontloading in feasibility-Studien und der Produktplanung in der Frühphase verwendet um Produktspezifikationen so früh wie möglich zu definieren und zugehörige Lösungen zu finden. Um dies zu erreichen ist umfangreicher Wissens(wieder)einsatz notwendig. Dazu sind wissensbasierte (KBE) Ansätze in Kombination mit Konstruktions- und Simulationsaufgaben dienlich. Dadurch können funktionelle Fehlentwicklungen vermieden werden, wenn in einer Frühphase der Entwicklung die Entscheidungsmöglichkeiten noch breit sind.

cross enterprise engineering (CEE) ist nach [ES09] eine mehrdimensionale Zusammenarbeit in allen PEP Phasen in unterschiedlichen Netzwerken auf Ebenen der Mechanik, Elektronik, Software und Dienstleistung. Parallelisierung, Verteilung und Vernetzung von Projekten, Produkten und Prozessen und beginnt bereits in sehr frühen Entwicklungsphasen und umspannt sowohl die Zulieferer und die Kunden als auch die verschiedensten internen und externen PLM-Lösungen. „CEE bedeutet, dass Teile, Baugruppen, Komponenten und Systeme über örtliche, unternehmerische und systemtechnische Grenzen hinweg geplant und entwickelt werden.

Kommunikation und der Informationsaustausch werden zunehmend über das Intra- bzw. Internet abgewickelt.“ [ES09] Bild 6.79 zeigt die Veränderung bezüglich der zunehmenden Parallelisierung und Vernetzung der Produktentstehungsprozesse historisch und in ihrer Effizienz.

Champy beschreibt Cross Enterprise Engineering – er nennt es X-Engineering – folgendermaßen (aus [ES09]): *The walls between a company, its customers, and its suppliers – even between competitors – are coming down. In a world of free-flowing information and Products, X-ENGINEERING the cooperation reveals a radical new vision of the Cooperation.*

Durch diese zunehmende Parallelisierung der Produktentwicklung und –entstehung kann man nach [ES09] einige Anforderungen an die diese Zusammenarbeit unterstützenden IT-Lösungen festmachen:

Integration der IT-Lösungen über den gesamten Produktlebenszyklus, das bedeutet von der ersten Idee und Lösungskonzeption bis zum Recycling. Die Integration der IT-Lösungen über den Produktlebenszyklus muss über Daten und/oder Funktionsschnittstellen gewährleistet werden, z.B. STEP. In der Praxis bedeutet dies die Einbindung einer Vielzahl von über den Produktlebenszyklus betriebsspezifisch eingesetzten IT-Lösungen, z.B. PPS (Produktionsplanung und -steuerung), ERP und CAD.

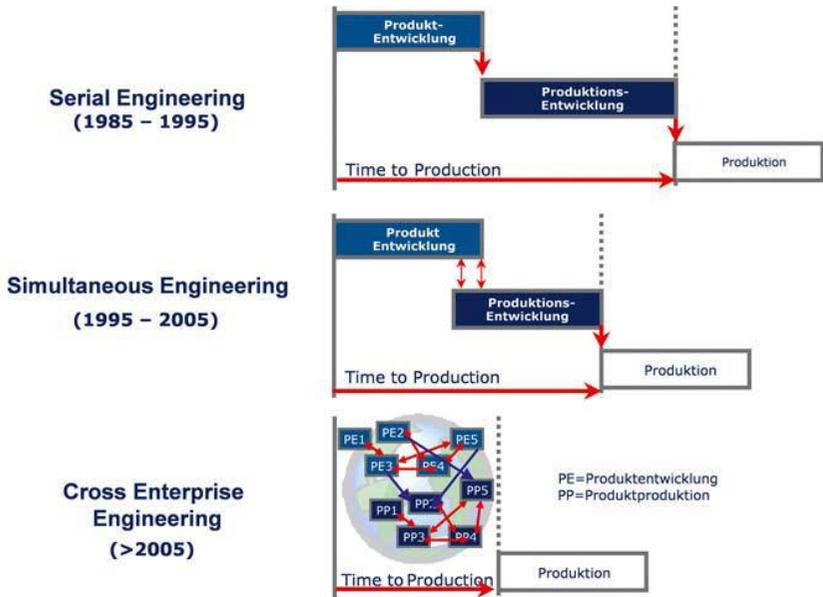


Bild 6.79 Veränderungen der Produktentstehungsmethoden [ES09]

Föderation der IT-Lösungen in einem dezentral und verteilt arbeitenden Unternehmen und im Rahmen der Zuliefererkette auch über die Unternehmensgrenze hinaus. Föderation der Daten und Prozesse wird aus der Verteilung über den gesamten Lebenszyklus, die Interdisziplinarität sowie den zunehmend vernetzten Entwicklungs- und Produktionspartnerschaften gefordert.

Die Verteilung kann:

- innerhalb des Unternehmens z.B. auf mehrere Standorte und Lebenszyklusphasen,
- zwischen Unternehmen eines gemeinsamen Zuliefererverbunds und
- zwischen Unternehmen in einer Kunden/Zulieferer-Beziehung erfolgen.

Interdisziplinarität bedeutet die Kooperation verschiedener Disziplinen (Domänen) der Produktentstehung. Neben dem bereits klassischen mechatronischen Ansatz (Mechanik, Elektrik/Elektronik, Software) sollen auch die Hydraulik, Pneumatik und auch zum Produkt gehörige Dienstleistungspakete (Montage, Training, Instandhaltung und Instandsetzung, etc.) unterstützt werden. Die Kombination von materiellen und dienstleistungsorientierten Produktkomponenten wird auch hybride Leistungsbündel genannt.

6.10.3 Integrierte Produktentwicklung

„Die integrierte Produkterstellung stellt einen Lösungsansatz zur Überwindung von Problemen der heutigen, stark arbeitsteiligen Produkterstellung dar. Der Wissenschaftsfortschritt hat nämlich notgedrungen zur Arbeitsteiligkeit geführt.

Menschen sind seit dem späten Mittelalter (Universalgelehrte) und dem exponentiellen Wissenszuwachs nicht mehr in der Lage, alles zu wissen und alles zu können, weshalb es Spezialisten gibt. Auch die Unternehmen haben sich extrem verästelt in einzelne spezialisierte Abteilungen. Ein Produkt ist aber ein Ganzes aus vielen Teilen, vielen unterschiedlichen Fertigungsprozessen, vielen Eigenschaften und erlebt viele Lebensphasen von der Planung bis zum Recycling. Deshalb müssen zur Überwindung der Spezialisierung integrierende Denkmethode, Organisationsformen und Techniken erfunden und von kompetenten Mitarbeitern verwirklicht und umgesetzt werden. Da die Spezialisierung weiter zunehmen wird, müssen im Gegenzug auch diese Integrationsmaßnahmen weiter zunehmen.“ [EM13]

„Das Wichtigste sind aber nicht die (computergestützten) Methoden und Techniken, sondern dass die Menschen zusammenarbeiten wollen und Freude daraus schöpfen. Sie schaffen dann „von selbst“ alles andere. Und Mitarbeiter sind dann erfolgreich, wenn sie in ihrem Bereich Gestaltungsfreiheit haben und wenn sie für Ihre Arbeit motiviert sind. Motivation durch Anerkennung und Lob ist das „Gewürz der Arbeit. Es ist ein besonderes Anliegen der Autoren (von [EM13]), erkennbar zu machen, dass ein Überbetonen der Arbeitsteilung und des Spezialistentums in Selbstverwirklichungsmentalität auf Kosten des gemeinsamen, kooperativen und integrativen Handelns geht und so kein optimales Produkt und dies auch nicht termingerecht und zu günstigen Kosten entstehen kann.“ [EM13]

„Unter „integrierte Produktentwicklung“ (IPE) verstehen die Autoren (Ehrlenspiel und Meerkamm) die zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen/Hilfsmittel, genutzt von ganzheitlich denkenden Produktentwicklern, wie sie mit den vier Bereichen in Bild 6.80 zu sehen ist. Das Bild besteht also aus den „Kleeblättern“ Mensch, Methodik, Organisation und Technik. Diese Komponenten sind die Hauptfelder der IPE, die nur bei Nichtvernachlässigung einzelner Aspekte zur erfolgreichen IPE werden.

Erfolgreiche Unternehmen lösen das Spannungsfeld zwischen Zeit, Kosten und Qualität mit einer „gelebten“ Integrierten Produktentwicklung. Nach Untersuchungen von McKinsey erreichen Unternehmen, denen diese Kulturveränderung gelingt, kürzere Entwicklungszeiten bei niedrigeren Kosten und gleichzeitig höherer Qualität.“ [EM13]

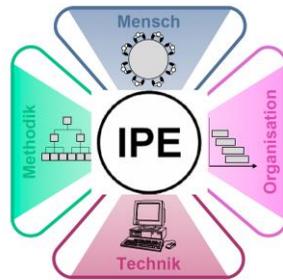
„Die Einführung und Umsetzung der integrierten Produktentwicklung erfordert in den Unternehmen eine Abkehr vom traditionellen, rein funktionsorientierten und hierarchischen Denken und Arbeiten. Interdisziplinäres, teamorientiertes Arbeiten und life-cycleorientiertes Denken stellen hohe Anforderungen an die Produktentwickler.“ [EM13]

Die einzelnen Bereiche des Kleeblattes (Bild 6.80) sind einerseits Fragestellungen, andererseits aber auch konkrete Handlungsanweisungen und Methoden, die im Rahmen der IPE zum gewünschten Erfolg führen. Viele Bereiche daraus sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher detailliert v.a. aus den Bereichen Methodik und Technik und führen mit den eingeführten Methoden zur Effizienzsteigerung und Verbesserung konstruktiver Tätigkeiten in der Technischen Logistik.

„Bei der konventionellen – nicht integrierten – Produkterstellung arbeiten die betroffenen Abteilungen selbstverständlich auch zusammen. Andernfalls würde

kein Produkt entstehen können, da dies gerade als Ganzes, aus dem Zusammenwirken vieler Spezialisten, erzeugt wird. Bei der integrierten Produkterstellung jedoch werden in hohem Maße bewusst organisatorische Methoden zur Gesamtoptimierung des Produkts und der Produkterstellung eingesetzt.“ [EM13]

Zur IPE gehören nach [EM13] die im Folgenden gelisteten Arten und Methoden der Integration:



Mensch

- Integration der Leistungsbereitschaft
 - gemeinsames Wollen
 - Motivation
- Integration der Ziele
 - für alle gleiche Ziele, aber heruntergebrochen
 - Mitarbeiter-Beteiligung
 - erfolgsorientierte Bezahlung
- integratives Wissen
 - Ausbildung z.T. als Generalist
 - systemtechn. Wissen
 - Weiterbildung
 - Job-Rotation

Methodik

- Integration der Kunden
 - Einbezug der Kunden in die Produktentwicklung
 - Kooperation mit Pilotkunden
- Aufgabenintegration
 - Qualitätsmanagement TQM mit QFD
 - Target Costing
 - Arbeitsanreicherung, Fertigungsinseln
 - Gruppen- / Teamarbeit
 - Reengineering
 - Planung u. Ausführung in einer Person
 - KVP, Kaizen, Verbesserungswesen
- Methodenintegration
 - Nutzung übergreifender Methoden: Konstr. Methodik, IPE, Wertanalyse
 - Systemtechnik
 - Verwendung einheitl. Begriffe

Organisation

- Aufbauintegration
 - Produktorientierte Organisation (Spartenorg.; Profit-Center
 - flache Hierarchie
 - Verantwortungsdelegator
- Ablaufintegration
 - Parallelisierung von Tätigkeiten
 - Projektmanagement
 - Concurrent Engineering
 - Fertigungs- u. Kostenberatung
 - konstruktionsbegleitende Kalkulation
 - Wertanalyse
 - Qualitätszirkel
 - Design-Review, FMEA, DFA, DFM
 - Kooperation mit Systemlieferanten
- örtliche Integration
 - gemeinsame Arbeitsräume
 - Entwicklungs-Zentren
 - Segmentierung

Technik

- Datenintegration
 - Rechnerintegrierte Entwicklung PDM; PLM; CAD-CAM; CAD-CAQ;
- Integrative Eigenschaftsfrüherkennung
 - Simulation
 - Virtual Reality
 - Rapid Prototyping
 - Digital Mock-up;

Bild 6.80 Integrierte Produktentwicklung mit vier Komponenten [EM13]

6.11 Aspekte der Konstruktion

Entwicklung und Konstruktion sind DIE Kernbereiche mit DEN Kerntätigkeiten vieler produzierender Unternehmen. Zur näheren Betrachtung bedarf es einiger Definitionen, da sogar vielfach für die Abteilung oder Arbeitsgruppe eines Unternehmens, die das Elaborat „Konstruktion“ physisch oder als Zeichnung/Modell hervorbringt sogar derselbe Begriff „Konstruktion“ verwendet [EM13]. Lossack [LOS06] wirft ein, dass jeder weiß, was konstruieren ist, und es dennoch keiner weiß. Dazu definiert er Konstruieren als zielgerichtetes Handeln, bei dem ein Erschaffer mitgedacht werden muss. Im Unterschied zu den Naturwissenschaften herrscht bei den der Konstruktion zugrundeliegenden Ingenieurwissenschaften kein Ursache-Wirkung-Zusammenhang sondern eine Zweck-Mittel-Beziehung vor. Dies erfordert andere Methoden und hat andere Erkenntnismöglichkeiten, wobei die aus Empirie induktiv gewonnenen Erkenntnisse eine Gemeinsamkeit darstellen.

Nach [RS12] gilt die Konstruktion als Königsdisziplin des Ingenieurs wobei in den Köpfen der Konstrukteure Produktions-Dienstleistungen für König Kunde entstehen. Damit verantworten Konstrukteure den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses – oder, anders gesagt, sie tragen Verantwortung für Erfolg oder Misserfolg: bestechende konstruktive Lösungen standen am Anfang manches unternehmerischen Aufstiegs – missglückte Konstruktionen waren nicht selten der Auslöser des Niedergangs.

Ehrlenspiel [EM13] beschreibt die Konstruktionstätigkeit als eine Entwicklungstätigkeit, ohne dass die unmittelbare Einbeziehung von Musterbau und Versuch bei der jeweils anstehenden Aufgabe nötig ist. Dazu wird unter Produktentwicklung in der Praxis oft auch der ganze Prozess der Produkterstellung verstanden. Die enge Zusammenarbeit und gute Motivation sind Voraussetzung und das Vordringen der Datenverarbeitung verlangt mehr wissenschaftliche Durchdringung und den Einsatz von Methoden. Nur so können die seit Einführung von CAD steigenden Arbeitsplatzkosten in einen Rationalisierungsgewinn umgewandelt werden. Konstruieren ist lehrbar:

Die Ziele der Entwicklung und Konstruktion leiten sich von den Unternehmenszielen ab. In erster Linie muss das konstruierte Produkt den Erfordernissen des Marktes entsprechen, dieser Produkterfolg ist wesentlich [EM13]. Die Ziele können kategorisiert werden nach:

- Marktspezifische Ziele:
Eine hohe Qualität bei nicht zu hohen Preisen und kurzen Lieferzeiten zu liefern. (können sich widersprechen).
- Herstellerspezifische Ziele:
Interne Kosten und Aufwand für Konstruktions/Entwicklungsprozess geringhalten.
- Persönliche Ziele der Konstrukteure:
Diese identifizieren sich umfragegemäß am ehesten mit der kreativen Tätigkeit von Architekten in einer frei wirkenden Tätigkeit, was oft im Widerspruch zur Realität in den Unternehmen steht. Die integrierte Produktentwicklung versucht diesen persönlichen Zielen Methoden und Ansätze zur Seite zu stellen (Kap. 6.10.3).

Die Gliederung bzw. Organisationsform vieler Unternehmen (existiert und interagiert mit seiner Umwelt) des allgemeinen Maschinenbaus folgt der Darstellung nach Bild 6.81. Für die Hersteller von Materialflusstechnik gelten einige Besonderheiten, s. auch dazu unten u. Bild 6.85.

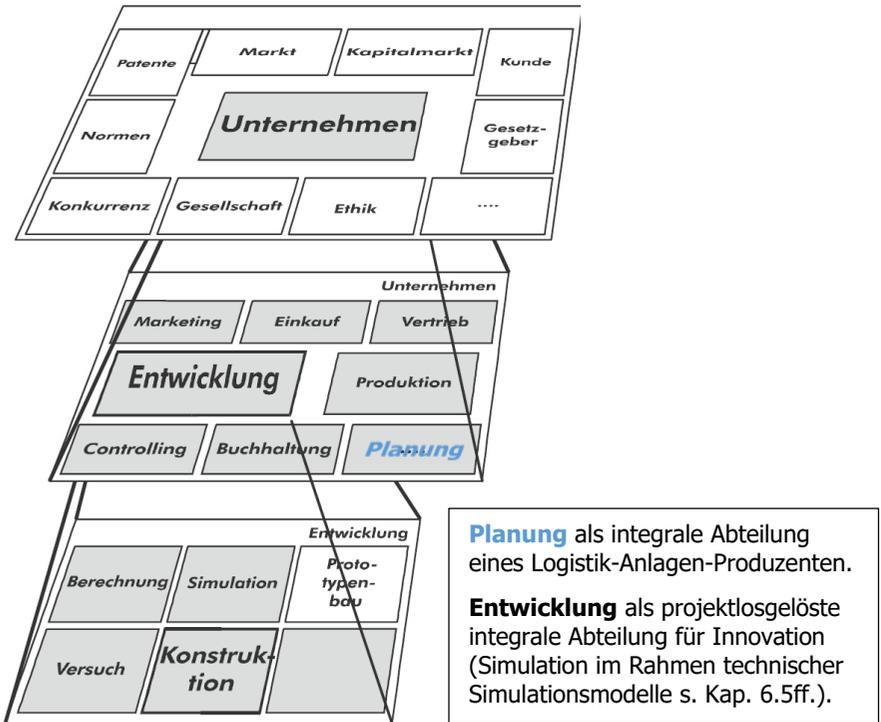


Bild 6.81 Unterscheidung von Entwicklung und Konstruktion nach [EM13]

In ihrer Rolle als produktgestaltender Hauptakteur ist die Konstruktion mit vielen Wissensbereichen querverbunden. Dazu zählen nach [FEL13a]:

- Naturwissenschaften u. ingenieurwissenschaftliche Grundlagen
- Produktionswissenschaften und Technologie
- Werkstoffwissenschaften
- Industrial Design und Kunst
- Informations- und Kommunikationswissenschaften (f. mechatronische Produkte)
- Erfahrungen und Ingenieur Anwendungen
- Wirtschafts- und Managementwissenschaften
- Geistes- Sozial- und Arbeitswissenschaften

Die Konstruktion mit der ihr übergeordneten Entwicklung wird so zum Knotenpunkt eines vielschichtigen Informationsumsatzes wie in Bild 6.82 dargestellt.

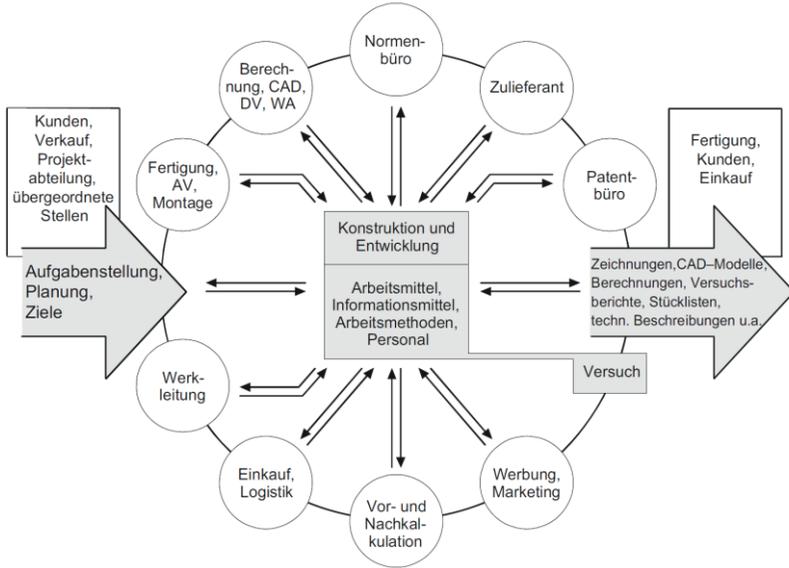


Bild 6.82 Entwicklung und Konstruktion als Knotenpunkt des Informationsumsatzes [EM13]

Der **Einsatz und die Ausbildung der Ingenieure** hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Während der Ingenieuranteil an der Gesamtbelegschaft von 1950 ca. 4 % betrug, ist er bis zum Jahr auf ca. 16,5 % gewachsen. 2010 waren 44% aller Ingenieure in der Entwicklung und Konstruktion tätig. Die Struktur darin ist Bild 6.83 zu entnehmen. Seit 1967 die Tagung der VDI-Fachgruppe Konstruktion mit dem Titel „Engpass Konstruktion“ [2/1] auf den gravierenden Mangel an gut ausgebildeten und entsprechend motivierten Konstrukteuren hinwies, ist nicht nur im deutschsprachigen Raum viel geschehen. Es gibt zwar immer noch zu wenig Konstrukteure, aber durch die Konstruktionsmethodik ist das Konstruieren wenigstens lehrbar geworden, und man muss es sich nicht, wie früher, nur durch Abschauen und Eigenerfahrungen mühsam und langsam aneignen [EM13]. Das Aufzeigen der Möglichkeiten und der Einsatz der Konstruktionsmethoden ist auch ein Anliegen dieser Arbeit und nimmt dementsprechend Raum ein.

Laut der in [ACA12] befragten Professoren steht im Kern der Tätigkeit eines Konstrukteurs der Entwicklungsprozess beziehungsweise die Synthese, also die kreative Entstehung einer Produktidee. Nur zwei Prozent der Befragten sehen die reine Umsetzung einer Idee zu einer Zeichnung als das Aufgabengebiet eines Konstrukteurs. Der Konstrukteur ist demzufolge Treiber und Gestalter im Entwicklungsprozess. Diese Rolle soll sich den Befragten zufolge in Zukunft verstärken.

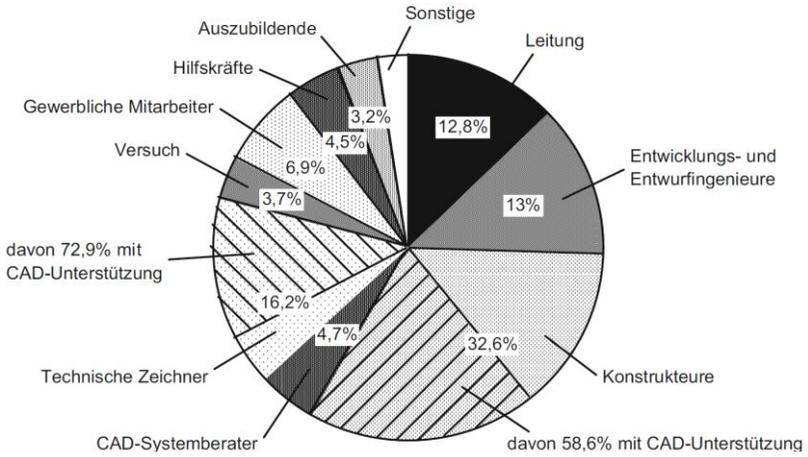
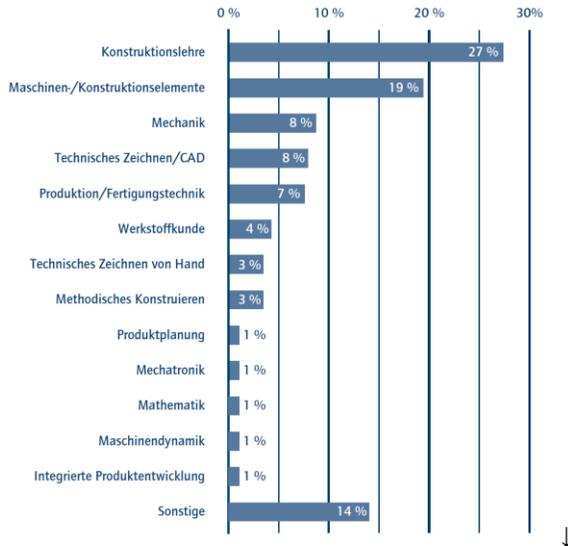


Bild 6.83 Mitarbeiterstruktur in Entwicklung und Konstruktion (VDMA) [EM13]

Die Fähigkeiten und Kenntnisse, die in der Ausbildung durch den Ingenieur zu erwerben sind sowie die sie beinhaltenden Fächer sind Bild 6.84 zu entnehmen. Einen breiten Raum nehmen darin die Bereiche Simulation, CAE, CAD und Konstruktionslehre (Konstruktionsmethodik) ein. Dies entspricht auch dem Anliegen dieser Arbeit, der Implementierung von Simulation und Konstruktionsmethodik in der Technischen Logistik.



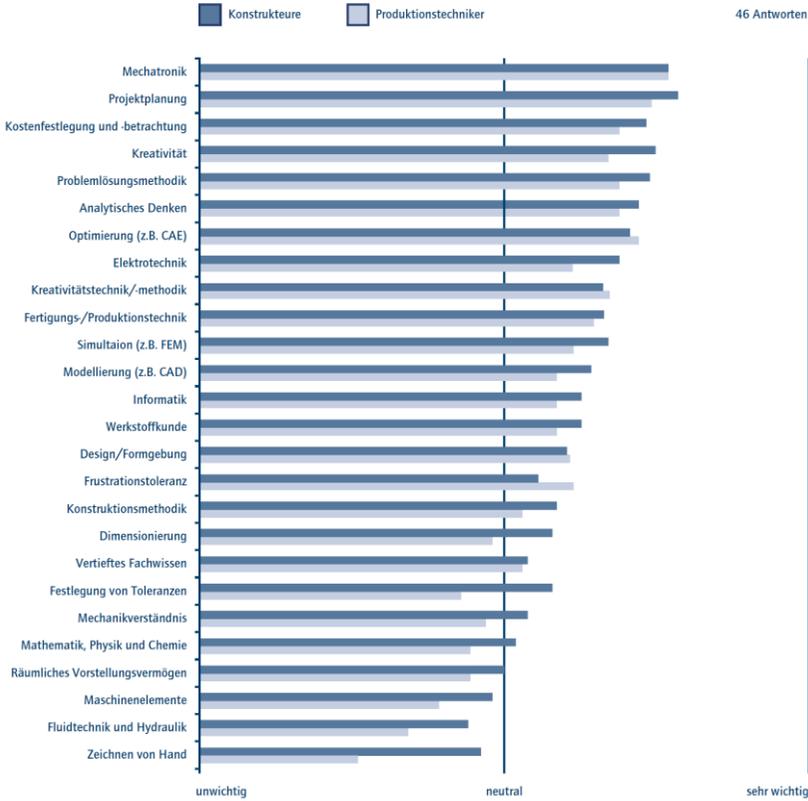


Bild 6.84 In der Ingenieursausbildung zu erwerbende Fähigkeiten, Kenntnisse und deren Fächer (Umfrage: n=46 bzw. n=143) [ACA12]

Besonderheiten der Konstruktion in der Logistik stellen sich durch das vorwiegend projektzentrierte Kundengeschäft der Anbieter von materialflusstechnischen Produkten dar. Bei der Planung und Realisierung von zentral gesteuerten Materialflusssystemen fallen unterschiedlichste Tätigkeiten an, welche aus unterschiedlichen Teilbereichen der Technik stammen (Bild 6.85). Die Betrachtung des Lebenszyklus' eines Materialflusssystems gibt Aufschluss darüber, welche Prozesse und Tätigkeiten grundsätzlich durchgeführt werden. Eine konstruktive Tätigkeit ist darin nicht angegeben, dieser kommt am ehesten die Tätigkeit „Layout“ als Aufgabenklärung-Phase I und „Konfigurierung“ als Ausarbeiten-Phase IV mit den Analogien des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221 [VDI 2221] (s. Kap. 6.11.1) gleich. Hierbei handelt es sich um eine Produktkonfiguration und maximal –adaption. Es handelt sich somit im Falle der Neugestaltung von Logistikanlagen um den Konstruktionstyp Varianten- bzw. Wiederholkonstruktion.

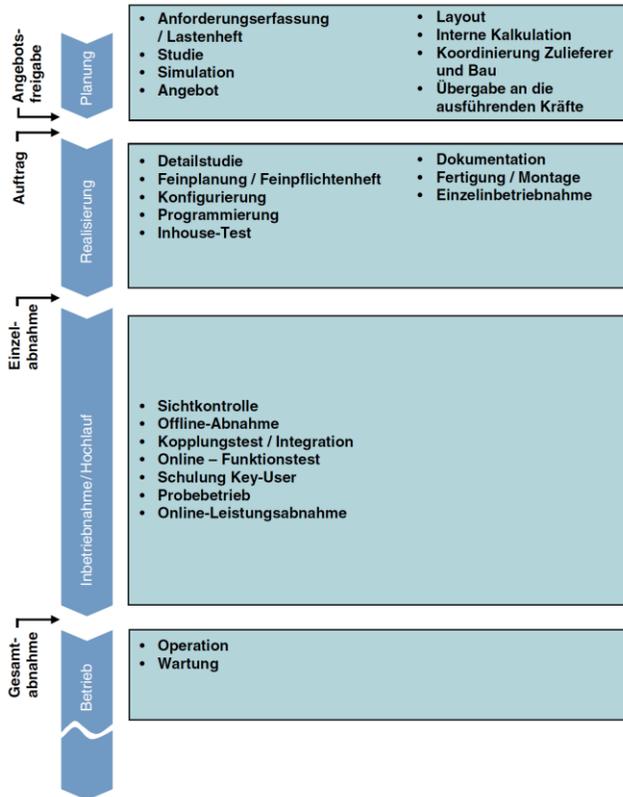


Bild 6.85 Lebenszyklus eines Materialflusssystems [GÜN10]

Für die Tätigkeit bzw. Phase „Planung“ existieren in der Literatur umfangreiche Methodenkonzepte ([HNS07], [AF07], [VDI 2385], [VDI 2498]) die allesamt nicht Bezug auf die konstruktiven Aspekte im Rahmen der Projektierung und Realisierung von Materialflusssystemen nehmen.

Die Produktentwicklung und –innovation in der Materialflusstechnik, wenn sie evolutionär ist und mehr als Adaptierungen darstellt, kann als weitestgehend losgelöst von Kundenaufträgen angesehen werden und ist dann eine Neu- oder Anpassungskonstruktion. Die Hauptkonstruktionsart für das Kundengeschäft der Technischen Logistik ist die Varianten- bzw. Wiederholkonstruktion. Zur besseren Abstimmung zwischen planerischen Tätigkeiten und den konstruktiv Nötigen wird die Zusammenschau von Planungsprozess und Produktentwicklungsprozess vorgestellt.

6.11.1 Methodisches Konstruieren – Konstruktions- und Produktentwicklungsprozesse³⁰²

Konstruieren kann mit VDI 2223 [VDI 2223] nach [LOS06] wie folgt definiert werden: „...Konstruieren ist das vorwiegend schöpferische, auf Wissen und Erfahrung gegründete und optimale Lösungen anstrebende Vorausdenken technischer Erzeugnisse, Ermitteln ihres funktionellen und strukturellen Aufbaus und Schaffen fertigungsreifer Unterlagen“.

Die Komplexität des Vorhabens des Vorhabens „Konstruieren“ stellt an die beteiligten Personen, die Konstrukteure, Anforderungen aus unterschiedlichsten Disziplinen und unterschiedlichster Schwierigkeitsgrade. Dieser kreative Prozess kann durch eine einzelne Person erledigt werden, oder wie heutzutage immer öfter üblich, in einem Team. Ingenieure bedienen sich dabei an Gesetzen und Erkenntnissen der Mathematik, Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften. Dabei hilft dem Konstrukteur neben fundierten Fachkenntnissen das Wissen um die Methoden zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses [FEL13a].

Der Fokus mit methodischer Entwicklung erfolgt hier auf „deutsche Ansätze“ (ausgenommen AxiomaticDesign) mit den Details und Begrifflichkeit nach [KR09]. Ansätze zur automatisierten und wissensbasierten generativen Funktionsmodellierung, wie in [KR09] entworfen, sind teilweise in Abschnitt 6.11.3 nachzulesen.

6.11.1.1 Geschichte und Ziele methodischen Konstruierens

Den Ursprung des methodischen Konstruierens genau festzulegen ist schwierig. Viele Betrachter sehen in den Konstruktionen von Leonardo da Vinci schon eine sehr systematische Herangehensweise. Auch Redtenbacher stellt im 19. Jahrhundert Grundsätze auf, die heute noch von großer Bedeutung sind und von seinem Schüler Reuleaux weiterentwickelt wurden. Es folgen darauf Beiträge von Bach, Riedler, Röscher und Laudin. Methodische Gesichtspunkte im heutigen Sinn sind erstmals anfangs des 20. Jahrhunderts bei Erkens zu erkennen. Auch Wögerbauer mit seiner Arbeit „Die Technik des Konstruierens“ wird oft als Ausgangspunkt des methodischen Konstruierens genannt. Wichtige Beiträge lassen sich auch in Werken von Franke, Bischoff, Hansen, Rodenacker, Niemann, etc. finden; Bild 6.86 stellt überblicksartig die Strömungen und Richtungen der Konstruktionswissenschaftler zuordnend dar (vergl. [FEL13a]). Es kann also festgehalten werden, dass es an Vorschlägen in den letzten Jahrzehnten nicht gemangelt hat. Im Weiterem werden vor allem die Beiträge von Rodenacker, Roth, Koller, Pahl/Beitz, Ehrlenspiel, Daenzer, Dörner, Altschuller und die VDI-Richtlinie 2221 detailliert.

Eine Konstruktionsmethodik soll dem Ingenieur behilflich sein, ideale Lösungen zu finden. Dabei sollten die Kreativität und der Lösungsraum nur insofern eingeschränkt werden, dass die ideale Lösung möglichst effektiv und effizient, ohne Umwege, erreicht wird. Die Methodik soll also den Konstrukteur in zweckmäßige Bahnen und Vorstellungen lenken und nicht die Erfahrung und Begabung des Konstrukteurs schmälern. Durch richtige Anwendung einer

³⁰² Dank für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meinen Diplomanden Benjamin Gartlacher [GAR14]

Konstruktionsmethodik kann die Leistungsfähigkeit und Erfindungsfähigkeit gesteigert werden und das Konstruieren selbst einsichtig und lernbar gemacht werden. Besonders bei Neukonstruktionen ist ein methodisches, schrittweises Vorgehen anzustreben, um wiederverwendbare Lösungsdokumente zu erhalten. Mit einer strukturierten Problemformulierung können die Anwendungsmöglichkeiten von bewährten Lösungen und Konstruktionskatalogen leichter ersichtlich werden. Durch den schrittweisen Aufbau vom Abstrakten zum Konkreten ist eine frühzeitige Auswahl und Optimierung der Lösungsprinzipien ohne viel Aufwand möglich. Für rechnerunterstützte Konstruktionsprozesse mit der Verwendung von wissensbasierten Programmen, Simulationssoftware, Berechnungsprogrammen, etc. ist die Verwendung einer Konstruktionsmethodik eine unabdingbare Voraussetzung [VDI 2209].

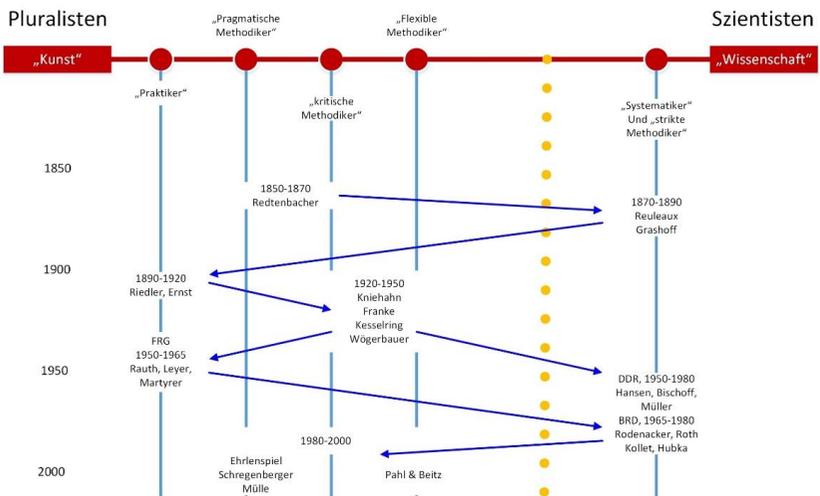


Bild 6.86: Prägende Personen der Konstruktionswissenschaften [GAR14]

So soll eine Konstruktionsmethodik folgende Punkte erfüllen:

- ein problemorientiertes Vorgehen ermöglichen, das heißt branchenunabhängig anwendbar sein,
- erfindungs- und erkenntnisfördernd sein,
- mit Begriffen, Methoden und Erkenntnissen anderer Disziplinen verträglich sein,
- Lösungen nicht nur zufallsbedingt erzeugen,
- Lösungen auf verwandte Aufgaben leicht übertragen lassen,
- geeignet sein für den Rechnereinsatz,
- lehr- und erlernbar sein,
- den Erkenntnissen der Denkpsychologie und Arbeitswissenschaft entsprechen, das heißt Arbeit erleichtern, Zeit sparen, Fehlentscheidungen vermeiden und tätige, interessierte Mitarbeit gewährleisten,

- die Planung und Steuerung von Teamarbeit in einem integrierten und interdisziplinären Produktentstehungsprozess erleichtern,
- Anleitung und Richtschnur für Projektleiter von Entwicklungsteams sein.

Bild 6.87 zeigt den Unterschied zwischen einer Lösungsfindung ohne explizite Methodenfindung, die Anwendung einer klassischen Ideenfindungsmethode und die Anwendung einer Konstruktionsmethodik.

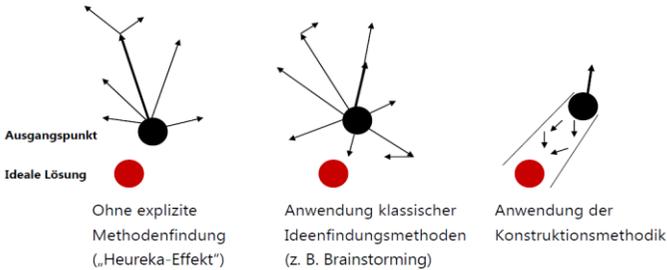


Bild 6.87: Herangehensweisen an das Konstruieren [FEL13b]

Die Ziele des Konstruierens mit einer Methodik fasst [EM13] wie folgt kategorisiert zusammen:

- Technische Ziele:
 - Hilfestellung bei der Entwicklung von neuartigen Produkten
 - Hilfestellung bei der Entwicklung von besseren Produkten mit optimalem Kundennutzen / Kundenkosten
- Organisatorische Ziele:
 - Rationalisierung der Konstruktionsarbeit
 - Verkürzung der Konstruktionszeit und der Produktlieferzeit
 - Erleichtern von Teamarbeit
 - Erleichterung des interdisziplinären Arbeitens
 - Nachvollziehbarkeit von Konstruktionen
 - Objektivierung der Konstruktionsarbeit
 - Verbesserung rechnergestützten Konstruierens
 - Verkürzung der Einarbeitungszeit für Konstrukteure
- Persönliche Ziele:
 - Hilfestellung in neuartigen Situationen
 - Steigerung der Kreativität
 - Nachvollziehbarkeit von Konstruktionen
 - Erweiterung des Problembewusstseins
 - Verbesserung der Präsentation der Konstruktion gegenüber Vorgesetzten, Kunden, ...
 - Erleichtern des Überblicks über das ständig wachsende Fachgebiet
 - Einarbeitung in ein neues Produktspektrum
- Didaktische Ziele:
 - Lehrbarkeit des Konstruierens
 - Rationalisierung der Lehre

6.11.1.2 Überblick Vorgehensmodelle

Es hat sich als nicht zielführend herausgestellt, ein einziges ideales Vorgehen zu entwerfen, das branchenübergreifend und für alle Produkte angewendet werden kann. Aufgrund der mannigfaltigen Einflussfaktoren welche auf einen Produktentwicklungsprozess einwirken und der großen Vielfalt an unterschiedlichen Produkten ist es praktisch unmöglich, ein einziges perfektes Modell für alle Anwendungen zu entwickeln. Dörner beschreibt dieses Problem folgendermaßen:

„Ein einziges ideales Vorgehen, eine „kanonisierbare Optimalform“ für alle möglichen sich darstellenden Entwicklungsprozesse, kann es aufgrund der Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Einflussfaktoren nicht geben.“ Dörner in [LIN05]

Aus diesem Grund ist nachfolgend eine Auswahl von Vorgehensmodellen angeführt. Dabei wird der Produktentwicklungsprozess aus verschiedenen Blickwinkeln und unter einem bestimmten Auflösungsgrad betrachtet (wie nach [LIN09]). Ehrlenspiel [EM13] strukturiert die Prozessmodelle ähnlich, indem er sie beginnend mit den sehr einfachen Strukturen, wie dem TOTE-Modell (s.u.), bis hin zu sehr komplexen Ablaufdarstellungen mit klar definierten Arbeitsschritten und zeitlichen Bezügen nach Komplexität unterteilt.

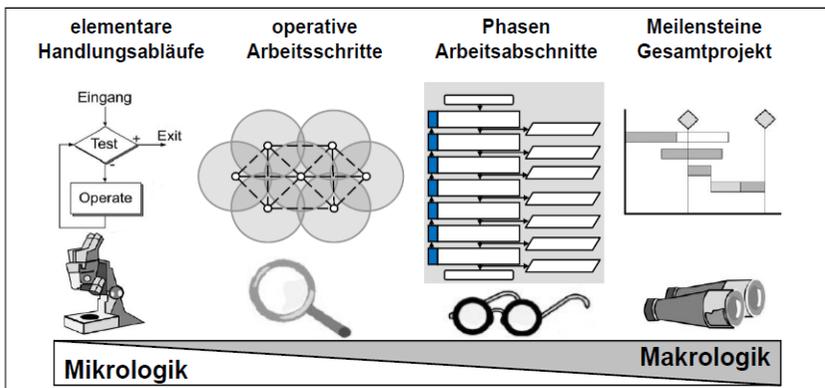


Bild 6.88: Einteilung der Prozessmodelle [LIN09]

Bild 6.89 gibt einen Überblick der in diesem Kapitel betrachteten Vorgehensmodelle und soll die Zuordnung zu den Ebenen verdeutlichen; die grau gepunktet gekennzeichneten Modelle werden unten näher detailliert.

Nach Bild 6.88 ist der Auflösungsgrad auf der Ebene der elementaren Handlungsabläufe am höchsten und die Komplexität am geringsten. Man spricht von der Mikrologik und als typisches Beispiel kann das TOTE-Modell herangezogen werden. Betrachtet man operative Arbeitsschritte so ist der Detaillierungsgrad nicht mehr ganz so groß. Als Vertreter dieser Kategorie kann das Münchner Vorgehensmodell gesehen werden (vergl. [LIN09]). Die Bekanntesten und mit dem Begriff Vorgehensmodell am meisten in Verbindung gebrachten Prozesse sind jene auf der Ebene von Phasen- und Abschnittsmodellen. Hierzu können das generelle Vorgehen beim Entwickeln und

Konstruieren nach VDI 2221 sowie das Prozessmodell nach Roth oder das V-Modell gezählt werden (vergl. [LIN09], [FEL13b], [VDI 2206]). In der Makrologik stehen die termingerechte Planung der Abläufe eines Projektes und die Kapazitätsplanung im Vordergrund. Es soll ein Überblick über das Gesamtprojekt gegeben werden.

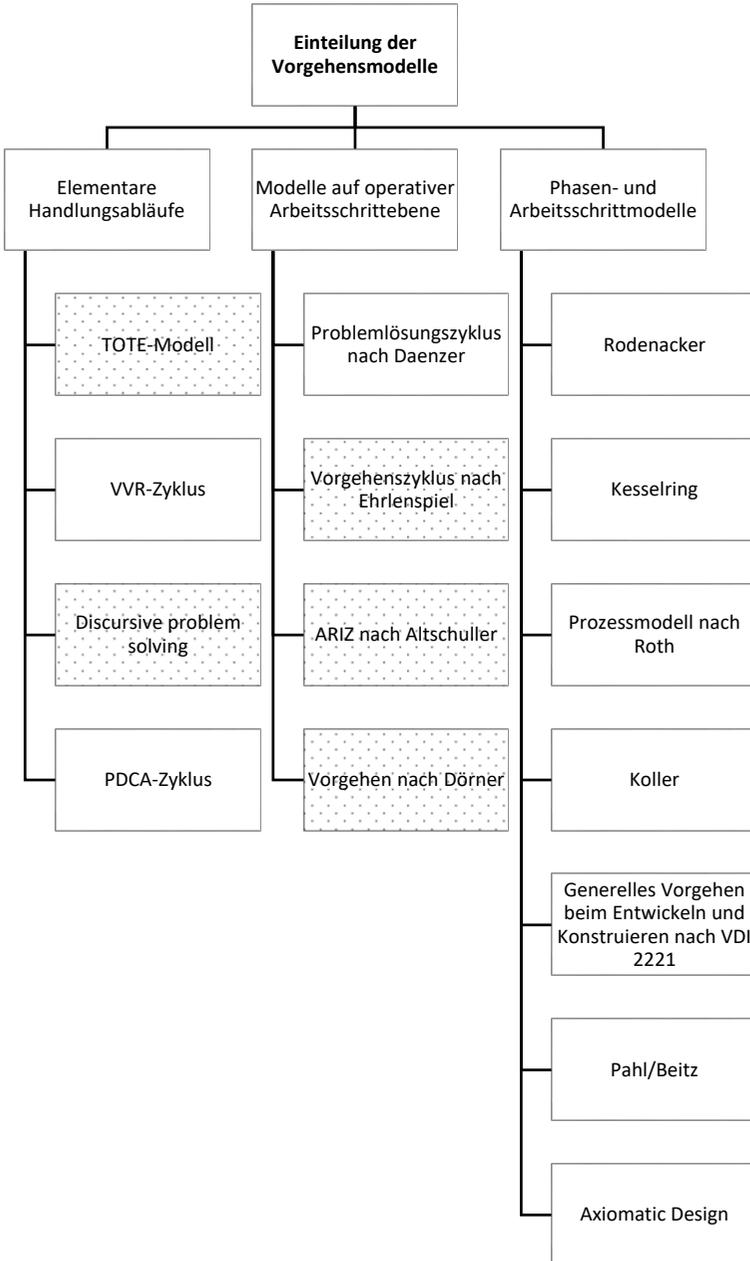


Bild 6.89: Strukturierung der Vorgehensmodelle, vergl. [LIN09] aus [GAR14]

6.11.1.3 Elementare Handlungsabläufe

Prozessmodelle auf der Ebene der Mikrologik werden auch als elementare Denk- und Handlungsabläufe angesehen, da sie eine einfache Struktur und sehr allgemeine Arbeitsschritte besitzen. Der bekannteste Vertreter dieser Modelle ist das TOTE-Modell. Des Weiteren soll der VVR-Zyklus, das Modell der diskursiven Problemlösung und der PDCA-Zyklus genauer betrachtet werden. Letztere bauen auf dem TOTE-Modell auf und werden deshalb meist als Weiterentwicklungen dieser Vorgehensweise gesehen.

Als natürliche Vorgehensweise des Menschen bei der Lösung von Problemen wird sehr oft das *TOTE-Modell*, **TEST-OPERATE-TEST-EXIT**, herangezogen, da auch bei elementarsten Denkprozessen dieses iterative Vorgehen zu beobachten ist.

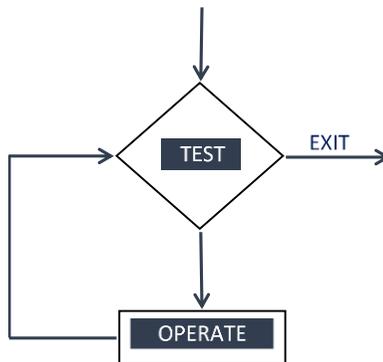


Bild 6.90: TOTE-Modell

Dieses kybernetische Modell besteht aus zwei Prozessen. TEST wird dabei als Prüfprozess gesehen und OPERATE als Ausführungsprozess. Im ersten Schritt folgt eine Analyse der Ausgangssituation, was dem ersten „Test“ entspricht. Darauf folgt die Sequenz „Operate“, in der die eigentliche Handlung erfolgt. Im anschließenden „Test“ wird das Ergebnis überprüft.

Falls der gewünschte Zustand zufriedenstellend erreicht wurde, kann der Prozess mittels „Exit“ verlassen werden, anderenfalls wird die Handlungsoperation abgewandelt und erneut durchgeführt. Somit wird diese Schleife so oft durchlaufen bis das Ergebnis befriedigend ist [FEL13a], [LIN05].

Bei dem Modell der *diskursiven Problemlösung* wird vor allem auf die abstrakte Formulierung des Zieles großer Wert gelegt. Als entscheidende Impulse für die Lösungsfindung, werden vorhandene Lösungsalternativen evaluiert, oder die gegebene Situation analysiert. Dieses von Wulf entworfene Modell kann als eine Weiterentwicklung des TOTE Ablaufs gesehen werden [LIN05].

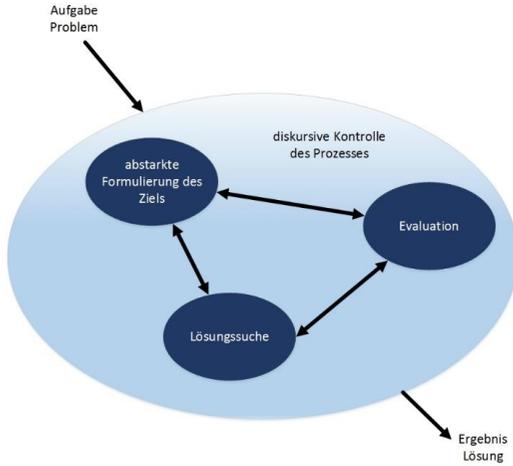


Bild 6.91: Diskursiver Prozess nach Wulff [LIN05]

Der Vergleichs-Veränderungs-Rückkoppelungs-Zyklus (*VVR-Zyklus*) bezieht zusätzlich zum TOTE-Modell die veränderte Umwelt mit ein, um diesen Einfluss vergleichend zu berücksichtigen. Der Plan-Do-Check-Act-Zyklus (*PDCA*), oder auch Demingkreis genannt, besteht aus vier Handlungsschritten und hat seinen Ursprung in der Qualitätssicherung.

6.11.1.4 Modelle auf der Ebene der operativen Arbeitsschritte

Das oben beschriebene Vorgehen nach dem TOTE-Schema ist meist ein intuitiv ablaufender Denkprozess, indem man im Allgemeinen unbewusst zwischen Problemebenen wechselt. Diese Problemebenen kann man nach [LIN09] als *Zielsuche*, *Lösungssuche* und *Lösungsauswahl* bezeichnen. Hauptziel der Modelle nach Daenzer, Ehrlenspiel und Altschuller ist es nun den Wechsel dieser Problemebenen nicht dem Zufall zu überlassen, sondern ein Grundmuster für das Lösen dieser Probleme vorzuschlagen [LIN09].

Der *Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel* [LIN09] besteht ebenfalls aus den drei schon bekannten Hauptschritten, *Aufgabe klären*, *Lösungen suchen* und *Lösung auswählen* die in folgende Unterschritte unterteilt werden können:

1. Aufgabe (Problem) klären
 - Aufgabe analysieren
 - Aufgabe formulieren
 - Aufgabe strukturieren
2. Lösungen suchen
 - Vorhandene Lösungen suchen
 - Eventuell neue Lösungen generieren
 - Lösungen systematisieren und ergänzen
3. Lösungen auswählen
 - Lösungen analysieren
 - Lösungen bewerten
 - Lösungen festlegen

Der Vorgehenszyklus kann für die Produktentwicklung, Prozessentwicklung und auch für Informationsprozesse eingesetzt werden. Die von oben bis zur Mitte hingehende Verbreiterung in der graphischen Darstellung (Bild 6.92) soll die Informationszunahme verdeutlichen. Im Gegensatz dazu erfolgt dann beim Auswählen der Lösung wieder eine Einschränkung auf die geeignetste Lösung [LIN09].

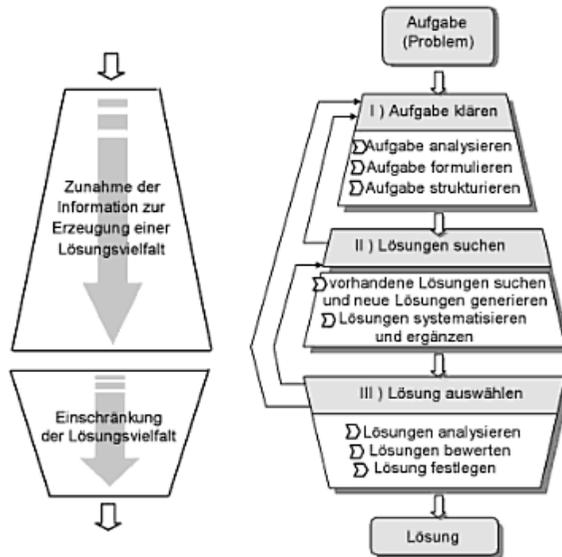


Bild 6.92: Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel [EM13]

Beim *Vorgehensplan zur Lösung von Erfindungsaufgaben nach Altschuller (ARIZ)* wird der Ablauf dem Anwender bis ins kleinste Detail vorgegeben und es wird vorgeschrieben, welche spezifischen Methoden in einem bestimmten Schritt anzuwenden sind. Nach Patentrecherchen ermittelte Altschuller ein Muster für das Vorgehen zum Problemlösen, welches er weiterentwickelt zum „Vorgehen zum erfinderischen Problemlösen“ (ARIZ algorithm rešinja izobretatel'skich zada). Dieses Modell findet Anwendung in der TRIZ Methode (Teoria reschenija isobretatjelskich sadatsch) und ist gekennzeichnet durch den hohen Abstraktionsgrad.

Für das sehr stark abstrahierte Problem werden Lösungsansätze gefunden, welche im nächsten Schritt für die eigentliche Problemstellung konkretisiert werden. Es können vier Hauptschritte unterschieden werden:

- A: Information zum Problem
 - A1: Informationsbeschaffung zum Problem, zur Situation
 - A2: Informationsbeschaffung zu Freiräumen
- B: Definition des Problems
 - B1: Problemanalyse
 - B2: Konzentration / Zuspitzung der Problembeschreibung

- C: Lösung des Problems
 - C1: Formulierung des idealen Ergebnisses bzw. des Widerspruchs
 - C2: Stoff-Feld-Betrachtung
 - C3: Nutzung von Wissensbasen
 - C4: Nochmalige Überprüfung der Problemstellung
- D: Bewertung der Lösung und des Ablaufs
 - D1: Analyse des Konzepts
 - D2: Maximierung der Verwendbarkeit des Konzepts
 - D3: Analyse des Problemlösungsprozesses

Vorgehenszyklus aus der Denkpsychologie

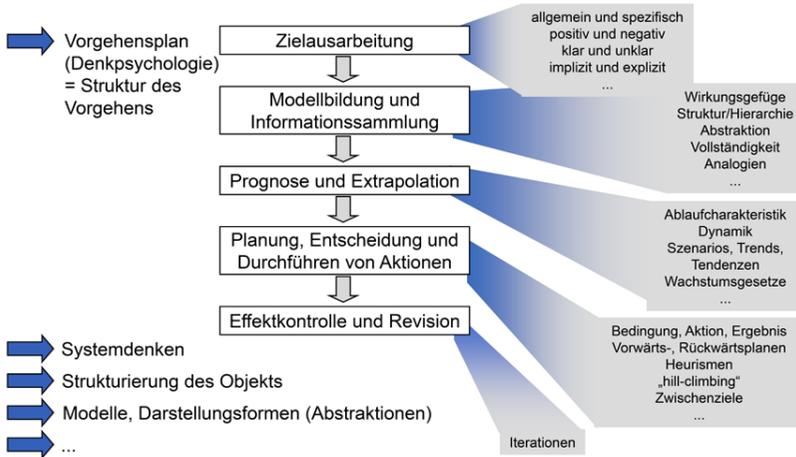


Bild 6.93: Vorgehenszyklus aus der Denkpsychologie nach Dörner [LIN05]

Der deutsche Psychologe *Dörner* untersucht das menschliche Verhalten beim Lösen von Problemen aus psychologischer Sicht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen versucht er ein Muster für das Vorgehen zu erzeugen. Sein Modell „Allgemeine, rekursive analytisch synthetische Konzeptamplifikation“, welches ebenfalls einen sequentiellen Aufbau besitzt, unterteilt er in fünf Hauptschritte [LIN05]:

- Zielausarbeitung
- Modellbildung und Informationssammlung
- Prognose und Extrapolation
- Planung, Entscheidung und Durchführen von Aktionen
- Effektkontrolle und Revision

Wobei diese Begriffe nichts Anderes darstellen als die schon bekannten Schritte „Systemanalyse“, „Erstellung des Lösungskonzeptes“ und „Entwurf gestalten“. Ein Unterscheidungskriterium zu anderen Modellen liegt in der Prognose und Extrapolation. Dörner versucht ähnlich wie Hacker ein Bild des Ergebnisses vorwegzunehmen und das Handeln zielorientiert auszurichten [LIN05].

6.11.1.5 Phasen- und Arbeitsschrittmodelle

Vorgehensmodelle auf Ebene von Phasen und Arbeitsschritten waren Thema zahlreicher Forschungsarbeiten und wurden vor allem geprägt durch Arbeiten von Roth, Pahl/Beitz, Kesselring, Koller und Rodenacker. Das bekannteste und meist angewandte Modell auf dieser Ebene ist das Vorgehen nach VDI Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ bei derer Entwicklung auch viele der genannten Personen mitgewirkt haben.

Kesselring definiert als einer der ersten in einem Phasenmodell viele bekannte Begriffe und nennt auch konkrete Methoden und Hilfsmittel zum Erarbeiten der Arbeitsschritte wie Morphologien und technisch-wirtschaftliche Bewertung, v.a. im Bereich des abstrahierten Konzipierens und Entwerfens [GRI97]. Den drei überlappenden Phasen Produktplanung, Produktentwicklung und Produktgestaltung sind fünf Schritte im Vorgehensplan zugeordnet, die nach einer Entscheidung am Ende des Prozessschrittes mehrfach zu durchlaufen sind:

1. Auswählen der Aufgabe
2. Klären der Aufgabenstellung
3. Konzipieren
4. Entwerfen
5. Ausarbeiten

Rodenacker betrachtet das Konstruieren sehr abstrahiert vor allem als einen Informationsbeschaffungs- und Informationsverarbeitungsprozess. Er entwickelt die Arbeitsschritte beim Konstruieren indem er versucht ein physikalisches Experiment in einem Vorgehensprozess zu beschreiben. Beginnend mit der Definition der Funktionen einer Maschine, achtet er auf ein stets lösungsneutrales und abstraktes Darstellungsniveau. Diese Funktionen verknüpft er mit physikalischen Eigenschaften um Prinziplösungen zu erhalten. Anschließend werden die Konstruktionsmerkmale beziehungsweise die Wirkflächen zugeordnet und die Kinematik erzeugt [BEN04].

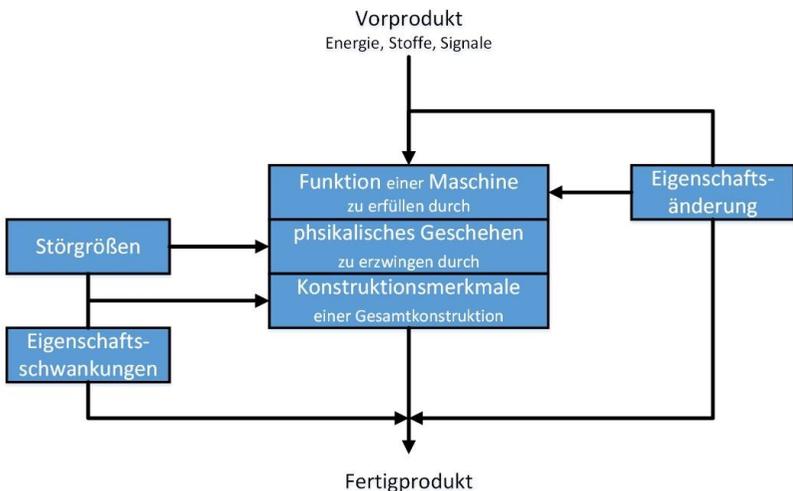


Bild 6.94: Vorgehenszyklus nach Rodenacker [BEN04]

Das *Prozessmodell nach Roth* stellt das methodische Gerüst des algorithmischen Auswahlverfahrens zur Konstruktion mit Katalogen (AAK) dar, es wurde also für das Arbeiten mit Konstruktionskatalogen entwickelt, kann aber auch allgemein verwendet werden. Der Aufbau mit dem iterativen Durchlaufen der Arbeitsschritte, einer Anforderungsliste und dem Arbeiten mit Konstruktionskatalogen diene als Vorlage nachfolgender Vorgehensmodelle. In vielen Punkten besteht deshalb eine Übereinstimmung mit anderen Prozessmodellen wie beispielsweise dem Vorgehen nach Pahl/Beitz oder nach VDI 2221.

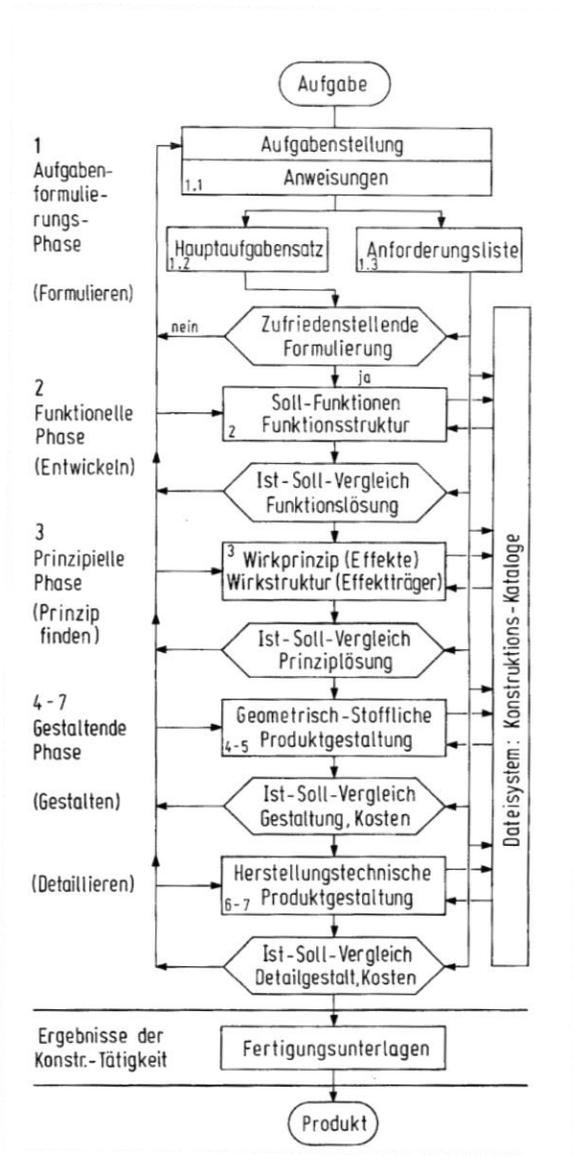


Bild 6.95: Vorgehenszyklus nach Roth [ROT00]

Das Modell nach Roth gliedert sich in folgenden vier Phasen [ROT00]:

- In der *Aufgabenformulierungsphase* wird die Aufgabe analysiert, ergänzt und ihr technischer Inhalt präzise ausgedrückt, um als Ergebnis eine Aufgabenstellung zu erhalten.
- Die *Funktionelle Phase* stellt eine funktionelle Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße dar. Es erfolgt eine Untergliederung in Teilfunktionen, die wiederum durch netzartige Verknüpfung zur Gesamtfunktion führen. Ziel dieser Phase ist eine Ermittlung der Funktionen und die Darstellung dieser in einer Funktionsstruktur.
- In der *Prinzipiellen Phase* erfolgt die Weiterentwicklung des Produkts. Die Darstellung von „black boxes“, Funktionsgrößen und anderen Symbolen wird durch Wirkprinzipien (Effekte) und Wirkstrukturen (Effekträger) konkretisiert bis schlussendlich eine oder mehrere Prinzipskizzen erstellt werden können. Dabei sollen wieder durch Variation der Effekte und geometrische Änderung der Effekträger möglichst viele Varianten erzeugt werden.
- Die letzte Phase wird *Gestaltende Phase* bezeichnet und wird in die Geometrisch-Stoffliche und die Herstellungstechnische Produktgestaltung unterteilt.
Bei der Geometrisch-Stofflichen Produktgestaltung wird aus der Prinzipskizze in weiteren konstruktiven Schritten ein „Konturbild“ erstellt welches mit Körpern aus möglichst einfach herstellbaren Oberflächen zusammengesetzt wird. In der Herstellungstechnischen Produktgestaltung erfolgt die Detailarbeit, wie das Ausarbeiten der Einzelteile, das Erstellen von Stücklisten, Fertigungs-, Montage- und Gebrauchsanweisungen.

Koller sieht den Ausgangspunkt für die Durchführung eines Konstruktionsprozesses in der Aufgabenstellung. Sie soll im Wesentlichen den Zweck des zu konstruierenden Produkts aufzeigen und besteht aus Restriktionen und Forderungen unter welchen der betreffende Zweck erfüllt werden soll [KOL98].

„Konstruieren heißt, Zweck und Forderungen einer Aufgabenstellung in entsprechende Funktionen oder sonstige Eigenschaften eines technischen Produktes umzusetzen.“ [KOL98]

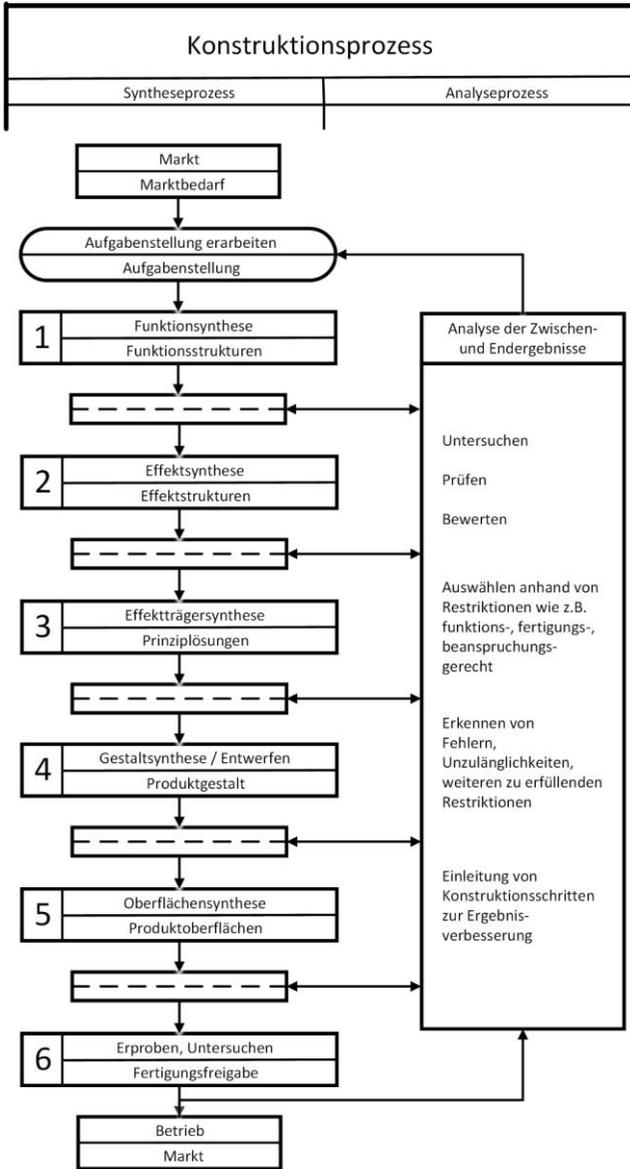


Bild 6.96: Prozessmodell nach Koller [KOL98]

Der Konstruktionsprozess nach Koller gliedert sich in sechs Konstruktionsschritte, welche jeweils aus Analyse- und Synthesetätigkeiten bestehen: (vergl. [KOL98])

- Im ersten Schritt, der *Funktionsanalyse*, sollen die am schwierigsten zu lösenden Teil- oder Elementaraufgaben der Gesamtaufgabe erkannt werden und physikalische Vorgänge beziehungsweise physikalische Elementarfunktionen für deren Erfüllung gefunden

werden. Durch eine Kombination dieser Elementarfunktionen wird eine Systemstruktur erstellt, welche in der Lage ist, den Systemzweck zu realisieren.

- Bei der anschließenden *Effektsynthese* werden den, im vorhergehenden Schritt erstellten, Funktionsstrukturen physikalische Effekte zugeordnet, welche die geforderten Tätigkeiten realisieren können und in einer Effektstruktur dargestellt.
- Im nächsten Konstruktionsschritt werden den Effekten so genannte Effekträger zugeordnet. Effekträger können Werkstoffe, Flüssigkeiten, Gase aber auch ein Raum als Träger elektromagnetischer Wellen etc. sein. Das Arbeitsergebnis der *Effekträgersynthese* ist die Prinziplösung.
- Diese Prinziplösung wird im nächsten Konstruktionsschritt, der *Gestaltungssynthese*, konkretisiert. Dabei werden qualitative und quantitative Gestaltparameterwerte festgelegt, welche die Funktionen realisieren und in Form eines technischen Gebildes darstellen. Das heißt, es wird die optimale Produktgestalt dahingehend festgelegt, dass die Lebensdauer genügend hoch ist, die Herstellung kostengünstig ist und sonstige Anforderungen an das Produkt erfüllt werden.
- Das Festlegen der erforderlichen Bauteiloberflächen, hinsichtlich Oberflächenart und *Oberflächenbeschaffenheit* ist der Gegenstand des fünften Konstruktionsschrittes.
- Zum Schluss ist es notwendig die für das Produkt erforderlichen Energiearten und deren Zustände festzulegen, um die definierten Zwecke und Forderungen zu erfüllen. Das kann sowohl das Festlegen der elektrischen Spannung, Strom, Gasdruck bis hin zur Bestimmung der Schraubenanzugsmomente beinhalten.

Die *Richtlinie VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“* gibt eine allgemeine Orientierung vor [VDI 2221]. Sie behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens und kann als eine Dachrichtlinie gesehen werden, welche durch die Richtlinien VDI 2220 „Produktplanung“, VDI 2222 Bl.1 „Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien“ und VDI 2223 „Methodisches Gestalten“ erweitert wird [VDI 2222].

- VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221]
 - VDI 2220: Produktplanung [KOL98]
 - VDI 2222 Bl. 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien [VDI 2222]
 - VDI 2223: Methodisches Gestalten [VDI 2223]

Beim Vorgehen nach VDI 2221 (s. Bild 6.97) unterscheidet man sieben Hauptarbeitsschritte in denen Prüf-, Bewertungs- und Auswahloptionen vorgesehen sind, um am Ende eines jeden Schrittes zu einem möglichst guten Arbeitsergebnis zu gelangen.

Die einzelnen Schritte können dabei vollständig, nur teilweise oder auch mehrmals iterativ durchlaufen werden. Durch iteratives Vorgehen kann ein optimales Arbeitsergebnis erreicht werden. In der Praxis werden oft die einzelnen Arbeitsschritte, je nach Branche und Unternehmen, zu Entwicklungsbeziehungsweise Konstruktionsphasen zusammengefasst. Im Maschinenbau wird meist in folgende vier Phasen unterschieden [VDI 2222]:

- Phase I: Aufgabe klären
- Phase II: Konzipieren
- Phase III: Entwerfen
- Phase IV: Ausarbeiten

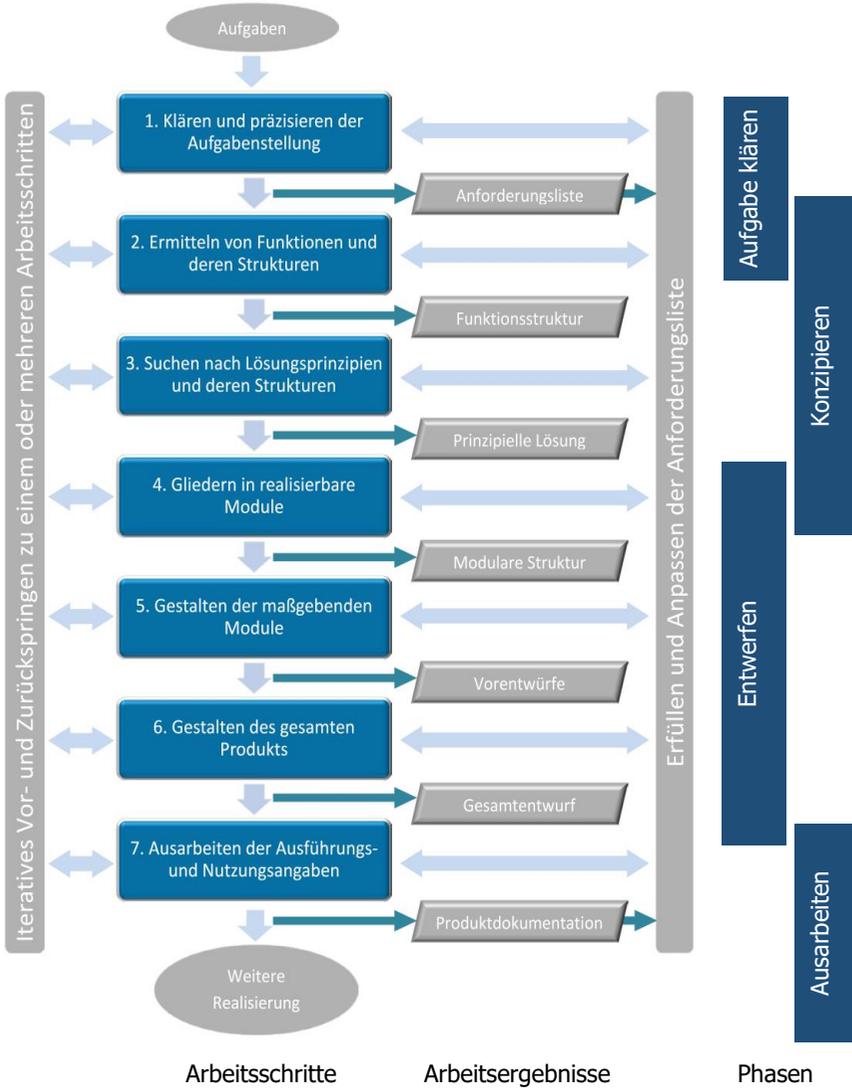


Bild 6.97: Vorgehen nach VDI 2221 (vergl. [VDI 2221])

Im *ersten* Arbeitsschritt, der zugleich der allerwichtigste ist, wird die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert. Ist die Aufgabenstellung nicht klar und eindeutig definiert, kann es zu Problemen bei der Durchführung des gesamten

Prozesses kommen. Die Aufgabenstellung kann durch eine Anfrage eines Kunden, extern, oder durch die Produktplanung, unternehmensintern, formuliert werden. Das Ergebnis des ersten Arbeitsschrittes „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“ ist die Anforderungsliste. Diese informative Auflistung ist eine für alle Arbeitsschritte begleitende Informationsunterlage. Anforderungen können sich während des Entwicklungsablaufes ändern und auch neu hinzukommen, deshalb ist die Liste ständig zu erweitern und auf den aktuellsten Stand zu halten. In der Praxis ist es jedoch notwendig, zu einem bestimmten Zeitpunkt die Liste einzufrieren, um die Entwicklungsdauer nicht durch ständige Änderungen maßlos in die Höhe zu treiben. Quellen für die Anforderungsliste können zum Beispiel Dokumente wie Normen und Marktdaten, Vorgängerprodukte oder Personen sein. Nach Pahl/Beitz [FEL13a] können drei grundlegende Anforderungstypen unterschieden werden.

- Es gibt *grundlegende Anforderungen*, die nicht vom Kunden ausgesprochen werden. Diese teils impliziten Forderungen sind für den Kunden von höchster Bedeutung und deren Erfüllung wird als selbstverständlich angenommen.
- Die *technisch-kundenspezifischen Anforderungen* sind explizit und werden vom Kunden meist sehr genau und ausführlich beschrieben.
- Bei den *Attraktivitätsanforderungen* handelt es sich wiederum um implizite Forderungen, die dem Kunden meist selbst nicht bewusst sind, aber eine gute Differenzierung zu den Mitbewerbern darstellen können.

Beim Erkennen und Aufstellen der Anforderungen bereiten die expliziten Forderungen meist kaum Schwierigkeiten, hingegen sind die vom Kunden unausgesprochenen, aber als selbstverständlich vorausgesetzten, impliziten Forderungen jene, die als problematisch einzustufen sind. Diese sind nur durch Kenntnisse des Kunden und des Marktsegmentes zu finden. Als Hilfe zur Aufstellung und Erweiterung von Anforderungslisten können zum Beispiel Produktfragelisten, Assoziationslisten, Checklisten, Suchmatrizen und Hauptmerkmallisten verwendet werden (weitere detaillierte Informationen s. [ROT00]).

Im *zweiten* Arbeitsschritt werden die Funktionen und deren Strukturen ermittelt. Zunächst soll dabei das Augenmerk auf die Gesamtfunktion gelegt werden, um dann anschließend die wichtigsten Teilfunktionen, Hauptfunktionen, ermitteln zu können.

Im diesem Abschnitt ist es besonders wichtig die vielen möglichen Funktionen auf die wesentlichen zu reduzieren und so zu abstrahieren, dass diese dann beispielsweise aus einem Konstruktionskatalog entnommen werden können. Um auf die Funktionen eines Objektes zu kommen, ist es notwendig, die Zustandsänderungen der drei allgemeinen Größen *Stoff*, *Energie* und *Information* zu betrachten. Die gesonderte Betrachtung von Stoff, Energie und Information ist abstrakt und allgemein und lässt sich damit nicht nur auf technische Detailproblemstellungen anwenden, sondern kann auch zur Beschreibung von Anlagen und Systemen herangezogen werden (vgl. dazu Kap. 6.1). Das Zusammenfügen und die Variation dieser Teilfunktion zu einer Funktionsstruktur bildet die Grundlage zur Suche nach Lösungsprinzipien für die Gesamtfunktion. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur erweist sich häufig als sehr schwierig, besonders für junge, unerfahrene Konstrukteure stellt oft der hohe Abstraktionsgrad eine große Herausforderung dar. Das Arbeitsergebnis sind eine

oder auch mehrere Funktionsstrukturen in Form von Schaltungen und Darstellungen.

Der *dritte* Arbeitsschritt dient zur Suche nach Lösungsprinzipien. Dabei werden wieder, beginnend bei den wesentlichen Teilfunktionen, Hauptfunktionen, mehrere Lösungsprinzipien gesucht indem den Funktionen physikalische, chemische, biologische oder andere Effekte zugeordnet werden. Diese Effekte, welche von theoretischer Natur sind, wie beispielsweise der Kraftmanipulatoreffekt, lassen sich dann mittels Effekträgern praktisch umsetzen. Für den Kraftmanipulatoreffekt wären Hebel, Keile, Rad- oder Schraubpaarungen mögliche Effekträger. Mit Hilfe eines morphologischen Kastens wird versucht alle denkbaren Lösungsmöglichkeiten und -richtungen in geordneter Form festzuhalten und durch die Kombination der Teillösungen zu einer großen Anzahl an verschiedenen Lösungsprinzipien zu gelangen. Als Vorzeigebeispiel soll wiederum der Wagenheber dienen. In Bild 6.98 sind einige verschiedene Kombinationen der Teillösungen zu möglichen Prinziplösungen angedeutet. Ebenfalls gut ersichtlich ist die Entstehung von Teillösungen aus den allgemeinen Funktionen mit der Hilfe von geeigneten mechanischen Effekten und Effekträgern. Ziel dieses dritten Arbeitsschrittes sind prinzipielle Lösungen, welche in Form von Prinzipskizzen, Grobentwürfen, Schaltplänen oder auch Beschreibungen festgehalten werden. Diese dokumentierten Unterlagen enthalten meist auch noch funktionelle, kinematische und geometrische Bedingungen und stellen den Ausgangszustand für die nächsten Arbeitsschritte des Gestaltens (Phase IV) dar und bilden ein grobes Modell des zu entwickelnden Produkts [VDI 2222].

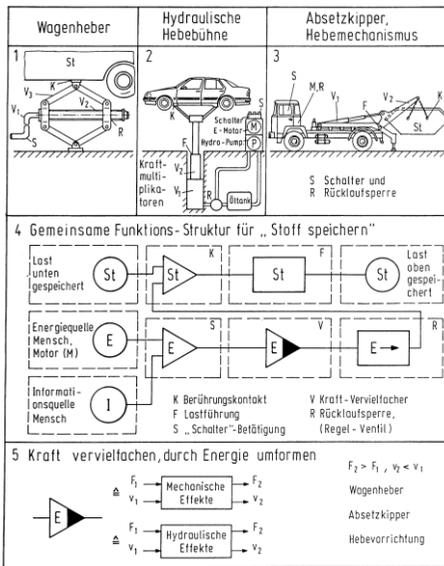


Bild 6.98: Funktionsstruktur Wagenheber [VDI2222]

Im *vierten* Arbeitsschritt, Gliedern in realisierbare Module, ist es zuerst notwendig die gestaltungsbeeinflussenden Anforderungen und Bedingungen zu erkennen und hinsichtlich ihrer Wichtigkeit zu kategorisieren. Es sollten erste

Auslegungsberechnungen mit Überschlagsformeln durchgeführt werden, um einen groben Überblick über die Hauptmaße des Produktes zu bekommen. Jetzt erst ist es zweckmäßig die prinzipielle Lösung in realisierbare Module zu unterteilen. Dabei ist es sehr dienlich einige Dinge zu beachten:

- Module immer so gliedern, dass möglichst unabhängig voneinander daran weiterentworfen werden kann. Dabei kann es sinnvoll sein in Bau- beziehungsweise Montagegruppen zu gliedern.
- Module, welche für das Erfüllen der Anforderungen besonders wichtig sind, sind zu priorisieren.
- Mit terminlich kritischen Modulen beginnen
- Können Module aus anderen Produkten direkt oder abgeändert übernommen werden oder müssen sie neu entworfen werden?

Spätestens ab diesem Arbeitsschritt ist es auch sehr sinnvoll im Sinne von „Simultaneous Engineering“ fortzufahren (s. Kap. 6.10.2). In diesem Arbeitsschritt fallen auch noch weitere organisatorische Handlungen, wie eine Terminplanung mit Meilensteinen und welche Aufgaben lassen sich besser im Team oder durch Einzelpersonen erledigen. Mittel dazu sind: Balkendiagramm und Netzpläne. Das Arbeitsergebnis ist eine Produktstruktur, modulare Struktur, die eine Gliederung der Lösung in reale Gruppen, Elemente und deren Verknüpfung erkennen lässt und mit der das weitere Vorgehen nun hinsichtlich Zeiten und Kapazitäten geplant ist [VDI 2221], [VDI 2222].

Der *fünfte* Arbeitsschritt „Gestalten der maßgebenden Strukturen“ beginnt mit der Erstellung von Gestaltstudien der vorher definierten Module in Form von maßstäblichen oder grobmaßstäblichen Skizzen. Es soll bewusst unscharf gearbeitet werden. Der Konkretisierungsgrad und Vollständigkeitsgrad soll nur so weit getrieben werden, bis ein Erkennen des Gestaltungsoptimums möglich ist, aber noch Spielraum für Kreativität bewahrt wird. Zur Lösungsfindung kann man auf vorhandene Lösungen zurückgreifen oder auch mittels Kreativitätstechniken zu neuen Ansätzen gelangen. Erste Überlegungen über die Fertigungsverfahren, Qualität, Stückzahlen und Kosten sollten miteingebracht werden. Diese ersten Vorentwürfe sollten dann beurteilt werden. Hierzu ist es zweckmäßig die Anforderungsliste hinzuzuziehen, erfahrene Konstrukteure um deren Rat zu bitten, und außerdem können Berechnungen und Versuche Schwachstellen aufzeigen. Arbeitsergebnis sind freigegebene, beurteilte Vorentwürfe der maßgeblichen Module in Form von Zeichnungen, Plänen oder ähnlichem.

Im *sechsten* Arbeitsschritt „Gestalten des gesamten Produkts“ werden die Vorentwürfe der maßgeblichen Module, um die noch nicht bearbeiteten Gruppen und Elemente erweitert. Es werden ein grobmaßstäblicher und anschließend ein maßstäblicher Gesamtentwurf erarbeitet. Falls es die Zeitplanung zulässt, sollten immer alternative Entwürfe vorgesehen werden. Das Erstellen vorläufiger Stücklisten gibt einen Überblick über Zulieferkomponenten und Bauteile, die in Eigenfertigung entstehen sollen. Natürlich ist es sehr hilfreich diese Gesamtentwürfe bewusst zu analysieren um Probleme aufzudecken und diese auch mit zu dokumentieren. Durch systematische Variation von Teilverbänden, Einzelteilen, Formelementen oder Einzelteiflächen können problematische Gestaltungselemente gezielt verbessert werden. Durch einen ständigen Wechsel der Betrachtungsweise vom Detail auf das Ganze und umgekehrt, ist es möglich, ein Gesamtoptimum für das Produkt zu erkennen und Schnittstellenprobleme zu

vermeiden. Es kann nicht immer zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass eine Kombination optimaler Teillösungen auch das optimale Gesamtprodukt ergeben. Als Zwischenergebnis dieses Arbeitsschrittes steht ein grobmaßstäblicher Gesamtentwurf mit optimalen Gestaltungselementen der hinsichtlich der Einhaltung der in der Anforderungsliste bestimmten Forderungen zu überprüfen ist. Dabei ist besonders auf Störeffekte, die beispielsweise durch Reibung oder Schwingungen entstehen, zu achten. Je weiter der Gestaltungsprozess fortgeschritten ist, desto exakter ist der erreichte Zustand durch die Nutzung mathematischer Verfahren und mit Hilfe rechnerunterstützter Instrumente abzubilden. Besonders häufig finden hier Finite-Elemente-Methoden, Mehrkörpersimulationen und ähnliche Verfahren Anwendung. Eine Analyse und Beurteilung des maßstäblichen Gesamtentwurfs ist unumgänglich, um Mängel im Entwurf aufzudecken und die bei der Ausarbeitung mit zunehmender Konkretisierung exponentiell ansteigenden Änderungskosten zu verhindern. Erst nach dieser Kontrolle kann die Phase des Entwerfens abgeschlossen werden und die Freigabe zum Ausarbeiten erfolgen. Das Arbeitsergebnis des sechsten Schrittes ist ein maßstäblicher Gesamtentwurf, der alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Produktrealisierung enthält. Darstellung findet er in Zeichnungen, Stücklisten, Fertigungs- und Montageanweisungen [VDI 2221].

Im *letzten* Arbeitsschritt, „Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“ wird die endgültige Produktdokumentation erstellt. Diese beinhaltet neben Einzelteil-, Gruppen-, Gesamtzeichnungen auch Stücklisten, Fertigungs-, Montage-, und Transportvorschriften. Betriebsanleitungen und Benutzerhandbücher sind auch Teil einer vollständigen Produktdokumentation.

Der Konstruktionsprozess nach Pahl/Beitz [FEL13a] ist angelehnt an die VDI Richtlinie 2221. Im Gegensatz zu der sehr allgemeingültigen branchenunabhängigen VDI Richtlinie wurde dieser Ablaufplan gezielt auf den Maschinenbau abgestimmt. Auch hier wird der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in vier Hauptphasen unterteilt, denen die nebenstehenden Tätigkeiten zugeordnet werden können:

- Planen und Klären der Aufgabenstellung: informative Festlegung
- Konzipieren: prinzipielle Festlegung
- Entwerfen: gestalterische Festlegung
- Ausarbeiten: herstellungstechnische Festlegung

Obwohl die Einteilung in Hauptphasen für die Planung und Kontrolle eines Entwicklungsprozesses sehr hilfreich ist, ist eine strikte Trennung dieser Phasen oft nur schwer möglich. Des Weiteren lassen sich beispielsweise Nebenfunktionen oft erst beim Entwerfen erkennen, dies erfordert ein Rückspringen auf die Konzeptphase um die geeigneten prinzipiellen Lösungen für diese Funktionen zu finden. Den Hauptphasen werden Hauptarbeitsschritte zugeordnet, die als zweckmäßige strategische Handlungsanweisungen zum Erreichen des Arbeitsergebnisses zu sehen sind. In der Regel sind aber noch zahlreiche Unterschritte erforderlich, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erlangen. Beim Durchlaufen des Prozesses (Bild 6.99) sind immer wieder Entscheidungsschritte vorgesehen. Speziell nach Hauptphasen und wichtigen Haupthandlungsschritten ist der erreichte Zustand zu prüfen und zu beurteilen. Bei einer positiven Beurteilung des Arbeitsergebnisses, erfolgt die Freigabe für den nächsten Arbeitsschritt beziehungsweise für die nächste Phase. Bei nicht

zufriedenstellenden Ergebnissen kann es zum erneuten Durchlaufen der Iterationsschleife kommen oder sogar zum Abbruch der Entwicklung [FEL13a].

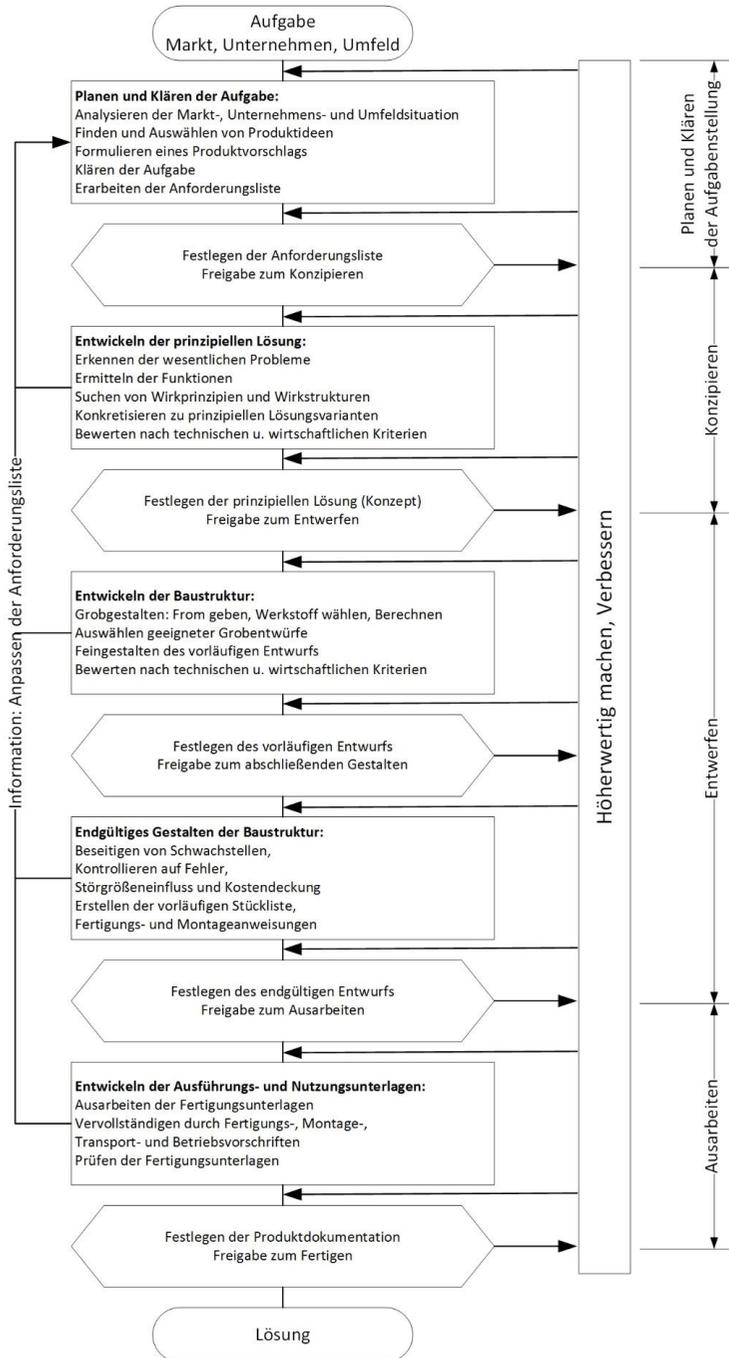


Bild 6.99: Vorgehensmodell nach Pahl/Beitz [FEL13a]

6.11.1.6 Gegenüberstellung und Bewertung der Vorgehensmodelle

Tabelle 29: Gegenüberstellung der Vorgehensmodelle

	Pahl/Beitz	VDI 2221	Roth	Koller	Rodenacker	Axio-matic Design
Aufgabenformulierung	Planen und Klären der Aufgabe <i>Anforderungsliste</i>	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung <i>Anforderungsliste</i>	Aufgabenformulierungsphase <i>Anforderungsliste</i>	Aufgabenstellung erarbeiten <i>Aufgabenstellung</i>	Aufgabenstellung, Vorprodukt	Kunden-domäne
Funktionelle Phase	Funktionen/ Funktionsstrukturen	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen <i>Funktionsstrukturen</i>	Funktionelle Phase <i>Funktionslösung</i>	Funktions- oder Funktionsstruktursynthese <i>Funktionsstrukturen</i>	Festlegung logischer Zusammenhänge	Funktionale Domäne
Prinzipielle Phase	Wirkprinzipien/ Wirkstrukturen <i>Prinzipielle Lösung</i>	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen <i>Prinzipielle Lösungen</i>	Prinzipielle Phase <i>Prinzipialösung</i>	Effektsynthese <i>Effektstrukturen</i> Effektträger-synthese <i>Prinzipialösungen</i>	Festlegung physikalischer Zusammenhänge <i>Prinzipialösungen</i>	Physikalische Domäne
Gestaltende Phase	Entwickeln der Baustruktur Grobgestalten <i>Vorentwurf</i>	Gliedern in realisierbare Strukturen <i>Modulare Strukturen</i>	Gestaltende Phasen geometrisch-stoffliche Produktgestaltung Herstellungstechnische Produktgestaltung <i>Detailgestalt, Kosten</i>	Gestaltungssynthese <i>Produktgestalt</i>	Kinematischer Wirkzusammenhang Konstruktiver Wirkzusammenhang Fertigungstechnischer Wirkzusammenhang	Prozess-domäne
	Gestalten der Baustruktur <i>Gesamtentwurf</i>	Gestalten des gesamten Produkts <i>Gesamtentwurf</i>				
Ausarbeiten	Entwickeln der Ausführungs- und Nutzungsunterlagen <i>Produktdokumentation</i>	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben <i>Produktdokumentation</i>	Fertigungsunterlagen	Erproben, Untersuchen <i>Fertigungsfreigabe</i>		

Trotz der großen Anzahl in der Literatur beschriebener Modelle unterschiedlichster Benennungen hinsichtlich Phasen, Arbeitsschritten und Arbeitsergebnissen ist bei allen Modellen eine vergleichbare Vorgehensweise zu erkennen. Besonders die Vorgehensmodelle von Pahl/Beitz, VDI 2221 und Roth sind sehr ähnlich.

Ein Grund dafür mag sein, dass die VDI-Richtlinie eine Vereinheitlichung verschiedener früher erschienener Werke ist, beziehungsweise nachfolgende Veröffentlichungen auf ihr aufbauen. Selbst bei dem in erster Linie sehr fremd anmutenden Axiomatic Design sind Parallelitäten zu anderen Vorgehensprozessen ersichtlich. In Tabelle 29 ist eine Gegenüberstellung der untersuchten Phasen- und Arbeitsschrittmodelle dargestellt. Eine ähnliche Gegenüberstellung ist auch in [ROT00] zu finden allerdings unterscheidet sich diese vor allem dadurch, dass das Axiomatic Design ebenfalls mitaufgenommen wurde und die im Rahmen [GAR14] gewonnen Erkenntnisse miteingezogen wurden.

Tabelle 30: Bewertung der Vorgehensmodelle

	Pahl/ Beitz [FEL13a]	VDI 2221 [VDI 2221]	Roth [ROT00]	Koller [KOL98]	Roden- acker [BEN04]	Axi- omatic Design [FL08]
Dokumentation	+	+	+	+	-	~
Bekanntheit Praxis- anwendung	~	+	~	~	-	~
Anwendungs- beispiele	+	+	+	~	-	~
Aktualität (letzte wesentliche Veränderung)	~	+	~	~	-	+
Darstellung (Struktur, Einfachheit, Übersichtlichkeit, Klarheit der Aufgaben)	+	+	+	+	~	~
Berücksichti- gung des Rechner- einsatzes	~	~	~	~	-	+

+....gut ~....befriedigend -....mangelhaft

Die Vorgehensmodelle werden unter Berücksichtigung der verwendeten Literatur hinsichtlich Kriterien zum Einsatz in der Produktentwicklung der Technischen Logistik bewertet (Tabelle 30). Aufgrund dieser Bewertung und der nachfolgenden Auflistung wurde die Entscheidung getroffen, das Vorgehensmodell nach VDI 2221 weiterzuentwickeln.

Als Gründe die für das Vorgehensmodell nach VDI 2221 sprechen und die für die Entwicklung der VDI-app ausschlaggebend waren können angegeben werden:

- Allgemeingültigkeit
- Branchenunabhängig
- Rechnereinsatz wird berücksichtigt
- Übersichtliche Darstellung mit klaren definierten Arbeitsergebnissen
- Hohe Praxisanwendung im Vergleich mit anderen Modellen

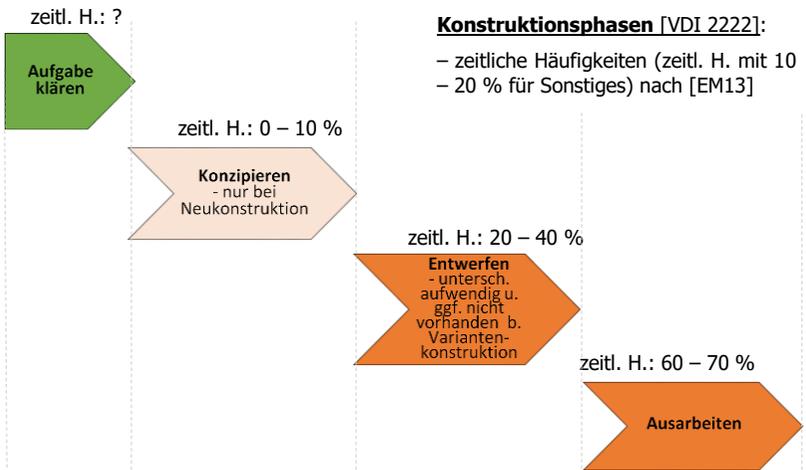
- Vereinheitlichung aus Vorschlägen anderer, früherer Modelle
- In Zusammenarbeit von Industrievertretern und Konstruktionswissenschaftlern entstanden
- Gute Dokumentation mit einigen Anwendungsbeispielen

Lossack [LOS06] gibt eine Zusammenschau der Phasen und Abschnitte der VDI – Konstruktionsmethodik inklusive der Arbeitsergebnisse an. Wenn man allerdings den gesamten Lebenslauf eines Produktes über die Produkterstellung hinweg betrachtet kommt man zu einem Kreislauf: Nutzer (Markt) – Hersteller – Nutzer (Markt). Externe und interne Dienstleistungen treten dazu in allen Phasen des Lebenslaufs auf [EM13]. Die Entwicklung und (methodische) Konstruktion spielen darin naturgemäß in der Frühphase die entscheidende Rolle. Aus vielen Aufstellungen ist bekannt [CP99], dass in der Entwicklung bis zu 80% der Kosten festgelegt werden, aber darin keine 15% der Gesamtproduktkosten entstehen. Das Konstruktionswissen steigt im Entwicklungsprozess nahezu linear an [CP99] was bedeutet, dass für die frühen Entscheidungen oft wenig Wissen eingebracht werden kann; hier setzt KBx an (Kap6.13). Wenn man nun die konstruktionsmethodischen Ansätze nach VDI mit ihrer zeitlichen Häufigkeit des Auftretens [EM13] in den Gesamtproduktentwicklungszyklus (PEP) einarbeitet, kommt man zur Darstellung nach Bild 6.110. Wichtig ist darin die Differenzierung nach Konstruktionsart, die in der VDI nicht berücksichtigt wird, da mehrere Schritte im Falle der unaufwendigsten Konstruktion (Varianten- oder Wiederholkonstruktion) entfallen können (s. Kap. 6.11.2). In der Technischen Logistik sind, wie in vielen weiteren Bereichen des Maschinenbaus, die Varianten- und Anpassungskonstruktion die häufigsten Konstruktionsarten (s. dazu Kap. 6.11.2). Im PEP entfallen dann einige Schritte (s. Bild 6.100).

Ein Standard-Produktlebenszyklus [EM13] kann je nach Detaillierungsgrad unterschiedlich dargestellt werden (s. Bild 6.100); die Entwicklung und dabei die Konstruktion ist darin orangefärbig gekennzeichnet.



Bild 6.100: PEP und VDI-Methodik mit Berücksichtigung der Konstruktionsart und der zeitlichen Häufigkeit



Konstruktionsphasen [VDI 2222]:

- zeitliche Häufigkeiten (zeitl. H. mit 10 - 20 % für Sonstiges) nach [EM13]

Arbeitsschritte [VDI 2221]:



Arbeitsergebnisse:



6.11.1.7 Kritik an den Vorgehensmodellen

Grundlage für die folgende Argumentation ist [BEN04] in der die Anwendbarkeit und Akzeptanz der präskriptiven Konstruktionsmethodik sehr ausführlich dokumentiert und mit Einzelnachweisen belegt ist.

Seit dem Beginn der ersten Versuche das Entwickeln und Konstruieren an methodische Konzepte zu binden und den Prozessablauf vorzuschreiben, gibt es Kritik vor allem aus der industriellen Entwicklungspraxis. Nach Beobachtungen in der Praxis ist klar zu erkennen, dass die Akzeptanz mangelhaft ist und überwiegend nicht methodisch konstruiert wird. Vor allem der hohe Zeitaufwand, der Zwang zur Abstraktion, die Einschränkung der Kreativität, die Unklarheit und Uneinigkeit von Begriffen in der Konstruktionsmethodik, die mangelnde Flexibilität und Komplexität und eine zu starre Regelung wurde an den Vorgehensmodellen kritisiert. Der sehr lineare und sequentielle Ablauf ist in vielen Fällen einfach nicht zielführend und ein iteratives Vorgehen, falls es überhaupt vorhanden ist, wird meist nur angedeutet. Vielmehr führt eine Überlappung beziehungsweise eine Parallelisierung der Ablaufschritte, im Sinne von Simultaneous Engineering, zum Erfolg. Des Weiteren ist oft die Rede von zu viel Wissenschaft und einer Überbewertung von logischen Abläufen, zu komplizierten und nicht merkfähigen Abläufen und heuristisch zu schwachen konstruktionsmethodischen Handlungsempfehlungen.

Der Fokus der Phasenmodelle liegt auf Neukonstruktionen, während in der Praxis der Anteil an Varianten- und Anpassungskonstruktionen stark überwiegt (s. Bild 6.103).

Oft ist es nicht sinnvoll die Aufgabenstellung in Teilaufgaben zu zerlegen, da viele Probleme erst durch eine Betrachtung des Gesamtsystems erkennbar sind beziehungsweise auch durch die Kombination der vermeintlich idealen Teillösungen entstehen können. Technische Systeme können nicht immer auf eindeutig bestimmbare Grundelemente zurückgeführt werden und oft ist es sinnvoller und effektiver auf schon bekannte Lösungen für ähnliche Objekte zurückzugreifen. Konstruktionstätigkeiten sind größtenteils Routinetätigkeiten, deshalb ist die Vorgehensweise der Konstrukteure meist pragmatisch und wird durch die Erfahrung gelenkt. (vergl. [BEN04])

Nach [EM13] ist „insbesondere die VDI 2221 mit ihren 7 Arbeitsabschnitten seither die Basis zur Strukturierung von Entwicklungsprozessen. Vor allem aus der Sicht zu realisierender Funktionen (bei der Realisierung von Hauptforderungen „Design for X“) sind anfangs nicht unbedingt Funktionen zu betrachten, sondern die Hauptforderungseigenschaften am Vorläufer-Produkt.“

„Die Beobachtung von Projekten in der Praxis hat gezeigt, dass Vorgehenspläne mit vorgegebenen Teilaufgaben (z.B. Teilfunktionen) und Arbeitsabschnitten nicht starr vorgegeben werden können und dann für alle Produkte, alle Probleme (z.B. Hauptforderungen), alle Personen, alle Unternehmen, in gleicher Weise gelten. Die mangelnde Flexibilität der Konstruktionsmethoden ist auch ein oft geäußelter Einwand von Praktikern. ... Auf Grund unseres kapazitätsbeschränkten Arbeitsgedächtnisses („Denkökonomie“) wird laufend zwischen opportunistischem (gelegenhetsbetontem) Vorgehen und systematischen Episoden hin- und hergeschaltet. So wird mit nicht zu hohem Denkaufwand nach zunächst brauchbaren Lösungen gesucht. Diese können ja gegebenenfalls noch weiter verbessert werden.“

„Das Ziel, mit im Wesentlichen linearen Vorgehensplänen – wie in VDI 2221 – eine Ordnung in den sonst oft chaotisch anmutenden konstruktiven Ablauf bringen zu wollen, ist verständlich. Wenn die Methodik allein aber schon auf Grund der Darstellung falsch aufgefasst wird, oder nicht den notwendigen Realitäten entspricht, kann sie als unflexibel und „Zwangsjacke“ empfunden werden und wird abgelehnt.“

Letztgenanntem Aspekt versucht die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte VDI-app einiges an Schärfe zu nehmen (Kap. 6.11.1.9).

[EM13] empfiehlt eine eher zweistufige Herangehensweise, die dem menschlichen Denken angepasster erscheint:

- „Normalbetrieb“: aus Erfahrungen Lösungen erzeugen und auswählen
- „Rationalbetrieb“: sorgfältiger methodisch vorgehen, wenn man nicht weiterkommt oder eine besonders gute Lösung sucht.

Generell sollte Methodik aus folgenden sechs Gründen flexibel eingesetzt werden [EM13]:

- Ergebnisunsicherheit
- Problem-/Zielabhängigkeit
(andere Hauptforderungen als „Funktion“ können verschachtelte Abläufe ergeben.)
- Produktabhängigkeit
(mechatronische anders als rein mechanische, Komplexe Produkte (z.B. Pkw) anders als einfache (z.B. Spannvorrichtungen))
- Personenabhängigkeit
(Vorbildung; Einfluss der persönlichen Erfahrung)
- Umsatz- und Zeitabhängigkeit sinnvollen Methodeneinsatzes
- Unternehmensabhängigkeit
(z.B. Groß-, bzw. Kleinunternehmen)

6.11.1.8 Methoden und Werkzeuge

Methoden und Werkzeuge helfen dem Konstrukteur und Produktentwickler bei der Durchführung eines Konstruktionsprozesses mittels Vorgehensmodellen. Dabei können Werkzeuge als Unterstützung für die Methoden gesehen werden und für den erfolgreichen Einsatz dieser beitragen. Unter einem Werkzeug kann ein einfaches Formular aber auch ein komplexes Softwareprogramm verstanden werden. In der Literatur existieren verschiedene Definitionen des Begriffs „Methode“.

„Unter dem Begriff Methode wird die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens verstanden, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind. Methoden sind präskriptiv, das heißt als eine Vorschrift zu verstehen. Sie sind zielorientiert, also auf die Lösung eines Problems oder einer Aufgabenstellung fokussiert.“ [LIN05]

Methoden unterscheiden sich also von Vorgehensplänen durch ihren operativen Charakter und behandeln neben dem „WAS“ auch das „WIE“ etwas auszuführen ist. Methoden sind adaptierbar und es ist oft nötig sie an die gegebenen Verhältnisse anzupassen. [LIN05]

Nach [FEL13b] besteht der Unterschied zwischen einer Methode und einer Methodik wie folgt:

- Methode: „Planmäßiges Vorgehen zur Erreichung eines bestimmten Ziels“
- Methodik: „Planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden und Hilfsmittel“

Leider gibt es auch bei dem Begriff der Methode keine klare Abgrenzung. So wird ein paarweiser Vergleich, der aus nur wenigen Handlungsschritten besteht als Methode bezeichnet, genauso wie das sehr komplexe Quality Function Deployment, welches eigentlich einer Kombination von Einzelmethoden entspricht und somit eher mit dem Begriff der Methodik gleichzusetzen wäre. Selbst das sehr einfache Brainstorming, beinhaltet verschiedene Einzelmethoden wie Mindmapping oder Galeriemethode und auf der anderen Seite kann man wiederum in der Galeriemethode Brainstormingmethoden finden. Somit ist es sehr schwierig Methoden hierarchisch zu strukturieren (vergl. [LIN05])

Es gibt eine Menge an Methoden, die zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses herangezogen werden können. Einige können für die Definition der Aufgaben und Ziele herangezogen werden, mit manchen fällt das Suchen nach Problemen und deren Lösungen leichter, wiederum andere helfen bei der Entscheidungsfindung. Das Problem liegt also nicht in der Anzahl der Methoden als vielmehr in der Unsicherheit bezüglich ihrer Anwendung, welche wieder auf mangelnde Erfahrung der Anwender zurückgeführt werden kann. [VDI 2221] Es wird eine Einteilung der Methoden ähnlich der VDI 2221 in Analyse- und Zielvorgabemethoden, Methoden zum Generieren von Lösungsideen, Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung und in Entwicklungsunterstützende Methoden getroffen. Eine sehr ausführliche Auflistung von Methoden ist in [LIN05] zu finden.

- Analyse- und Zielvorgabemethoden werden vor allem in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses angewendet aber deren Ergebnisse können während des gesamten Entwicklungsprozesses zur Unterstützung herangezogen werden. Aus diesem Grund sind sie auch den späteren Arbeitsschritten zugeordnet, wenn auch in den meisten Fällen mit „mäßig geeignet“ deklariert.
- Methoden zum Generieren von Lösungsideen finden in allen Phasen und bei all jenen Arbeitsschritten Anwendung, bei denen eine große Anzahl an Lösungsideen gewünscht wird. Nur so ist es möglich, optimale Resultate zu erzielen. Den größten Nutzen bringen diese Methoden sicherlich beim 3. Hauptarbeitsschritt der VDI-Richtlinie (Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen).
- Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung dienen zur Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten. Diese Methoden führen zu einer Verdichtung der Lösungen und werden hauptsächlich bei der Phase des Gestaltens herangezogen.
- Entwicklungsunterstützende Methoden sind universell und überall einsetzbar.

Zuordnung der Methoden zum Vorgehensmodell nach VDI 2221

Tabelle 31 zeigt aus Gründen der Übersicht die 7 Hauptarbeitsschritte. Die gesamte Zuordnung der Methoden zu den Arbeitsschritten ist in [GAR14] zu finden.

Tabelle 31: Zuordnung der Methoden zu den Hauptarbeitsschritten

		1. Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	4. Gliedern in realisierbare Module	5. Gestalten der maßgebenden Module	6. Gestalten des gesamten Produkts	7. Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben
Analyse- und Zielvorgabe-Methoden	ABC-Analyse	+	•	•	+	+	+	•
	Abstraktion/Blackbox	-	+	•	-	-	-	-
	Anforderungsliste	+	+	+	+	+	+	•
	Benchmarking	•	•	+	+	+	+	•
	Eigenschaftsliste	•	•	+	+	+	+	•
	Funktionsmodellierung	-	+	+	+	•	•	-
	Kano-Modell	+	-	+	-	•	•	-
	QFD (Quality Function Deployment)	+	•	•	•	•	•	•
	Reverse Engineering	+	+	+	•	•	•	-
	Trendanalyse	+	-	-	-	-	-	-
Methoden zum Generieren von Lösungsideen	Bionik	-	-	+	•	•	•	-
	Brainstorming	•	+	+	•	•	•	•
	Checkliste nach Osborn	•	•	+	•	•	•	-
	Delphianalyse	•	-	+	-	-	-	-
	Einflussmatrix	-	-	+	+	-	-	-
	Galeriemethode	-	-	+	-	-	-	-
	Konstruktionskatalog	-	+	+	•	+	+	-
	Methode 635	•	+	+	-	-	-	-
	Morphologischer Kasten	-	+	+	+	•	-	-
	Negation	-	-	+	-	-	-	-
	Ordnungsschema	-	-	+	+	•	•	-
	Synektik	•	•	+	-	-	-	-
	Variation	-	-	+	-	+	+	-
	Methoden zur Bewertung und Entscheidungsfindung	Bewertung	•	•	+	+	+	+
Ähnlichkeitsanalyse		•	•	+	+	+	+	-
Fehlerbaumanalyse		-	+	+	-	+	+	+
FMEA		-	+	•	-	•	+	+
Fragebogen		+	+	+	-	-	-	-
Gefährdungsanalyse		•	+	+	-	•	•	•
Gewichtete Punktbewertung		•	•	+	•	+	+	-
Nutzwertanalyse		•	•	+	+	+	+	+
Paarweiser Vergleich		•	•	+	•	+	+	•
SWOT-Analyse		+	-	+	-	+	+	-
Vorteil-Nachteil-Vergleich		-	-	+	•	+	+	-
unterstützende Methoden	Handlungsplanungsblatt	+	+	+	+	+	+	+
	Checkliste	+	-	+	+	+	+	+
	Mind Mapping	+	+	+	+	•	•	•
	Numerische Simulation	-	-	•	-	+	+	-
	Recherche	+	+	+	•	•	•	•
	Versuch	-	-	•	-	+	+	-
	Wirkungsnetz	-	-	-	+	+	+	-

Aufgrund der großen Anzahl der Methoden und der unterschiedlichen Anwendungsgebiete wird in der nachfolgenden Tabelle 31 der Zusammenhang zwischen den Hauptarbeitsschritten im Vorgehensmodell der VDI-Richtlinie und den Methoden hergestellt. Auch die VDI 2221 bietet eine solche Zuordnung der Methoden zu den Vorgehensschritten an, wobei sich die hier angeführte Zuteilung deutlich von dieser unterscheidet. Zum einen sind die vorgeschlagenen Methoden andere, die Eignung wurde neu untersucht und speziell für die in angeführte ME-app fand eine Aufgliederung in die dort eingeführten Unterschritte nachträglich statt. Die Methodenauswahl selbst sowie die Zuordnung erfolgte nach dem Studium einschlägiger Literatur und den daraus gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich der Anwendbarkeit, des Bekanntheitsgrades, der Durchführungsmöglichkeit, der Effektivität und der Komplexität der Methoden. Wie auch bei den Methoden erwähnt ist folgendes Schema ersichtlich:

Des Weiteren ist nicht jede Methode mit jeder Konstruktionsart sinnvoll. Wobei auch hier wiederum die Unterteilung der Art der Konstruktion in Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion erfolgt. Tabelle 32 zeigt aus Gründen der Übersicht nur einen Auszug aus der Zuordnung der Methoden zu den Konstruktionsarten bei den beiden Extremfällen. Auf der einen Seite die Neukonstruktion bei der alle Methoden hilfreich angewendet werden können und auf der anderen Seite die Anpassungs- und Variantenkonstruktion bei der die Anwendung sehr vieler Methoden unsinnig und nicht zielführend wäre.

Tabelle 32: Zuordnung der Methoden zur Konstruktionsart

	Neukonstruktion	Anpassungs- und Variantenkonstruktion
ABC-Analyse	+	+
Abstraktion/Blackbox	+	-
Anforderungsliste	+	+
Benchmarking	+	-
Eigenschaftsliste	+	+
Freiheitsgradanalyse	+	-
Funktionsmodellierung	+	-
Kano-Modell	+	+
QFD (Quality Function Deployment)	+	-
Reverse Engineering	+	•
Trendanalyse	+	-
Bionik	+	-
Brainstorming	+	-
Delphianalyse	+	-
Einflussmatrix	+	+
Konstruktionskatalog	+	-

6.11.1.9 IT-Tools für das methodische Konstruieren; Überblick und Praxisbeispiel „VDI-app“

Bei der Analyse der am Markt erhältlichen Softwareprodukte kann festgestellt werden, dass es eine erhebliche Anzahl an Wissensrepräsentationssoftware gibt, welche dazu dient, bestimmte Wissensbereiche formal abzubilden. Dies geschieht meist mit der Hilfe von semantischen Netzen und Ontologien. Produkte dafür sind beispielsweise die an der Technischen Universität Graz prototypenhaft entwickelte xKBE-App [P4], das Softwaretool Compendium [COM13], CampTools [IHM14], VUE-Tool (Virtual Understanding Environment-Tool)

[TUF13] , iMapping [IMA14] , CAM (Cambridge Advanced Modeller) [ENG13] oder Set Visualiser [ENG14] und ACCLARO DFSS für Axiomatic Design (s. auch Kap. 6.14.3). Eine gute Beschreibung dieser Softwareprodukte mit Anwendungsbeispielen ist in [STE12] zu finden.

Aufgrund der immer komplexer werdenden Produkte wird auch die Lösungsfindung oft auch als Konfigurationsaufgabe immer schwieriger. Deshalb ist neben dem Grundziel, Komplexität zu reduzieren auch die Komplexitätsbeherrschung sehr wichtig. Bei Komplexitätssoftware handelt es sich vor allem um Produkte, die bei dem Umgang mit der Variantenvielfalt, Dateivielzahl und -komplexität sowie Produktvielfalt und -komplexität helfen können. Durch Analysen mittels Matrizen und Graphen lassen sich beeinflussende Elemente herausfinden und das Systemverständnis wird gefördert. Dadurch unterstützen diese Softwareprodukte auch die Problemlösung. Beispiele hierfür sind die xKBE-App, LOOME [LOO14] , Complexity-Manager [SCH14] und METUS [IDC14]. Internetportale wie MEPORT [MEP14a] und vor allem das MAP-Tool der Universität Karlsruhe [SCH00] helfen bei der Methodenfindung und -anwendung.

Es kann festgehalten werden, dass es Softwareprodukte gibt, die sehr hilfreich bei der Produktentwicklung an bestimmten Stellen eingesetzt werden können und in der Praxis auch erfolgreich verwendet werden. Diese Produkte unterstützen aber nicht unbedingt das methodische Vorgehen als Gesamtvorhaben bei der Produktentwicklung. Ein Tool das den Entwickler und Konstrukteur durch den gesamten Konstruktionsprozess leitet, das Vorgehensmodell, die Arbeitsschritte und auszuführenden Tätigkeiten klar darstellt, die Ziele eindeutig festlegt, Methoden und Hilfsmittel vorschlägt und Werkzeuge an gebrauchter Stelle anbietet, konnte bei den Recherchen aber nicht auffindig gemacht werden [GAR14]. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Entscheidung getroffen die ME-app zu entwickeln [GAR14].

Ziel für die VDI-app ist es, eine graphische Benutzeroberfläche zu schaffen, die eine durchgängige und transparente Abbildung des Konstruktionsprozesses darstellt und den Entwickler sicher und effizient leitet. Die für die Erfüllung der Arbeitsergebnisse benötigten Werkzeuge und Methoden sind nach Bedarf bereitzustellen. Dazu ist es nötig die zwei großen Bereiche, einerseits den Vorgehensplan nach VDI 2221 und auf der anderen Seite die Methoden und Werkzeuge mit ihren Eigenschaften, Vorteilen, Nachteilen und Anwendungsgebieten darzustellen und logisch miteinander zu verknüpfen.

Die VDI-app gliedert sich in zwei Hauptmodule (Bild 6.101, Bild 6.102):

1. Allgemeine Erläuterung des Vorgehens der VDI:
interaktive Beschreibung des Methodengerüsts VDI 2221ff mit Quellenverlinkungen und editierbaren Anmerkungsmöglichkeiten zum Erarbeiten und Verständnis der Methode.
2. Vorgehensunterstützung nach VDI:
interaktives Leiten des Konstrukteurs durch den Konstruktionsprozess je nach Konstruktionsart. Untergliederung der Hauptarbeitsschritte in Unterarbeitsschritte. Je nach Phase bzw. Arbeitsschritt der Methodik werden dem Benutzer die nach Konstruktionsart geeigneten Methoden und Werkzeuge zum Analysieren, Generieren oder Bewerten nach Eignung klassifiziert und einheitlich dargestellt angeboten (s. Methodenmatrizen und -tabellen oben in Kap. 6.11.1). Zum

interaktiven Inhalt gehören Arbeitsvorlagen mit Beispielen zum Methodeneinsatz.



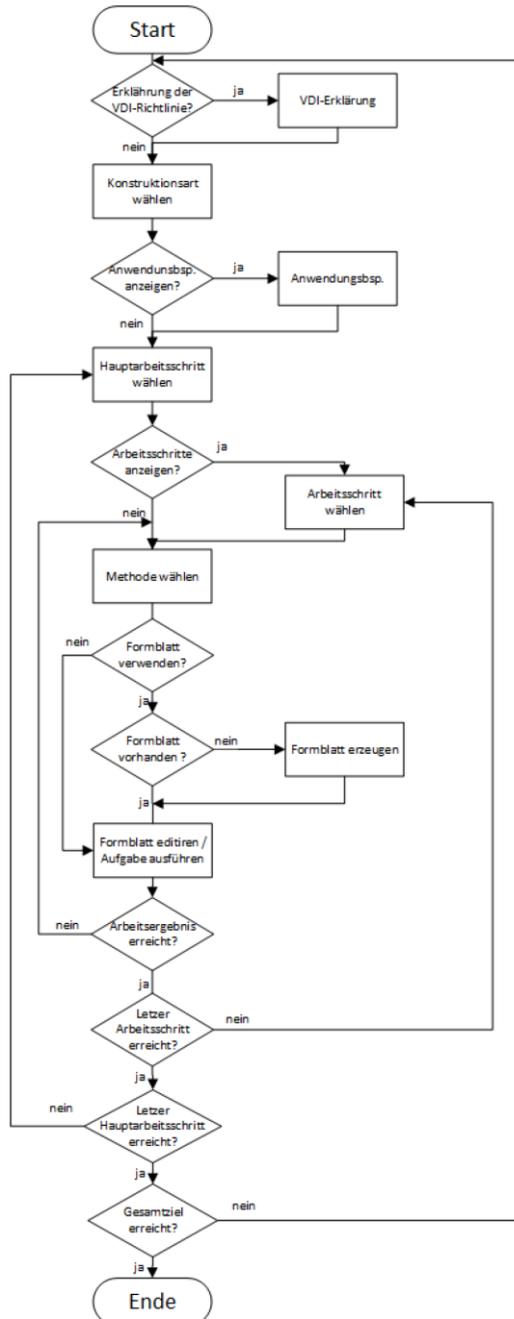


Bild 6.101: Modulstruktur und Arbeitsprozess der VDI-app [GAR14]

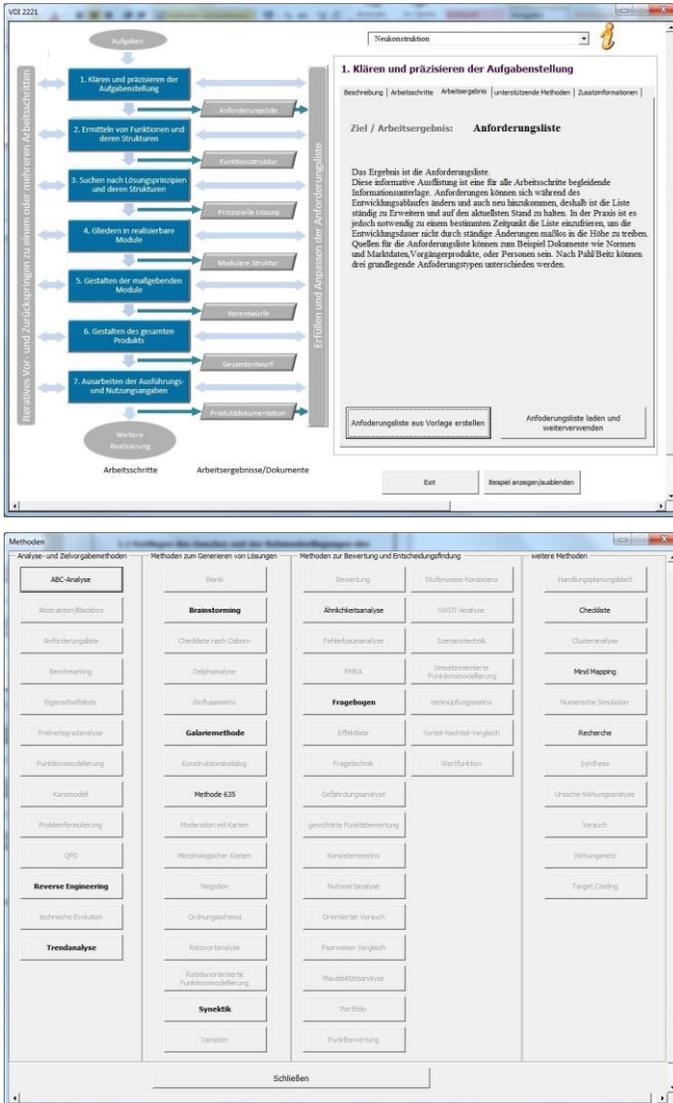


Bild 6.102: VDI-Entwicklungsprozess (interaktiv) und Methodenvorschlag der VDI-app [GAR14]

Die Sinnhaftigkeit und der Nutzen des Einsatzes eines Werkzeuges wie der VDI-app werden in der Methodenbeschreibung Mek2 (Kap. 3.4.2) ausgeführt, worin diese Applikation einen Beitrag zur Steigerung der Attraktivität des Einsatzes methodischen Konstruierens liefern soll.

6.11.2 Differenzierung der Konstruktion

Wie für alle Bereich des Maschinenbaus kann auch für die Entwicklung und Konstruktion in der Technischen Logistik eine Unterscheidung der Konstruktionsaufgaben nach ihrem Aufwand und damit dem Grad der Änderung vorhandener Entwicklungen bzw. der Neuheit getroffen werden. In Abschnitt 6.11 wurde der Produktentwicklungsprozess (PEP) schon eingehend dargelegt und in Bild 6.100 auch auf die ggf. entfallenden Prozessschritte bei Änderungskonstruktionen hingewiesen. Der Fokus der meisten Phasenmodelle zum Vorgehen in der Konstruktion liegt auf der Neukonstruktion, die aber niemals den Hauptteil der konstruktiven Tätigkeiten ausmacht. Diese sind somit nur bedingt brauchbar – es werden hier andere Ansätze wie KBx und die Funktionsanalyse/synthese vorgeschlagen, um v.a. im Bereich der Änderungskonstruktionen (vermutlich auch in der Logistik die verbreitetste Konstruktionsart) effektive Methoden einzusetzen (s. Kap. 6.11.3 und die Methoden MeK1, MeK2, MeK3, MeK4 und MeK5 in Kap. 3.4).

6.11.2.1 Konstruktionsarten und ihre Vorgehenspläne

Während [RS12] am umfassendsten differenziert (kursive Aufzählungen unten zusätzlich), hat sich in anderen Werken [FEL13a], [EM13] eine weniger feingliedrige Differenzierung der Konstruktionsarten nach Umsetzungsaufwand und Neuheitsgrad eingebürgert. Man unterscheidet, beginnend mit maximalem Neuheitsgrad und Umsetzungsaufwand:

- *Innovation*: Neue Aufgaben und Probleme werden mit neuen Lösungsprinzipien gelöst – neue Produktstruktur.
- **Neukonstruktion**: Neue Aufgaben und Probleme werden mit neuen oder Kombinationen bekannter Lösungsprinzipien gelöst – neue Produktstruktur.
- *Weiterentwicklung*: bekannte Funktionsstruktur um neue Funktionen mit neuen oder bekannten Lösungsprinzipien ergänzt – Produktstruktur weitgehend vorhanden.
- **Anpassungskonstruktion**: Lösungsprinzip bleibt erhalten, Gestaltung wird an die Anforderungen angepasst – Produktstruktur und techn. Dokumentation weitgehend vorhanden.
- **Variantenkonstruktion**: innerhalb vorgedachter Randbedingungen werden die Größe und die Anordnung von Bauteilen und –gruppen variiert (typisch bei Baukästen und –reihen) – Produktstruktur und techn. Dokumentation vorhanden aber zu konfigurieren.
- **Wiederholkonstruktion**: neuer Fertigungsanlauf für bereits konstruiertes und produziertes Produkt – Produktstruktur und techn. Dokumentation komplett vorhanden.

In Ergänzung zur Angabe der zeitlichen Häufigkeiten der Phasen des Produktentwicklungsprozesses in Bild 6.100 zeigt Bild 6.103 die prozentuale Häufigkeit des Auftretens der drei wichtigsten Konstruktionsarten mit den durchschnittlichen absoluten Dauern im Maschinenbau über Einzelfertigung, Kleinserie und Serie gemittelt laut den VDMA-Umfragen 1987 und 2007 im allgemeinen Maschinenbau [EM13].

Aufgrund des projektzentrierten Geschäfts der Anlage- und Komponentenhersteller von Materialflusstechnik wird vorwiegend auf vorhandene Produkte zurückgegriffen. Zur exakten Verteilung existieren keine statistischen Werte, es kann aber von einer Verschiebung der Häufigkeiten hin zur Varianten- und Anpassungskonstruktion angenommen werden.

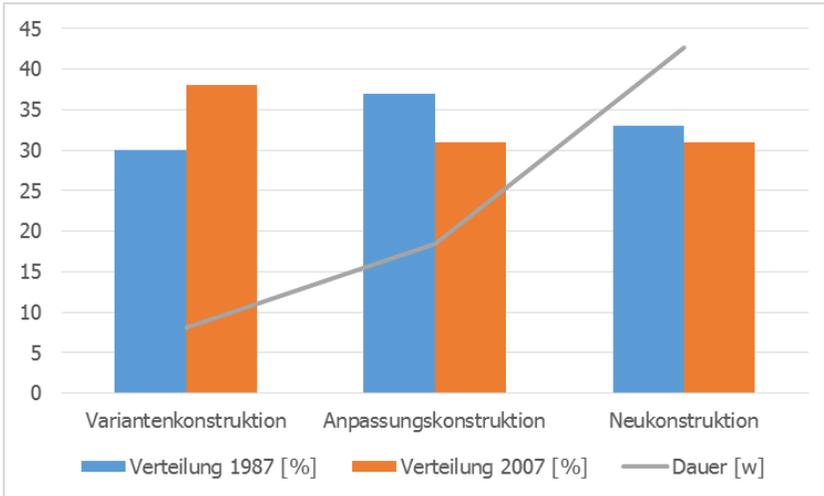


Bild 6.103: Verteilung des Auftretens und durchschnittliche Dauer von Varianten-, Anpassungs-, und Neukonstruktion im Maschinenbau (VDMA nach [EM13])

Wenn man ein fünfphasiges Vorgehensmodell (z.B. nach Kesselring, der als erster ein solches funktionsorientiert spezifiziert hat) mit den Abschnitten: Aufgabenauswahl – Aufgabenklärung – Konzipieren- Entwerfen – Ausarbeiten für die Neuentwicklung heranzieht, kann man in einer Synopse das Vorgehen für die anderen Konstruktionsarten dazu bringen, siehe Bild 6.104. Für den detailliertesten und aufwendigsten Schritt „Konzipieren“ sind weitere Details [EM13] S. 352f. zu entnehmen. Die unter Ergebnisse gelisteten Teilergebnisse sind immer Resultate eines Vorgehenszyklus' – beispielsweise das TOTE-Modell (Kap. 6.11.1). Die Anmerkungen „Kritik an den Vorgehensmodellen“ aus Kap. 6.11.1 gelten sinngemäß.

Die Methodenempfehlungen und deren Ein- bzw. Zuordnung zum PEP beziehen sich stets auf die in Bild 6.104 entworfene Systematik, die Erkenntnisse der Quellen [EM13], [FEL13a] und [RS12] vereint und um für die Logistik relevante Schritte und Ergebnisse adaptiert wurde.

Arbeitsabschnitte	Neukonstruktion		Anpassungskonstruktion		Variantenkonstruktion		Wiederholungskonstruktion		Anm.
	Arbeitsschritt	Ergebnis	Arbeitsschritt	Ergebnis	Arbeitsschritt	Ergebnis	Arbeitsschritt	Ergebnis	
1 Ziele definieren, Aufgabe fähig, Vorgehen planen	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	
2 Konzept planen	Funktionen ermitteln Lösungsprinzipien suchen (kaufmännische, technische, konstruktive) Konzepte erarbeiten	Funktionsliste (-struktur) Lösungsprinzipien konstruktive Konzeptskizze Beschreibung	Funktionen ermitteln Lösungsprinzipien suchen (kaufmännische, technische, konstruktive) Konzepte erarbeiten	Funktionsliste (-struktur) Lösungsprinzipien konstruktive Konzeptskizze Beschreibung	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	entfällt	entfällt	
3 Entwerfen vorbereiten	Gesamtbearbeitende Anforderungen erkennen maßgeb. Funktionsträger v. unabh. unterscheiden	ergänzte Anforderungsliste Skizze Baugruppenstruktur	Gesamtbearbeitende Anforderungen erkennen maßgeb. Funktionsträger v. unabh. unterscheiden	ergänzte Anforderungsliste Skizze Baugruppenstruktur	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	entfällt	entfällt	
3.1 Entwerfen Vorgehen	Hauptabmessungen Funktionsträger festlegen maßgebende, dann abh. Vorgehen tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	Ausgangsberechnung Simulation Vorgehen Bewertung/Kostenschätz. orientierende Versuche	Hauptabmessungen Funktionsträger festlegen maßgebende, dann abh. Vorgehen tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	Ausgangsberechnung Simulation Vorgehen Bewertung/Kostenschätz. orientierende Versuche	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	entfällt	entfällt	
3.2 Entwerfen endgestalten	alle Funktionsträger endgestalten tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	Endberechnung korr., vafd. Simulation Gesamtwert korr. Bewertung/Kosten	alle Funktionsträger endgestalten tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	Endberechnung korr., vafd. Simulation Gesamtwert korr. Bewertung/Kosten	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	ausgewählte Funktionsträger endgestalten tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	angepasste Endberechnung adaptierte, vafd. Simulation Gesamtwert korr. Bewertung/Kosten	entfällt
4 Ausarbeiten	Einzelzeichnungen erstellen Gesamtsatz erstellen Stücke kontrollieren Fertigungs-, Montage-, Prüf-, Montagevorschriften Betriebsanl. erstellen/prüf.	Einzel-, Gruppen-, Gesamtzeichnungen Stücke kontrollieren Fertigungs-, Montage-, Prüf-, Montagevorschriften Betriebsanl. erstellen/prüf.	Einzelzeichnungen erstellen Gesamtsatz erstellen Stücke kontrollieren Fertigungs-, Montage-, Prüf-, Montagevorschriften Betriebsanl. erstellen/prüf.	Einzel-, Gruppen-, Gesamtzeichnungen Stücke kontrollieren Fertigungs-, Montage-, Prüf-, Montagevorschriften Betriebsanl. erstellen/prüf.	Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	ausgewählte Funktionsträger endgestalten tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	angepasste Endberechnung adaptierte, vafd. Simulation Gesamtwert korr. Bewertung/Kosten	entfällt
5 Fertigen					Produktplanung Anforderungsliste erab. Umsatz/Gewinn planen Kostenziele ermitteln Vorgehen planen	Anforderungsliste Umsatz/Gewinnplan Kostenziele Vorgehenplan	ausgewählte Funktionsträger endgestalten tech./wirtsch. bewerten Schwachstellen analys.	angepasste Endberechnung adaptierte, vafd. Simulation Gesamtwert korr. Bewertung/Kosten	entfällt

graue Schrift wenn Identifizierung mit Neukonstruktion, Einordnung zwischen den Arbeitsschritten freigelegt
Iteration oder Stopp, Vorgehenszyklen nach z.B. TQTE

Bild 6.104: Vorgehenspläne der Hauptforderung „Funktion“ von Wiederhol-, Varianten-, Anpassungs-, und Neukonstruktion (Synthese aus [EM13], [FEL13a] und [RS12])

Während die obigen Begrifflichkeiten im Fachbereich als verbreitet und bekannt gelten können, handelt es sich bei den wissenschaftlichen Hintergründen der **Innovation** um vorwiegend eine betriebswirtschaftliche Terminologie und deren Inhalte. Für Entwickler und Konstrukteure ausreichenden Einblick liefert [EM13] mit Abschnitt 7.2 über Ziele, Methoden und Zweck der Innovation wozu hier hinführend noch folgendes anzumerken ist. Der von vielen Unternehmen spürbare Zwang zu Innovation ist deutlich an den Produktlebensdauern und dem Umsatz der Produkte abzulesen. Wenn man eine Produktalterteilung in kleiner fünf, fünf bis zehn und größer zehn Jahre vornimmt kann man anführen, dass Siemens beispielsweise 1980 hier eine prozentuale Umsatzverteilung von 48-30-22 hatte, die sich bis 2003 kontinuierlich auf 75-19-6 verschoben hat. Auch für den allgemeinen Maschinenbau kann nach VDMA festgehalten werden, dass 57% des Umsatzes mit maximal fünf Jahre alten Produkten erzielt werden [EM13].

Es erscheint somit angemessen, die Thematik des Innovationsgrades im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertbarkeit zu betrachten. In Bezug auf die betroffenen Prozesse zur Umsetzung einer Produktinnovation innerhalb des Unternehmens, spielen technologische Aspekte eine wesentliche Rolle. Der Innovationsgrad ist eine Größe, in die zahlreiche Faktoren hineinspielen [FEL13a]:

- Inhaltlich (Gegenstand, Art und Grad der Innovation)
- Subjektiv (Beurteilende Instanz)
- Prozessual (Innovationsprozess, welche Arbeitsschritte sind diesem zuzuteilen)
- Normativ (Erfolg einer Innovation)

Mit [FEL13a] kann relevantes für den technischen Zuständigkeitsbereich der Innovation festgehalten werden: „Technisch relevant ist die erste Dimension. Hier sind die Invention und die Innovation voneinander abzugrenzen. Die Invention (Erfindung) ist die „erstmalige technische Umsetzung als auch die neue Kombination bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse“ und steht damit „am Anfang eines der beiden Prozesse Technologieentstehung oder Technikentstehung“. Der Begriff der Innovation bedeutet das Einführen eines neuen Produkts in den Markt, wobei die zugehörigen Prozesse der Produktentstehung und das erstmaligen Anfahrens der Produktion im Sinne eines Innovationsprozesses hinzugezählt werden. Die Innovation setzt somit eine Invention voraus, die betriebswirtschaftliche Verwertung einer Invention hingegen eine Innovation. [...]. Die Innovation bedeutet den Anfangspunkt eines technologischen Lebenszyklus eines Produkts. Eine technische Weiterentwicklung des Produkts durch eine Umsetzung der Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Technologie kann hier nur in diskreten Schritten durch „neue Produkte“ erfolgen. Diese Produkte („Produktiterationen“) sind dann jedoch nicht „innovativ“, sondern Anpassungskonstruktionen im oben genannten Sinne; die weiterentwickelte Technologie entspricht einer neuen Randbedingung. Dass jedes Objekt hinsichtlich seines Innovationsgrades von unterschiedlichen Individuen bzw. Gruppen anders, also subjektiv wahrgenommen wird, ist sowohl für das Managen von unternehmensinternen Prozessen als auch für den Markterfolg eines Neuprodukts relevant. Für ein Unternehmen ist die erstmalige Auseinandersetzung mit neuen Objekten in jedem Fall innovativ und damit vom Tagesgeschäft abzugrenzen, unabhängig davon, ob die Fachwelt außerhalb des Unternehmens das Objekt als „neuartig“ oder „etabliert“ betrachtet.

Insofern hat das Management eines Unternehmens ein Objekt hinsichtlich seines Innovationsgrades „unternehmens-subjektiv“ zu beurteilen, um z.B. technischen Risiken angemessen begegnen zu können („prozessuale Dimension“). In Bezug auf den Markterfolg durch die Differenzierung eines Produkts durch seine Neuartigkeit ist hingegen einzig die Wahrnehmung der Käufergruppe relevant; hier muss die unternehmensspezifische Wahrnehmung des Innovationsgrades eines Neuprodukts strikt von der Kundenwahrnehmung abgegrenzt werden. Es können sich jedoch gute Möglichkeiten ergeben, wenn ein Unternehmen eine ihm vertraute Technologie in Form eines neuen Produkts auf einem Markt anbieten kann, in dem diese Technologie bisher unbekannt ist.“

6.11.2.2 Variantenmanagement: Produktfamilien und Varianten - Produktstrukturierung

Verschiedene Megatrends [NAI82], [ZPU15], Konkurrenz und ein Wandel von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt verstärkt die Konkurrenz zwischen produzierenden Unternehmen. Nach [EM13] können durch kurzfristige Überarbeitung oder Neuentwicklung von Produkten neue Kaufanreize erzeugt werden. Hinzu kommt die Tendenz der computergestützten „Individualisierung von Massenprodukten“ und Produkte können nach einer gewissen Betriebszeit ein „Upgrading“ erfahren. Diese Trends vergrößern die Variantenvielfalt bei gleichzeitig geringerer Stückzahl und Losgröße pro Variante. Dies erhöht die direkten und vor allem die indirekten Kosten pro Variante und verlängert die Durchlauf- und Lieferzeit.

Während Produktkonfiguratoren oftmals Kunden mit ihren Wünschen überfordern setzen Unternehmen wie Toyota beispielsweise auf eine Reduzierung der Variantenvielfalt. Untersuchungen in der Automobilbranche haben erstaunliches zutage getragen:

- Die Anzahl der Teilenummern ist seit 1975 bis 1985 um 400 % gestiegen.
- 50 % der Varianten sind überflüssig.
- 50 % der Investitionen sind komplexitätsbedingt.
- 80 % der Tätigkeiten sind nur noch mittelbar wertschöpfend.

Die Steigerung der Teilevielfalt, Produktvielfalt und die daraus resultierende Komplexität der Produkte erzwingen eine systematische Durchforstung der Produktpalette, um Teile und Varianten zu reduzieren. Denn bei einer Verdoppelung der Variantenzahl konnten Kostensteigerungen um 20 bis 30 % nachgewiesen werden. Allein die Verwaltungskosten in anderen Abteilungen, die durch eine neue Zeichnung ausgelöst werden, können sechsmal so hoch sein, wie die Kosten der Zeichnungserstellung selbst [EM13].

Diese Vielfalt hat nach wiederum unterschiedliche Gründe und Bezüge. Die angesprochene Variantenvielfalt kann sich beziehen auf [EM13]:

- Die Produkt- oder die Erzeugnisvarianten, die extern sichtbar sind.
- Baugruppen- und Teilevarianten, die intern z.B. in unterschiedlicher Gestalt oder Fertigungs- und Montagetechnik erzeugt werden.

Ursachen für die Produktvarianten können die folgenden sein, aus dem in [EM13] angegebenen Geltungsbereich des allgemeinen Maschinenbaus ist aber eine nahezu Deckungsgleichheit für die Entwicklung und Konstruktion von Materialflusstechnik zu erkennen:

- Dominanz des Vertriebs relativ zu Konstruktion und Produktion
- größere Marktanteile durch breitgestreutes Angebotsprofil (Diversifikationsstrategie)
- länderspezifische Abänderungen zur Exportfähigkeit von Produkten,
- Angebot einer kundenspezifischen Lösung als Türöffner für Folgeaufträge
- Strategie der Produktindividualisierung
- gesetzliche Auflagen und kundenspezifische Richtlinien und Normen

Ursachen für die Baugruppen- und Teilevielfalt können eher in der internen Organisation begründet sein (wie oben):

- Mangel an Koordination und Zusammenarbeit zwischen den Unternehmensbereichen,
- mangelhafte Zugriffsmöglichkeit auf relevante Informationen,
- unzureichende Beschreibung der Produktstruktur,
- zu späte Normung und Standardisierung der Bauteile,
- Verwendung von konventionellen Kalkulationsverfahren zur Beurteilung der Kosten anstelle des Prozesskostenansatzes ggf. werden so Exoten des Produktspektrums mit unerkannten Verlusten verkauft.
- bereits vorhandene Erfahrung wird nicht genutzt
- Fehlen von effektiven, schnellen Wiederholteil- und Ähnlichkonstruktionssuchsystemen,
- Kommunikationsdefizite in der Konstruktion,
- falsche Nutzung der Kopier- und Änderungsfreundlichkeit bei CAD-Systemen, d.h.
- schnelle Konstruktion, aber kostenintensive Herstellung

Die Festlegung der Produktstruktur bestimmt nun die Fertigungs- und Beschaffungsart des Produkts, beeinflusst die Qualitätssicherung und -kontrolle, legt den möglichen Montageablauf mit der Baugruppenbildung fest und entscheidet über die Möglichkeit zur Variantenbildung [FEL13a], siehe Bild 6.105.

Als Produktprogramm wird die Gesamtheit der Produkte eines Unternehmens bezeichnet. Dieses besteht aus dem Produktionsprogramm und zugekauften Produkten, die ohne substantielle Änderungen am Markt angeboten werden. Das Produkt- bzw. Produktionsprogramm kann sich aus Produktfamilien zusammensetzen; diese stellen eine Menge verschiedener Produkte dar, die auf einer gemeinsamen Basis aufbauen. Diese Produkte verfügen über ähnliche Funktionsprinzipien, gleiche Anwendungsbereiche oder gleiche Produktionsverfahren. Die einzelnen Vertreter einer Produktfamilie werden als Varianten bezeichnet. Varianten von Produkten sind andere Produkte des gleichen Zwecks, die sich in mindestens einer Beziehung oder einem Element unterscheiden. Ein Element unterscheidet sich von einem anderen Element in mindestens einer Eigenschaft. Die Struktur eines Produkts kann anhand seiner funktionalen Elemente oder seiner physischen Komponenten beschrieben werden.

Die Umsetzung der funktionalen Anforderungen in ein physisches Produkt erfolgt nach der Definition des Produktentwicklungsprozesses in der Konzept- und der anschließenden Entwurfsphase. Produktstruktur kann nach Differential- oder Integralbauweise angelegt sein [RS12].

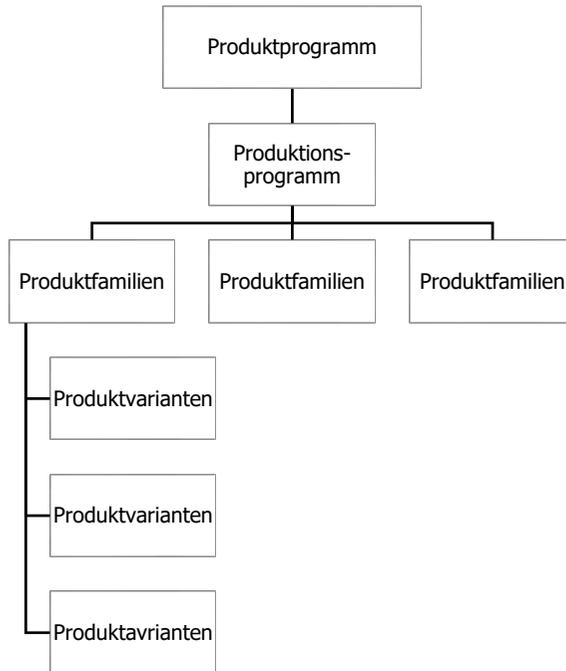


Bild 6.105: Gliederung eines Produktprogrammes nach [RS12]

Die Baustruktur der Komponenten und Baugruppen kann dabei Teil- und Hauptfunktionen der Funktionsstruktur vereinen. Das Vereinen mehrerer Einzelteile, die eine oder mehrere Funktionen erfüllen, zu einem Bauteil wird als **Integralbauweise** definiert. Demgegenüber bezeichnet die **Differentialbauweise** das Zergliedern eines Bauteils mit mehreren Funktionen in mehrere Einzelteile mit jeweils einer geringeren Funktionenzahl. Ein Vorteil der Differentialbauweise ist die Verwendungsmöglichkeit handelsüblicher Normteile. Bei der Integralbauweise können dagegen Fügestellen und somit Montageschritte eingespart werden.

Auf Basis der Anforderungen und Funktionen können Wirkprinzipien und Wirkkonzepte für die Realisierung eines variantenreichen Produktprogrammes entwickelt werden. Dabei herrscht gegenüber den Konzepten für Einzelprodukte eine erhöhte Komplexität. Eine zentrale Herausforderung ist es, die Variantenvielfalt auch auf Wirkebene auf das notwendige Maß zu begrenzen. Dem Aufbau einer geeigneten Produktstruktur sowie dem Zeitpunkt der Variantenentstehung kommen hier eine entscheidende Bedeutung zu. Folgende Strategien beziehungsweise Gestaltungsprinzipien haben sich in der Praxis etabliert, folgend nach [LP08] und [RS12]:

Die **Modularisierung** basiert auf der Zerlegung eines Systems in leicht austauschbare Teile (Module). Sie dient der Unterteilung des Gesamtsystems in überschaubare Einheiten, die unabhängig voneinander entwickelt, beschafft, produziert und geprüft werden können. Die Definition geeigneter Schnittstellen ist dabei Voraussetzung für die Bildung und den Austausch von Modulen. Die Modulbauweise ist Grundlage für die modulare Produktstruktur, über die Produktarchitektur wird die Modularität beschrieben. Auf Basis der Produktarchitektur und der bisherigen Darstellungen können die Begriffe zur Modularisierung eines Produkts aber wie folgt definiert werden:

- **Modularität** ist eine graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur im Sinne einer zweckmäßigen Strukturierung.
- **Modularisierung** ist die Produktstrukturierung, bei der die Modularität eines Produkts erhöht wird. Ihr Ziel ist die Optimierung einer bestehenden Produktarchitektur, Produktanforderungen zu erfüllen oder um Rationalisierungseffekte in der Produktentstehungsphase zu erzielen.
- **Modul** ist eine funktional und physisch beschreibbare Einheit, die von den restlichen Produktmodulen weitgehend unabhängig ist.

Merkmale modularer Produkte sind:

- **Kommunalität der Module:**
Komponenten bzw. Module werden an mehreren Stellen innerhalb einer Produktfamilie verwendet.
- **Kombinierbarkeit der Module:**
Produkte können durch die Kombination von Komponenten bzw. Modulen konfiguriert werden.
- **Funktionsbindung:**
Es besteht eine feste Zuordnung zwischen Funktionen und Modulen.
- **Schnittstellenstandardisierung:**
Die Schnittstellen zwischen den Modulen sind standardisiert.
- **Entkopplung der Komponenten:**
Die Interaktionen der Komponenten innerhalb eines Moduls sind stärker ausgeprägt als die Interaktionen zwischen Komponenten verschiedener Module.

Mit **Plattform** wird die Zusammenfassung derjenigen Komponenten, Schnittstellen und Funktionen bezeichnet, die über eine ganze Produktfamilie vereinheitlicht und daher zeitlich stabil sind. Die Plattformbauweise kann als ein Sonderfall der Modularisierung aufgefasst werden. Die Idee der Plattformbauweise stammt aus der Automobilindustrie und dient zur Entwicklung variantenreicher Produkte mit kurzen Zykluszeiten aufgrund gleicher Teile und Strukturen. Ein Plattformprodukt besteht aus einer ausführungsneutralen Produktplattform und produktspezifischen Anbauten, die auch als Produktgestaltungselemente bezeichnet werden. Die Produktplattform wird unter funktionalen Gesichtspunkten festgelegt und bildet den größten gemeinsamen Nenner einer Produktfamilie. Dass die Produktverwandtschaft der gemeinsamen Produktplattform unter der nach außen wahrnehmbaren Produktoberfläche nicht erkennbar ist, stellt ein weiteres Kennzeichen der Plattformbauweise dar.

Plattform- und Baukastenbauweise können aufgrund der beschriebenen Merkmale nicht als identische Bauweisen bezeichnet werden, denn die Produktvarianten werden bei der Plattformbauweise nicht grundsätzlich durch Konfiguration von mehreren vorausgedachten Bausteinen zusammengesetzt.

Bei **Baukastensystemen** wird eine möglichst große Zahl an Produktvarianten aus einer möglichst geringen Anzahl an Bausteinen (Bauteilen, Baugruppen) mit unterschiedlicher Funktion und Gestalt zusammengesetzt. Müssen von einem Produktprogramm bei einer oder mehreren Größenstufungen verschiedene Funktionen erfüllt werden, so ergibt das bei der Einzelkonstruktion eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte, was einen entsprechend großen konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand bedeutet. Die Rationalisierung liegt nun darin, dass die jeweils geforderte Funktionsvariante durch Kombination festgelegter Einzelteile und/oder Baugruppen (Funktionsbausteine) aufgebaut wird. Eine solche Kombination wird durch Anwendung des Baukastenprinzips realisiert. Durch mehrere Größenstufen solcher Bausteine (unterschiedliche Lösungen) enthalten Baukästen oft auch Baureihen. Die Bausteine sollen dabei nach möglichst ähnlicher Technologie gefertigt werden. Da sich in einem Baukastensystem die Gesamtfunktion durch die Kombination diskreter Funktionsbausteine ergibt, muss zu einer Baukastenentwicklung eine entsprechende Funktionsstruktur erarbeitet werden. Damit wird die Konzept- und Entwurfsphase viel stärker beeinflusst als bei einer reinen Baureihenentwicklung. Ein Baukastensystem wird sich gegenüber Einzellösungen immer dann als technisch-wirtschaftlich günstig anbieten, wenn alle oder einzelne Funktionsvarianten eines Produktprogramms nur in kleineren Stückzahlen zu liefern sind und wenn es gelingt, das geforderte Spektrum durch einen oder nur wenige Grundbausteine und Zusatzbausteine zu realisieren. Die Erfahrung zeigt, dass mit Baukastensystemen vor allem die Gemeinkosten (Personalaufwand und -kapazität) reduziert werden können, aber weniger Material- und auch Fertigungslohnkosten, da das Baukastenprinzip zu Gewichts- und Volumenvergrößerungen an Bausteinen und damit Ausführungsvarianten gegenüber der Einzelausführung führen kann. Wird ein Baukastensystem mit dem Ziel entwickelt, dass jede Funktionsvariante kostengünstiger sein soll als ein für diese Aufgabenstellung speziell entwickeltes Produkt, kann man sich den Entwicklungsaufwand sparen. Ein Baukastensystem kann nur als Gesamtsystem günstiger sein als eine den Gesamtfunktionsvarianten entsprechende Anzahl von Einzelausführungen.

Bei **Baureihen** erfolgt die Variantenbildung durch Skalierung beziehungsweise Größenstufung bei ansonsten gleicher Funktion, gleicher konstruktiver Ausführung und gleichen Schnittstellen. Baureihenentwicklungen können von vornherein vorgesehen sein oder von einem bestehenden Produkt ausgehen, auch wenn dies zunächst mit der Zielsetzung einer Einzellösung entwickelt wurde. Das Wesen einer Baureihenentwicklung besteht darin, dass man von einer Baugröße der zu entwickelnden Baureihe (Maschine, Baugruppe oder Einzelteil) ausgeht und von dieser weitere Baugrößen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ableitet. Für die Entwicklung von Baureihen sind Ähnlichkeitsgesetze zwingend und dezimalgeometrische Normzahlen zweckmäßig.

Das Vorgehen der Baureihenentwicklung kann in einem sechsstufigen Schema angegeben werden:

1. Erstellen eines Grundentwurfs, der im Zuge einer beabsichtigten Baureihe entsteht oder von einem bereits bestehenden Produkt stammt.
2. Bestimmen der physikalischen Abhängigkeiten (Exponenten) nach Ähnlichkeitsgesetzen für im Wesentlichen geometrisch ähnliche Baureihen oder mit Hilfe von Exponentengleichungen bei halb-ähnlichen Baureihen, wenn entsprechende übergeordnete Bedingungen bestehen. Darstellen der Ergebnisse im Normzahldiagramm in Form von Datenblättern.
3. Festlegen der Größenstufungen und des Anwendungsbereichs in den Datenblättern.
4. Anpassen der theoretisch gewonnenen Reihe an übergeordnete Normen oder technologische Bedingungen und Darstellen der Abweichungen in den Datenblättern.
5. Überprüfen der Baureihe durch Erarbeiten maßstäblicher Entwürfe von Baugruppen oder von kritischen Zonen für extreme Baugrößen.
6. Verbessern und Vervollständigen der Unterlagen, soweit sie zur Festlegung der Reihe und zur Erstellung nötig werdender Fertigungsunterlagen erforderlich sind.

Es ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Hersteller:
 - Die konstruktive Arbeit wird für viele Anwendungsfälle nur einmal unter Ordnungsprinzipien geleistet.
 - Die Fertigung von bestimmten Losgrößen wiederholt sich und wird dadurch wirtschaftlicher.
 - Es ist eher eine hohe Qualität erreichbar.
- Anwender
 - Preisgünstiges, qualitativ gutes Produkt,
 - kurze Lieferzeit,
 - problemlose Ersatzteilbeschaffung und Ergänzung.

Als Nachteile für beide ergibt sich eine eingeschränkte Größenwahl mit nicht immer optimalen Betriebseigenschaften.

Baureihen (mit der zugehörigen Variantenkonstruktion) sind der in der Materialflusstechnik verbreitetste Varianten- und Strukturierungsansatz und bei allen namhaften Herstellern verfügbar. Dies ist in der oben (Kap. 6.11) beschriebenen Natur des Lebenszyklus' eines Materialflusssystem begründet, dessen Planung, Adaptierung und Konfektionierung von vorhandenen Komponenten die eigentliche Systementwicklung darstellt. Die funktionalen Strukturen ändern sich im Rahmen dieser Planungsaufgaben ebenso wenig, wie die Lösungsprinzipien der geforderten Funktionen, da aus mannigfaltigen Gründen fast immer auf bestehende Lösungen zurückgegriffen wird. Dazu gehören die lange Lebensdauer der Produktfamilien mit bis zu 15 Jahren, die Einsatz- und Verfügbarkeitserfahrungen, die Ersatzteilerhaltung sowie die Betriebstechnik. KBL (Kap6.13.3) ist dazu ein geeigneter Ansatz, die Konfigurationsaufgaben in der Planung zu automatisieren.

Neuentwicklung und Innovation wird hier größtenteils, nicht zuletzt aufgrund des Zeitdrucks, außerhalb des Kundengeschäftes (Planung und Realisierung von

Materialflusssystemen) erarbeitet und dann schrittweise in den Markt eingeführt. Die Ansätze zur dezentralen Steuerung und flexibel gestaltbaren Plug&Play-Materialflusstechnik [GÜN10], [KAR12], [HEB12] greifen die Modularisierung annähernd auf, wenngleich dem Gesamtprodukt hier dann eher ein Materialfluss- oder Fördersystem entspricht.

Variantenmanagement umfasst alle Maßnahmen mit denen die Variantenvielfalt innerhalb eines Unternehmens bewusst beeinflusst wird. Dies gilt auf Produkt- und Prozessseite. Ziel ist hierbei eine Reduzierung und Beherrschung der Komplexität, was die Minimierung der internen Komplexität (Variantenvielfalt) bei einer gleichzeitig genügend hohen externen Vielfalt für Markt und Kunden bedeutet [EM13]. Dazu stehen umfangreiche softwaretechnische Hilfsmittel zur Verfügung, einen Einblick dazu gibt Kap. 6.10.2.

Einige Ansätze des Komplexitätsmanagements, wie etwa die DesignStructureMatrix, werden in Abschnitt 6.12 übernommen und für die Entwicklung und Darstellung von Abhängigkeiten von Konstruktionsobjekten adaptiert. Diese Techniken, die im Allgemeinen der Planung, Analyse und Handhabung komplexer Systeme dienen, können den für die Technische Logistik identifizierten Methoden der Konstruktion (v.a. der automatischen Konstruktion) als probate Hilfsmittel dienen.

6.11.3 Analyse, (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien³⁰³

„Dem Erkennen und Verstehen von Abhängigkeiten durch Visualisierung, auch über die klassischen Domänengrenzen hinweg, kommt eine zentrale Bedeutung bei der Produktdefinition zu. Insbesondere existieren heute keine Ansätze Informationen aus frühen Konstruktionsphasen, wie z.B. der Funktionsmodellierungsphase, integriert mit der sich daraus ergebenden Bauteilgestalt und den gegenwärtigen technischen Möglichkeiten wie den Technologien der virtuellen Realität zu visualisieren. ... Obwohl eine Reihe von Funktionsmodellierungsmethoden insbesondere im Rahmen der Softwareentwicklung konzipiert wurde, ist eine ingenieurgerechte Lösung bislang nicht vorhanden. ... Die funktionale Produktbeschreibung existiert auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus, beginnend mit der Formalisierung der Aufgabenstellung durch einen begrenzten Satz an Grundfunktionen bis hin zur Beschreibung der Produkttopologie und der Wirkzusammenhänge. In Abhängigkeit von der Abstraktionsebene der funktionalen Produktbeschreibung können jeweils verschiedene Beschreibungsformen definiert werden. Die Funktionen eines Produkts können in Hierarchien und/oder flussorientierten Netzwerken strukturiert werden. Die funktionale Produktbeschreibung wird im Konstruktionsprozess zum einen für die Beschreibung der Funktionsweise des Produkts und zum anderen für das Wiederfinden von bekannten, bereits ausgeführten Lösungen verwendet.

Eine ingenieurgerechte Modellierungstechnik wurde in Softwaresystemen bislang gar nicht oder nur unzureichend umgesetzt. Integrative Ansätze, die

³⁰³ Für Teile der inhaltlichen Erarbeitung danke ich meinen Bacheloranden Florian Rittmannsberger und Gregor Rottenschlager im Rahmen des Bachelorprojektes 2014 und meinem Diplomanden Johannes Perfler [PER14]

durchgängig von der Anforderungsmodellierung bis zur Gestaltmodellierung ein Produkt abbilden können, wurden zwar im Forschungskontext erarbeitet, konnten sich aber in der Praxis nicht etablieren. Üblicherweise wird der Schritt der methodischen Funktionsmodellierung in der Produktentwicklung übersprungen. Die Integration von Funktionsstrukturen mit den Produktaufgabenstrukturen, wie sie aus der Anforderungsmodellierungsphase entstehen, oder in Produktstrukturen eines CAD Systems werden allenfalls am Rande umgesetzt oder sind gar nicht vorhanden.“ [KR09].

Die Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien versucht einen Beitrag zur systematisierten Lösungsgenerierung für gegebene Funktionsstrukturen zu leisten. Die Ansätze sollen kein vollautomatisiertes System wie in [KR09] liefern. Vielmehr sollen im Sinne der Wissenswiederverwendung strukturiert aufbereitete Grundfunktionen und deren Lösungen, kombiniert mit einfachen softwaretechnischen Hilfsmitteln, bereitgestellt werden. Durch Zugriffsmerkmale, systematische Gliederung und Aufbereitung in Datenbankstrukturen kann das Wissensspeicherprinzip „Konstruktionskatalog“ um eine multikriterielle Abfragemöglichkeit umfassend erweitert werden.

6.11.3.1 Begriffsbestimmungen

Da die Synthese von Lösungsprinzipien auf dem Entwicklungsprozess der VDI 2221 [VDI 2221] aufbaut, sind einige Begriffe klärend anzuführen.

- „Funktion:
 - Lösungsneutral beschriebene Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems. Man unterscheidet Gesamtfunktionen und Teilfunktionen sowie Hauptfunktionen und Nebenfunktionen. (Der Funktionsbegriff wird in den Natur- und Ingenieurwissenschaften auch zur Darstellung eines physikalischen oder mathematischen Zusammenhangs, z.B. in Form einer Gleichung, verwendet.)
- Funktionsstruktur:
 - Anordnung und Verknüpfung einzelner Funktionen zu einer oder mehreren komplexen Funktionen (z.B. zur Gesamtfunktion).“ [VDI 2221]

Die Funktionsstruktur ist die abstrakteste Darstellung der Produkteigenschaften und ist daher am besten zur Lösungsvariation geeignet. Aus ihr wird über die Wirkstruktur der prinzipiellen Lösung die Baustruktur abgeleitet. Daraus entsteht dann ein übergeordnetes System – die Systemstruktur.

Die Darstellung der Verbindungen zweier Körper, um Wirkprinzipien beschreiben zu können, wird unter anderem von Roth [ROT00] aufgegriffen. Er führt in seiner Literatur die Betrachtung von Schlussmatrizen ins Feld. Dabei gibt es eine logische Matrix, die Freiheiten und Sperrungen zweier Körper dem Rechner verständlich macht. Durch ihre Verknüpfung mit anderen Matrizen lassen sich Körperverbindungen voraussagen. Diese Verknüpfungen können mit Hilfe der booleschen Algebra definiert werden. Die Ansätze sind der Baustruktur zuzuordnen.

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) ist dafür eine grafische Aufarbeitung der Zusammenhänge. Es stellt in einem dreidimensionalen

Lösungsraum für die Funktions- Wirk- und Bauebene Möglichkeiten unterschiedlicher Methoden dar [LP08].

6.11.3.2 Funktionenanalyse

Von einer vorhandenen Konstruktion ausgehend beschäftigt sich die Wertanalyse nach DIN 69910 [DIN 69910] mit dem Ziel, Kosten zu senken. Das methodische Vorgehen entspricht dem der Weiterentwicklung, indem Kosten und Funktionen analysiert werden um für neue Kostenziele Lösungen zu suchen. Als Beurteilungsgrundlage von Konzepten dienen die Funktionskosten, welche sich aus den Kosten zur Erfüllung der einzelnen Funktionen zusammensetzen.

Die Wertanalyse geht in der Regel von einer vorhandenen Konstruktion aus und analysiert hinsichtlich der zu erfüllenden Funktionen und Kosten. Dadurch können für neue Kostenziele anschließend neue Lösungsideen und Lösungen für die geforderten Soll-Funktionen gesucht werden. Die Wertanalyse hat durch funktionsorientiertes und schrittweises Suchen nach besseren Lösungen viele methodische Gemeinsamkeiten mit der allgemeinen Vorgehensmethodik [FEL13a].

Merkmal Eingang E / Ausgang A	Allgemein anwendbare Funktionen	Symbole	Erläuterungen
Art	Wandeln		Art und Erscheinungsform von E und A unterschiedlich
Größe	Ändern		$E < A$ $E > A$
Anzahl	Verknüpfen		Anzahl von $E > A$ Anzahl von $E < A$
Ort	Leiten		Ort von $E + A$ Ort von $E = A$
Zeit	Speichern		Zeitpunkt von $E \neq A$

Bild 6.106: Allgemein anwendbare Funktionen abgeleitet von den Merkmalen Art, Größe, Anzahl, Ort und Zeit in Bezug auf den Stoff-, Energie- und Informationsumsatz [FEL13a]

Ein (oft unterschätztes [VDI 2803]) Modul der Wertanalyse, aber auch von Konstruktionsmethodiken, ist die Funktionenanalyse ([BH06] spricht im selben Kontext auch von Funktionsanalyse). „Die Methode betrachtet nicht das Produkt bzw. die Dienstleistung im Ganzen, sondern die Haupt- und Nebenfunktionen, welche das Produkt bzw. die Dienstleistung ausmachen. Diese nutzerbezogenen Funktionen beschreiben, wie das Produkt oder die Dienstleistung die Bedürfnisse des Nutzers während seiner Lebensdauer erfüllt.“ [WIR14] Sie analysiert Funktionen von Wertanalyse-Objekten im Sinne der Wertanalyse auf Wirkung, Zweck und Konzept hin. D.h. sie in ihre verschiedenen Komponenten, Elemente, Aspekte aufzugliedern und diese bezüglich verschiedener Kennzeichen, Merkmale, Attribute u. dgl. zu abstrahieren, aufzuteilen, einzuordnen und zu bestimmen, nach [VDI 2803]. Ziel der Funktionenanalyse ist die Ermittlung von Produkt- oder Prozessfunktionen und deren Strukturierung [MEP14b]. Sie

versucht „zu messen, inwieweit ein Produkt oder eine Dienstleistung diese erfüllen (Erfüllungsgrad).“ [WIR14]

Das FAST-Diagramm der Funktionenanalyse ähnelt der Beschreibungsweise der Entwicklungsmethodik [FEL13a]. Es ist nicht auf die Umsätze des Stoffs, der Energie und der Information (S, E, I) beschränkt, sondern versucht in verbalen Formulierungen mit möglichst standardisierter Beschreibungssyntax (Functive [MEP14b]) die Funktionen und Spezifikationen abzubilden. Eine Untergliederung erfolgt dabei in Übergeordnete- Basis-, Folge- Parallel- und akzeptierte Funktionen. Mit einer Fragenkette „wie?“ (rechtsläufig) und „warum?“ (linksläufig) lässt sich das FAST-Diagramm lesen.

Als unterstützendes grafisches Instrument der Synthese von Lösungsprinzipien ist der S-, E-, I-Umsatz besser geeignet, da er auf allgemein anwendbaren Funktionen aufbaut (Bild 6.106). Eine Projektion auf materialflusstechnische Hauptfunktionen eines Stetigförderers (hier Rollenförderer) gibt Bild 6.107 wieder.



Bild 6.107: Stoff-, Energie-, und Informationsumsatz an einem Stetigförderer

Von der Funktionenanalyse kann für die Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien der Strukturierungsansatz in Haupt- und Nebenfunktionen und die systematische Objektanalyse sowie -beschreibung übernommen werden. Dies geht über das Maß von Konstruktionskatalogen hinaus (s. Kap. 6.12.2.1). Die grafischen Darstellungsarten der Funktionenanalyse werden zugunsten der gebräuchlicheren Darstellungen des S-, E-, I-Umsatzes nicht aufgegriffen.

6.11.3.3 Definition: (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien

Ziel der ggf. rechnergestützten Synthese von Lösungsprinzipien ist die anforderungsspezifische ggf. automatisierte Bereitstellung von Lösungsprinzipien und Lösungen geforderter Funktionen. Dies wird im Kontext der intralogistischen Materialflusstechnik mit gegebener Funktionsstruktur bei Neukonstruktionen betrachtet.

Dabei handelt es sich um eine strukturierte, wissensunterstützte Lösungsgenerierung – im Gegensatz zu Kreativmethoden wie Brainstorming, TRIZ, Diese dient als Unterstützungsmethode für das Methodische Entwickeln (Schritt 3) und für die wissensbasierte Konstruktion.

Methodisch baut die (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien auf dem methodischen Entwickeln und der Verwendung von Wissensspeichern auf. Dabei wird dem Schritt 3 „Lösungsprinzipien der Funktionen“ (VDI 2221 [VDI 2221]) Information und Wissen anforderungsspezifisch bereitgestellt.

Technisch kann dieses Wissen elektronisch oder papiergebunden (Konstruktionskatalog, morphologischer Kasten) bereitgestellt werden und ist differenziert nach Baugruppen- oder Maschinenebene zu kategorisieren. Ergebnis ist immer eine prinzipielle Gesamtlösung (Prinzipkombination) als Kombination von Teillösungen (Einzellösungen).

Hauptvorteil ist die Wissenswiederverwendung und damit effizientere Lösungssuche. Daraus ist durch Zeitersparnis eine größere Lösungsvielfalt generierbar, die zur Bewertung zur Verfügung steht.

6.11.3.4 Einsatzbeispiele in der Technischen Logistik

Die (rechnergestützte) Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien wurde für Objekte der Technischen Logistik bislang sowohl elektronisch oder papiergebunden umgesetzt. Zwei Beispiele sollen den Nutzen, den Einsatz und die Wirkungsweise verdeutlichen.

Bei der **papiergebundenen Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien** kommen Konstruktionskataloge und morphologische Kästen zum Einsatz.

Lösung Funktion	1	2	3	4	5	6	7
Fahrwerk	Linienbeweglich			Flächenbeweglich			
	Dreirad	Drehschemel- lenkung	Differential-antrieb	Unabhängige Fahr- /Lenkeinheiten	Omnihool-Antrieb		
Bremsystem	mechanisch			Retarder			
	Bandbremse	Backenbremse	Scheibenbremse	Elektrischer Retarder	Hydraulischer Retarder		
Antrieb	Gleichstrommotor		Wechselstrommotor				Verbrennungs- motor
	BC-Motor	BLDC-Motor	Frequenz- Umrichter	Servo-Umrichter			
			Standard- Drehstrommotor	Syncho-servomotor	Asyncho- servomotor	Torquemotor	
Energie- versorgung	Intern				Extern		
	Akkumulator			Kondensator	Brennstoffzelle	Stromschiene	Induktion
	Blei	Alkalisch	Lithium				

Bild 6.108: Morphologischer Kasten des Fahrwerkes eines zellularen Fördermittels mit beispielhafter Auswahl

Am Beispiel des Fahrwerkes eines zellularen Fördermittels³⁰⁴ für Kleinladungsträger wird ein Konstruktionskatalog (Bild 6.138) zur Lösung der Funktion Stoff leiten (Fahrzeug bewegen) vorgestellt. Der zugehörige morphologische Kasten wird in Bild 6.108 vorgestellt. Die Anforderungen an das Fahrzeug sind in einer Anforderungsliste analog [VDI 2513] bzw. [VDI 2710] nach Festforderung, Zielforderung und Wunsch gegliedert. Sie können im Falle einer elektronischen Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien (s.u. für den Rollenförderer) zur Bedienung von Ausschlusslogiken im

³⁰⁴ Dank für die Ausarbeitung geht an meinen Stipendiaten Michael Schadler, 2013 und Alexander Ketter, 2014.

morphologischen Kasten herangezogen werden, um nicht den Anforderungen entsprechende Lösungsmöglichkeiten auszuschließen.

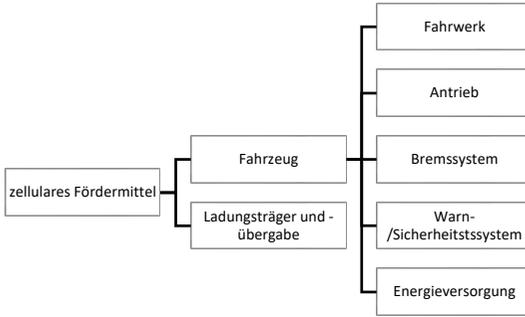


Bild 6.109: Baustruktur des Fahrzeuges

<u>Baugruppe</u>	<u>Ausprägungen</u>							
Fahrwerk	<u>Linienbeweglichkeit</u>				<u>Flächenbeweglichkeit</u>			
	Dreirad	Differentialantrieb mittig	Differentialantrieb vorne/hinten	Gegensinnig gekoppelter Lenkantrieb	Achschenkel lenkung	mehrere unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten	Differentialantrieb mit Drehachse	Mecanum Antrieb
Antrieb	<u>Verbrennungsmotor</u>				<u>Elektromotor</u>			
					Gleichstrom		Wechselstrom mit Umrichter	
	Bürsten		Bürstenlos		Asynchron		Synchron	
Bremsensystem	<u>Ausprägungen</u>							
	<u>mechanisch</u>				<u>elektrisch</u>		<u>hydraulisch</u>	
	Bandbremse	Trommelbremse	Scheibenbremse	Wirbelstrom	Motorbremse		Retarder	
Warn-/Sicherheitssystem	<u>Ausprägungen</u>							
	<u>berührende Systeme</u>				<u>berührungslose Systeme</u>			
	mechanische Schaltbügel		Schaumstoff-Bumper		Ultraschall-Sensoren			
Energieversorgung	<u>Ausprägungen</u>							
	<u>intern</u>				<u>extern</u>			
	Batterie		Kondensatoren	Brennstoffzelle	Generator Verbrennungsmotor		Stromschiene	Induktion
Blei	Nickel	Lithium						

Bild 6.110: Morphologischer Kasten Teil „Fahrzeug“ (zellulares Fördermittel)

Konstruktionskatalog und morphologischer Kasten des Fahrwerkes sind Teil einer Morphologie des Fahrzeuges für die Funktion Stoff leiten, Energie wandeln und Information verknüpfen, speichern, leiten (Ladungsträger bewegen). Er baut auf der in Bild 6.109 angegebenen Baustruktur des Fahrzeuges auf und ist in Bild 6.108 dargestellt.

Damit können nun rasch verschiedenste Grund-Baustrukturen des Fahrzeuges erstellt werden, die nachfolgend zu bewerten sind. Durch eine Hinterlegung von quantifizierten Merkmalen einzelner Varianten, wie beispielsweise Gewichte, Bauräume, Preise, ... , kann z.B. eine Nutzwertanalyse automatisiert anschließen.

Am Beispiel der Lösungsvariation des Vereinzeltungsvorganges eines 3D-Paketstromes wurden mehrere morphologische Kästen mit einer anschließenden automatisierten Nutzwertanalyse in EXCEL® verbunden. Zur Bewertung sind den Lösungsausprägungen quantifizierbare Eigenschaften hinterlegt, wie z.B. Gewicht, Preis, Bauraum, Der Vereinzeltungsprozess wurde aufgrund seiner Komplexität in drei Phasen aufgeteilt:

1. Zuförderung – Systemeingabe
2. Anordnung von Paketen in sequentieller Reihenfolge (Vereinzeltung)
3. Abförderung - Systemausgabe

	Einzelteil	Einzelteil des Pakets oder Einzelteil am anderen Paket	Einzelteilgruppe	Einzelteilgruppe	Abstand
mechanisch	Reibschluss	Stiftschlüssel	Aggregieren der Förderelemente und versch.	Separater Antrieb von Förderelementen	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
		Stiftschlüssel	Tagen von mehreren Förderelementen	Paarw. fähige Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Aggregierte Förderelemente mit Zwischenstufe
	Reibschluss	Reibschluss	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Aggregierte Förderelemente mit Zwischenstufe
	Reibschluss	Reibschluss	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Aggregierte Förderelemente mit Zwischenstufe
Formschluss	Mausl	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
	Formschluss	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
Schwerkraft	Reibschluss	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
	Schwerkraft	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
Fliehkraft	Reibschluss	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
	Fliehkraft	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
Pneumatisch	Reibschluss	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente
	Pneumatisch	Reibschluss für zylinderförmige Profile	Aggregieren der Förderelemente und versch. Förderelemente	Aggregierte Förderelemente mit unterschiedlichen Antriebsgeschwindigkeiten	Überwindliche Führungsaufbauten der Förderelemente

Phase	Lösung	Nutzwert	Sortier-	Anmerkung
			vorbereitung	
1	manuelle Entladung	66	nein	mögliche Vereinzeltung bei Systemeingabe
	automatisierte Entladung	176	nein	mögliche Vereinzeltung bei Systemeingabe
	einmalige Kippbewegung des Containers	220	nein	
	automatisierter Kippvorgang auf Abzugsband	193	nein	mögliche Vereinzeltung bei Systemeingabe
	direktes Aussetzen des Containers auf Förderband	203	nein	
2	manuelle Vereinzeltung	488	ja	mögliche Vereinzeltung 3D auf 1D bei Systemeingabe
	automatisierte Vereinzeltung	1266	ja	mögliche Vereinzeltung 3D auf 1D bei Systemeingabe
	automatisiertes Abheben und Absetzen auf paralleles Förderband	644	ja	Vereinzeltung von 3D auf 2D
	Abzugsband	682	nein	Vereinzeltung von 3D auf 2D (sinnvoll mit automatisierten Kippvorgang)
	Steigung in Kombination mit Förderbandabschnitten	710	nein	Vereinzeltung von 3D auf 2D
	Automatisierte Schranken	651	nein	Vereinzeltung von 3D auf 2D
	Zusammenführen paralleler Förderbänder	670	nein	Vereinzeltung von 2D auf 1D (nur sinnvoll bei gegebenem Abstand)
	StB/technik	601	ja	Vereinzeltung von 2D auf 1D
Siemens VisiCon	666	ja	Vereinzeltung von 2D auf 1D	
Linear Singulator Flow Controller	698	ja	Vereinzeltung von 2D auf 1D	
3	Bandförderer	480	nein	Sortieridentifikation während Vereinzeltung

Bild 6.111: Morphologischer Kasten (Phase 3: Abförderung) und Nutzwertanalyse der Vereinzeltung eines 3D-Paketstromes

Mit der automatisierten Verbindung der Nutzwertanalyse mit der Lösungsgenerierungsmöglichkeit durch morphologische Kästen kann in kurzer Zeit eine Variantenvielfalt erzeugt und ein wirtschaftlich/technisches Optimum gefunden werden.

Angetriebene Rollenbahn



Abbildung 1: Rollenbahn angetrieben (Tao07)

Allgemeines:

Diese Förderanlage dient ausschließlich dem Transport von formstabilen Gütern. Das Fördergut befindet sich auf Tragrollen, die zentral von einem Motor, zum Beispiel über Ketten oder Rollen, angetrieben werden. Die Tragrollenbahn sollte so gestaltet werden, dass das Fördergut ständig auf mindestens 3 Tragrollen aufliegt, um ein Rollen oder Strecken des Fördergutes zu verhindern. Grundsätzlich werden Rollendrehler für den waagrechten Transport verwendet. Werden jedoch die Tragrollen mit einem Gesamtgewicht versehen, um die Bohlung zum Fördergut zu erhöhen, können auch leichte Steigungen bis zu 15° überwinden werden.

Typische Daten:	Motorleistung	0,12 - 7,5 kW
	Fördergeschwindigkeit	typisch 0,2 - 0,9 m/s (0,1 - 2 m/s)
	Fördergut	Paletten, Behälter, Kartonsagen
	Förderlast	20-2000 kg/m

Berechnungsmethode:

Gebäudelegung:

- Eingangsparameter:
 - Fördergeometrie (Höhe, Länge)
 - Fördergeschwindigkeit v
 - Streckenlast Fördergut
 - Streckenlasten der Förderkomponenten (Tragrollenmassen)
 - Streckenlasten der Fördergrob

Die erforderliche Antriebsleistung wird aus Bohlung- und Steigungswiderstand mittels der Gesamtwiderstandsmethode laut folgender Formel berechnet:

$$P_A = \frac{[(m_{TG} + m_{TL}) \cdot g \cdot h + (m_{TL} + m_{TL} \cdot R)] \cdot g \cdot v}{\eta_A} \quad (6a11)$$

- m_{TL} : Gesamttragrollenlast $0,01 < \rho < 0,06$
- m_{TG} : Streckenlast Fördergut
- m_{TL} : Streckenlast der einzelnen Rollenmasse
- η_A : Wirkungsgrad der Antriebsleistung

Verwendung:

Diese Methode dient zur Berechnung der ungefähre benötigten Leistung, ohne genaue Daten über den Förderer zu kennen und zu berücksichtigen. Mit Hilfe der Bohlung kann die Größenordnung der Motorleistung eingeschätzt werden, sie ist aber noch zu vergrössern, um eine exakte Motorleistung vorzunehmen.

Richtwerte:

Legende:	Rolle	Rolle
Wälzlager	$d = 1000$	Wälzlager
Stange	$d = 1000 \cdot 0,1$	Stange
Keine für Rollen und Befestigung		
Wälzlager	$d = 1000$	Wälzlager
Wälzlager	$d = 1000$	Wälzlager
Wälzlager	$d = 1000$	Wälzlager

Abbildung 3: Richtwerte (Wai10)

Wirkungsgrade von Übertragungselementen:

Wälzlager	je nach der Übertragungselemente werden gibt viele unterschiedl.	0,95 - 0,98
Ketten	je nach der Übertragungselemente werden gibt viele unterschiedl.	0,90 - 0,95
Rollen	je nach der Übertragungselemente werden gibt viele unterschiedl.	0,90 - 0,95
Ketten	je nach der Übertragungselemente werden gibt viele unterschiedl.	0,90 - 0,95
Rollen	je nach der Übertragungselemente werden gibt viele unterschiedl.	0,90 - 0,95

Abbildung 4: Wirkungsgrade (Wai14)

Verwendung:

Sind bereits genauere konstruktive Daten bekannt, werden die Bohlungswiderstände entsprechend der Geometrie und der vorliegenden konstruktiven Ausführungen genauer berechnet. Über die angeführten Wirkungsgrade werden auch die Verluste durch die Antriebsleistung genauer berücksichtigt.

Festlegung:

Ausgehend von der Berechnung zur mittleren Anlegung werden neben Steigungs- und Bohlungswiderständen auch Bohlungswiderstände berücksichtigt:

$$P_A = \frac{[(m_{TG} + m_{TL}) \cdot (g \cdot (h_{TG} + \frac{1}{2} \cdot d \cdot f) + c) + L_A + (m_{TL} + R)] \cdot g \cdot v + F_{TL} \cdot v}{\eta_A} \quad (6a11) \quad (Wai14)$$

Ein möglicher zusätzlicher Widerstand kann zum Beispiel durch den Geschwindigkeitsunterschied zwischen Fördergut und Tragrollen bei der Umkehrhöhe (F_{TL}), durch seitliches Ausweichen des Transportgutes oder durch das Aufsteuern der Transportgüter (F_{TL}) entstehen.

- R : Massenträgheit Fördergut
- η_A : Zylinderwirkungsgrad des Fördergutes
- m : Masse gesamt Transport
- ρ : Rollwiderstand beim Rollen

Mittlere Anlegung

- Eingangsparameter:
 - Fördergeometrie (Höhe, Länge)
 - Fördergeschwindigkeit v
 - Streckenlast Fördergut
 - Tragrollendurchmesser d
 - Streckenlasten der Förderkomponenten (Tragrollenmassen)
 - Tragrollenabstandtragrollendurchmesser d

Die erforderliche Antriebsleistung wird aus dem Fahrwiderstand und dem Steigungswiderstand berechnet:

$$P_A = \frac{[(m_{TG} + m_{TL}) \cdot (g \cdot (h_{TG} + \frac{1}{2} \cdot d \cdot f) + c) + L_A + (m_{TL} + R)] \cdot g \cdot v}{\eta_A} \quad (6a11) \quad (Wai14)$$

- m_{TL} : Streckenlast Fördergut
- m_{TG} : Streckenlast der einzelnen Rollenmasse
- η_A : Wirkungsgrad der Antriebsleistung
- f : Widerstand der Rollenbahn
- c : Lagerwiderstand
- ρ : Zylinder für Rollenbahn und Rollenwiderstand

Wenden die Tragrollen von einem Zentralantrieb über Ketten oder Rollen wie im Bild angetrieben, kann dieser Wirkungsgrad durch folgende Formel berechnet werden:

$$\eta_A = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (6a12) \quad (Wai14)$$

η_1 : Einzelwirkungsgrad je Umkehrung
 η_2 : Anzahl vollständiger Umkehrungen der Tragrollen

Abbildung 2: Tragrollenbahn (Wai14)

System	Wirkungsgrade in %
Federrollen	90-95
Kettenrollen	82-84
Zahnrollen	90-95
Kette	97-98

Abbildung 1: Wirkungsgrade (Wai14)

Verwendung:

Sind neben den konstruktiven Daten auch die Material- und Abfahse sowie eventuelle weitere auftretende Bohlungswiderstände bekannt, werden diese in der Berechnung berücksichtigt, um noch exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Quellen:

- For14: Forth Movement Systems, Prospekt www.forth-movement.com/2014
- He09: Hoffman, Klaus; Erenn, Erhard; Steiner, Gerhard: *Fördertechnik Band 2: Maschinenbau, Fördermittel, Transportstrukturen*, Logos 6. Auflage 2009
- He14: Internet: Mobility Engineering (Chester) Ltd, <http://www.mobility-engineering.co.uk/>
- Ne05: Norman, Gustav; Winter, Hans: *Maschinenbau Band 2. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer Verlag, 1995*
- Rn01: Rönisch, Peter: *Materialtransport- Auswah und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik*, 10. Aufl., Vieweg+Tribner, 2011
- Se01: SEW Eurodrive: *Preis der Antriebstechnik*, 2001
- Tao07: Tao, Hsing-Ming; Schmidt, Thomas; Nagel, Lutz: *Materialflusssysteme - Förder- und Lageretechnik*, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2007
- Wai14: Walther Pflender: <http://www.walther-pflender.com/de> Technische Daten und Informationen 2014

Existierende Normen:

VDI 4440-3 Übersichtskläster Stiegeflösser für Stützpunkt Rollen- und Kugelbahnen

Bild 6.112: Strukturierte Informationssammlung für eine Rollenbahn als Datenbasis für die elektronischen Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien

Wenn die Zusammenhänge einzelner Merkmale bzw. Wirkprinzipien nicht nur verbal, sondern auch durch Gleichungen beschrieben sind, genügt die papiergebundene Form nicht mehr und es ist der Einsatz der **elektronischen**

Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien nötig. Dadurch entsteht durch Hinterlegung von Ausschlussmerkmalen die Möglichkeit, beim Fortschreiten durch die Morphologie nicht mögliche Kombinationen auszuschließen. Durch Übergabe von technischen Merkmalen von einer Variante der Morphologie zur nächsten, können unterschiedliche Lösungsvarianten miteinander verbunden werden. Eine Schnittstelle zu wissensbasierten CAD-Systemen ist möglich, die die technischen Merkmale für die Modellierung benutzt. Basis für die Erstellung des Wissenscontainers „Morphologischer Kasten“ bzw. „Konstruktionskatalog“ (elektronisch oder papiergebunden) bildet eine strukturierte Informationssammlung mit Quellenverweisen (z.B: wie in Bild 6.112).

Prototypisch ist eine elektronische Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien in Access® realisiert, die den Grundaufbau von Stückgut-Stetigförderern und deren Antriebskonzepte konfigurierbar macht. Die strukturierte Informationssammlung hat im Falle des betrachteten Rollenförderers das Aussehen nach Bild 6.112. Sie ist der Daten- und Informationsspeicherort des systematisierten Objekts „Rollenbahn“ (siehe auch Bild 2.19).

Die Konfiguration eines Rollenförderers, mit hinterlegten Ausschlussprinzipien für nicht mögliche Varianten, ist mehrstufig angelegt. Bei der unterstützten Auswahl des Förderprinzips (Bild 6.113) werden die Grundparameter des Förderers, wie Details zum bewegten Gut und der Gutstrom, die Geometrie des Förderersegments und ergänzende nicht quantifizierbare Informationen, abgefragt. Sie stehen für weitere Variationsmöglichkeiten anderer Lösungskombinationen ebenso zur Verfügung wie für die anschließende Detaildimensionierung bspw. des Antriebs (Bild 6.114).

Bild 6.113: Konfiguration des Rollenförderers: Auswahl Förderprinzip und Festlegung Grundparameter (Materialfluss, Geometrie) [PER14]

Nach der Detaildimensionierung kann ein automatisierter, zusammenfassender Bericht der Konstruktionsvariante erstellt werden (Bild 6.115). Anhand dessen sind die Lösungsvarianten mit ihren zugeordneten Detailinformationen aus der Berechnung direkt vergleichbar. Eine Verbindung zu einem

Bewertungsinstrument ist nicht vorhanden aber analog den Ausführungen oben erstellbar.

Bitte wählen Sie die gewünschte Kraftübertragung für Ihren Rollenförderer aus 1

1	Getriebemotor
2	Trommelmotor

Abbrechen Weiter

Speichern

Auswahl: Kraftübertragung zwischen Motor und Fördermittel 2

1	Rundriemen
2	Poly-V-Riemen
3	Flachriemen
4	Zahnriemen
5	Kettentrieb

Abbrechen Weiter

Speichern

Kraftübertragung zwischen den Rollen 3

1	Rundriemen
2	Poly-V-Riemen
3	Flachriemen
4	Zahnriemen
5	Kettentrieb

Info Kraftübertragung zwischen den Rollen

Abbrechen Weiter

Speichern

Bitte wählen Sie die Art des Kettentriebes aus 4

1	Tangentialkette
2	Kettenübertrieb

Info_Kettentrieb

Zurück Weiter

Speichern

Rollenförderer

Getriebemotor

Zahnriemen

Kettentrieb
Kettenübertrieb

Kriterien zur Motorenauswahl

Erforderliche Motorleistung berechnen

Bild 6.114: Konfiguration des Rollenförderers: Detaildimensionierungsprozess Antrieb und abschließende Zusammenstellung mit Verlinkung zu Detailinformationen

Versionsvergleich				
Segmentname	SegmentID	Versionbezeichnung	Foerdertechnologie	
Segment Beförderung von Paketen				
	1B2	Version1	Beförderung von Paketen	
Foerderguteigenschaft	Krafteinleitung	Kontinuitaetseigenschaft	Foerderrfamilie	Foerderrbezeichnung
Stueckgut	mit Zugmittel	stetig	Bandfoerdereer	Gurtfoerdereer
	Aufgrund gleichbleibenden Niveaus realistische einsetzbar, kann auch als Tragmittel verwendet werden	Da es sich um ein geometrisch bestimmtes Foerdergut handelt.	Trag- und Zugfunktion, geringe Geräuschentwicklung, in Gurtkurven können Güter	ruhiger und geräuscharmer Lauf, Vielzahl von Zusatzeinrichtungen anbaubar, hervorragend für
Parameterbezeichnung	Stueckstrom [Stk/s]	Foerderrgeschwindigkeit [m/s]	Antriebsleistung [W]	
Paketparameter1	3,00	3,00	2.080,10	
Segment Beförderung von Paketen				
	1B3	Version2	Beförderung von Paketen	
Foerderguteigenschaft	Krafteinleitung	Kontinuitaetseigenschaft	Foerderrfamilie	Foerderrbezeichnung
Stueckgut	mit Zugmittel	stetig	Bandfoerdereer	Stahlbandfoerdereer
	Aufgrund gleichbleibenden Niveaus realistische einsetzbar, kann auch als Tragmittel verwendet werden	Da es sich um ein geometrisch bestimmtes Foerdergut handelt.	Trag- und Zugfunktion, geringe Geräuschentwicklung, in Gurtkurven können Güter	breiter Arbeitstemperaturbereich und besondere hygienische Vorteile werden aufgrund
Parameterbezeichnung	Stueckstrom [Stk/s]	Foerderrgeschwindigkeit [m/s]	Antriebsleistung [W]	
Paketparameter1	3,00	3,00	2.080,10	

Bild 6.115: Berichtsgenerierung von Lösungsvarianten eines Bandförderers [PER14]

6.11.4 Design for X (DFX)

In den bisher gezeigten Ansätzen zur methodischen Produktentwicklung steht in erster Linie die Funktion des Produktes im Vordergrund, wesentlich kommt dazu ergänzend die Fertigung und die Kostenbetrachtung. Design for X bzw. Design to X subsumiert eine Reihe weiterer Gestaltungsrichtlinien die von unterschiedlichen Quellen unterschiedlich gesehen werden. Ziel der kurzen Ausführungen hier ist lediglich ein Präsenthalten der Multidisziplinarität der Produktentwicklung und kein fachlich tiefer Einblick, dazu sei auf einige Quellen verwiesen [RS12], [EM13], [21]. Das X kann im DFX stellvertretend stehen für (nach [EM13] – fett nach [RS12], kursiv nur dort):

- Ausdehnungsgerecht
- **Beanspruchungsgerecht**
- **Ergonomiegerecht**
- **Fertigungsgerecht**
- Festigkeitsgerecht
- **Funktionsgerecht**
- Formgebungsgerecht
- Instandhaltungsgerecht
- Korrosionsgerecht
- Kostengerecht
- Kriech- und relaxationsgerecht
- Lärmarm
- Leichtbau
- **Montagegerecht**
- **Normgerecht**
- **Recyclinggerecht**
- Risikogerecht
- Servicegerecht
- Sicherheitsgerecht und zuverlässig
- **Transportgerecht**
- Tribologiegerecht
- Umweltgerecht
- Verbindungsgerecht
- Verschleißgerecht
- **Werkstoffgerecht**

Die Berücksichtigung all dieser multidisziplinären Gesichtspunkte bedarf sowohl Vorgehensmodellen als auch unterstützenden IT-Werkzeugen sowie eines interdisziplinären Produktentwicklungsteams, das dem Gedanken des concurrent engineering als Prozessmodell folgt. Als Vorgehenszyklus empfiehlt [EM13] die parallele Betrachtung des allgemein funktionalen Entwicklungsprozesses (Modelle aus Kap. 6.11.1) mit den Anforderungsschritten des „X“ nach folgenden Phasen; darin ist nach den Anforderungen der verschiedenen Konstruktionsarten zu differenzieren, wodurch ggf. Schritte entfallen (Neu- Anpassungs- u. Variantenkonstruktion):

- Kreative Klärung
- Lösungsgenerierung
- Detaillierte Bearbeitung
- Lösungsauswahl und multikriterielle Bewertung

Für jeden der obigen Schritte ist eine parallele Synopse der Herausforderungen der für das jeweilige Produkt relevanten Bereiche des X durchzuführen. Dazu unterstützen Konstruktionsassistenzsysteme. Basis dafür sind ein integriertes Produktmodell mit einem leistungsfähigen Produktdatenmodell (ggf. mit PDM). Unterstützung ist durch wissenschaftliche Systeme möglich [RS12]. Beispiele für IT-Werkzeuge für fertigungsgerechtes und montagegerechtes Konstruieren, Entwickeln und Analysieren sind ebenfalls [RS12] zu entnehmen.

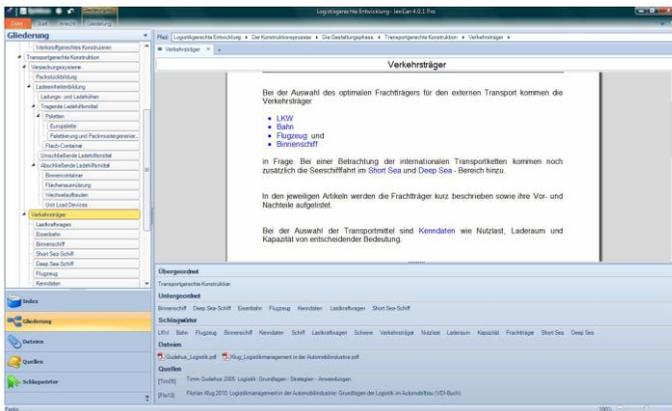


Bild 6.116: Wiki-System (realisiert in lexiCan®) zur Erfassung und Darstellung x-gerechter Produktmerkmale und –ansprüche mit Schwerpunkt auf Transport, Montage und Recycling

Am Institut für Technische Logistik der TU Graz ³⁰⁵ist ein Wiki-System zur Erfassung von Merkmalen und Eigenschaften x-gerecht entwickelter Produkte im Aufbau. Dazu sind die Bereiche montagegerecht, transportgerecht und recyclinggerecht bereits rudimentär erfasst. Ziel ist ein Multi-User Wiki-System, das als Sammelstelle für Aspekte der x-gerechten Konstruktion dient.

³⁰⁵ Für die Erarbeitung der Inhalte dazu geht Dank an meinen Bacheloranden Gerhard Tatzter.

Tabelle 33: Freiheitsgrade der Produktentwicklung zur Beeinflussung der Logistik und Methoden dazu in unterschiedlichen Phasen des PEP, nach [PSS05]

PE-Phase	Aktivität	Beeinflussung der Logistik	Methoden
Konzeption, Aufgabenerklärung	Identifikation d. Anforderungsliste	Kein nennenswerter Einfluss	- Umsetzung der Merksätze zur Reduktion von Logistikkosten, Auftragsabwicklungskosten und Beständen
	Festlegung d. Wirkmechanismen	Variantenvielfalt -> Steuerungsaufwand, Kapitalbindung Materialflusskosten Auftragsabwicklungskosten Kapitalbindungskosten	
	Festlegung der Konfigurationselemente	Abmaße, Gewicht -> Handhabbarkeit Volumen Materialflusskosten	
Entwurf	Materialbestimmung d. Konfigurationselemente	Gewicht -> Handhabbarkeit Materialflusskosten	- Reduktion der Sperrigkeit für Stapelbarkeit
	Formgebung, Oberflächen d. Konfigurationselemente	Form, Oberflächenempfindlichkeit -> Stapelbarkeit Volumen Materialflusskosten	- kompaktes Design für Wegfall komplexer Ladehilfsmittel
	Dimensionierung der Konfigurationselemente	Abmaße, Gewicht -> Handhabbarkeit Volumen -> Materialflusskosten Verwendung von Standardgrößen -> Materialflusskosten Auftragsabwicklungskosten Kapitalbindungskosten	- Beachtung von Standardgrößen zur Reduktion von Vorhaltung - Gewichtsreduktion für einfachere Handhabung u. weniger Hilfsmittel
	Schnittstellenbestimmung zw. Konfigurationselementen	Kein nennenswerter Einfluss	- Vermeidung empfindlicher Bauteile für eher autom. Verpackung - Vermeidung spezieller Transportlagen für einfachere Verpacken u. Bewegen (Packdichte)
Ausarbeitung u. Prozessentwicklung	Feindimensionierung d. Konfigurationselemente	Abmaße, Gewicht -> Handhabbarkeit Volumen -> Materialflusskosten Verwendung von Standardgrößen -> Materialflusskosten Auftragsabwicklungskosten Kapitalbindungskosten	- Realisierung eigenstabiler Güter zur Vermeidung Transportvorrichtungen
	Gestaltung u. Ausarbeitung der Hilfsmittel	Abmaße, Gewicht -> Handhabbarkeit Volumen Verwendung von Standardgrößen -> Materialflusskosten Auftragsabwicklungskosten Kapitalbindungskosten	-transport u. handhabungsgerechte Produkte zur Vermeidung von Sonderhilfsmitteln
	Festlegung d. Herstellverfahren / Beschaffung d. Zukaufteile	Bevorratungseben, Make or Buy -> Steuerungsaufwand, Kapitalbindung Auftragsabwicklungskosten Kapitalbindungskosten Durchlaufzeit	- bearbeitungsgerechter Entwurf zur Minimierung Transportvorgänge
	Festlegung d. Produktions- u. Beschaffungsstrategien	Flächen -> Kapitalbindung Zuverlässigkeit u. Distanz zu d. Lieferanten Durchlaufzeiten	

Der Schwerpunkt ist darin auf die logistikkonforme Konstruktion (s.u.) gelegt, die v.a. die Bereiche Transport und Montage, aber auch Recycling umfasst. Bild

6.116 zeigt einen Screenshot der Informationssammlung „transportgerecht“ mit der allgemeinen Einstufung von Verkehrsträgern (Details in den Unterkategorien nicht sichtbar). Das Wiki-System ist als ausbaubare Wissenssammlung konzipiert, die Methoden und Erfahrungswissen zum Themenkreis x-gerechtes Konstruieren sammelbar machen soll. Die umfangreichen Arbeitsmöglichkeiten mit der Software-Umgebung lexiCan®, in der das Wiki realisiert ist, erlauben umfangreiche Such- und Analysevorgänge mit Quervernetzung der gespeicherten Informationen.

Das logistikgerecht entwickelte Produkt bzw. dessen Entwicklung und Konstruktion ist gegenwärtig Gegenstand von Forschungsarbeiten.

[SCH11] vollzieht eine Bewertung auf Logistikgerechtigkeit zu Meilensteinen des PEP durch aggregierte, objektive, nachvollziehbare Kennzahlen mit einem Aufzeigen der Defizite und des Verbesserungspotenzials mit einem Methodenkatalog.

[PSS05] definiert Freiheitsgrade der PE zur Beeinflussung der Logistik und Lösungsansätze/Methoden mit Phasenzuordnung.

Mit zwei Merksätzen subsumiert [PSS05] Maßnahmen zur Verbesserung der Disposition:

1. Gestalte das Produkt so, dass der Bestimmungspunkt für das Enderzeugnis spätmöglichst definiert wird.
2. Gestalte das Produkt so, dass viele Teile und Baugruppen wenige Varianten und wenige Teile und Baugruppen viele Varianten haben.

Tabelle 33 gibt einen zusammenschauenden Überblick von PE-Aktivitäten auf die Logistik mit den zugehörigen Methoden.

6.12 Wissen und dessen Handhabung³⁰⁶

6.12.1 Wissen

Wenn man von Erfolgskonzepten moderner Unternehmen spricht, so fallen meist Begriffe wie Erfindung, Innovation oder aber auch Bilanz und Cash-Flow. Selten denkt man zuerst an die Basis jeder erfolgreichen Firma: das Personal. Gerade dieses ist aber wohl eines der wertvollsten Güter, die ein Unternehmen besitzen kann, speziell wenn es sich dabei um Fachkräfte handelt. Neue Produktinnovationen basieren schließlich auf dem Wissen, der Erfahrung und nicht zuletzt auf der Kreativität jedes einzelnen Mitarbeiters – siehe auch Bild 6.117.

In den Wirtschaftswissenschaften – im Speziellen in der Volkswirtschaftslehre – existiert seit den 1950er Jahren sogar ein eigener Ausdruck: Human Capital. Der Begriff entstand im Zusammenhang mit der Humankapitaltheorie, die durch die beiden Nobelpreisträger Gary Stanley Becker (1964) und Theodore William Schultz (1978) begründet wurde. [WIK11a] Humankapital bezeichnet im Wesentlichen die angesprochenen „personengebundenen Wissensbestandteile in den Köpfen der Mitarbeiter“. Die volkswirtschaftliche Humankapitaltheorie war außerdem der Ausgangspunkt für das Human Resource Accounting (respektive Humanvermögensrechnung) in der Betriebswirtschaftslehre, die eine Übertragung des persönlichen Gedankenguts auf den betrieblichen Bereich vorsieht. [WIK11a] Zusammen mit der Ressourcentheorie – einer Theorie „zur alternativen Erklärung von Wettbewerbsvorteilen von Unternehmen, in denen der Begriff Ressource in den Mittelpunkt gestellt wird“ [WIK11b] – kann man aus unternehmerischer Sicht von Wissen als Rohstoff sprechen.

Schließlich ist es weiters auch kaum verwunderlich, dass der Austritt einer Fachkraft einen harten Verlust für das Unternehmen bedeuten kann, da mit ihr schließlich auch das Wissen, im schlimmsten Fall zur Konkurrenz, abwandert. Aber nicht nur der Wissenserhalt von „abwanderndem Wissen“ ist für ein Unternehmen von Bedeutung. Ebenso gefragt ist es, das generell existierende Humankapital zu bündeln und – was noch viel wichtiger ist – für alle Mitarbeiter wieder verfügbar zu machen. Dies wird auch als Wissensmanagement (bzw. Knowledge Management) bezeichnet.

Ein gutes innerbetriebliches Knowledge Management ermöglicht es dem Unternehmen, Wissen in kurzer Zeit zur Verfügung zu stellen, was sich unmittelbar auf neue Produktentwicklungsprozesse auswirkt. Darüber hinaus können neue Marketingstrategien entwickelt werden, sodass der Unternehmenserfolg als „Markteintrittspionier“ sichergestellt werden kann.

³⁰⁶ Dank für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meine Studierenden Sarah Dober und Michael Schadler im Rahmen ihres Bachelorprojektes 2012 (nicht publiziert)!

„Der Begriff Wissen entstammt dem althochdeutschen Wort „Wischan“, was so viel wie „gesehen haben“ bedeutet und als Inbegriff von meist rational begründeter Erkenntnis gilt, im Unterschied zu Glauben, Vermutung oder Meinung.“ [BM11]



Bild 6.117: Wissen als Grundlage für die Erzielung von Wettbewerbsvorteilen, nach [BAU07]

Diese Definition mag beim ersten Betrachten als logisch empfunden werden. Genauer betrachtet lässt sie aber sehr viel Spielraum, da der Begriff Wissen im Sprachgebrauch oft auf den Kontext oder, im Bereich der Wissenschaften, auf die entsprechende Disziplin bezogen ist.

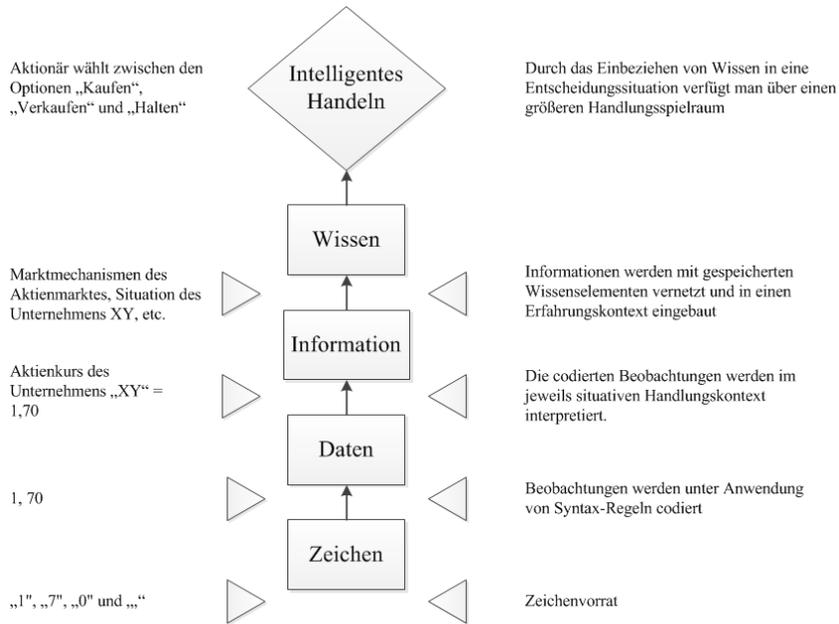


Bild 6.118: Begriffshierarchie: Zeichen–Daten–Information–Wissen. Nach [HAR02] in Anlehnung an [KR14]

Problematisch am umgangssprachlichen Gebrauch des Wortes „Wissen“ ist vor allem, dass oft nicht zwischen den drei Begriffen Daten, Informationen und dem eigentlichen Wissen unterschieden wird. Da die heutige Nutzung von Informations- und Kommunikationstechniken als „Datenverarbeitung“, „Informationsverarbeitung“ und oft auch als „Wissensverarbeitung“ bezeichnet wird, wird nahegelegt, Daten, Informationen und Wissen seien das gleiche [KRC05].

Daten

Betrachtet man Bild 6.118, so sieht man, dass Zeichen die kleinste Einheit von Daten darstellen. Unter einem Zeichen versteht man auch das „kleinste bei einer Programmausführung zugreifbare Datenelement“ [HGN92]. Daten selbst können nach DIN 44300 Nr.19 (1972) – inzwischen abgelöst durch DIN ISO/IEC 2382 [ISO 2382-1] – sowohl aus mehreren einzelnen Zeichen, als auch aus einer ganzen Folge von Zeichen bestehen, die in einem sinnvollen, bekannten oder unterstelltem, Zusammenhang stehen. Sie umfassen alle in gedruckter, gespeicherter, visueller, akustischer oder sonstiger Form verwertbaren Angaben über die verschiedensten Dinge und Sachverhalte und sind damit die Grundbausteine sowohl für die zukünftige Informationsgesellschaft als auch für wissensbasierte Systeme.

Information

Mit Daten alleine kann nicht viel angefangen werden, erst durch das Zutun eines Menschen können sie zu Informationen werden. Durch die individuelle Bearbeitung und Interpretation in einem bestimmten Kontext bekommen diese eine höhere Bedeutung und stellen eine logische in sich abgeschlossene Einheit dar. Da Informationen, im Gegensatz zu den Daten, immer nur subjektiv wahrnehmbar bzw. nur subjektiv verwertbar sind, sind Informationen auch stets empfängerorientiert [GÜL03].

Wissen

Eine anschauliche und sinnvolle Definition für Wissen, wie es hier auch weiterverwendet werden soll, findet man in [MIL08]:

- Wissen ist eine reichhaltige und wohldurchdacht-strukturierte Sammlung an Informationen
- Wissen ist jene Eigenschaft, derer es bedarf, wie ein Experte denken zu können
- Wissen ist, was einen Experten von einem Laien unterscheidet
- Wissen ist notwendig, um komplexe Aufgaben zu lösen

Wissen ist die $\left(\begin{array}{c} \text{Fähigkeit} \\ \text{Qualifikation} \\ \text{Kompetenz} \end{array} \right)$ $\left(\begin{array}{c} \text{Daten} \\ \text{Informationen} \\ \text{Ideen} \end{array} \right)$ zu $\left(\begin{array}{c} \text{manipulieren} \\ \text{transformieren} \\ \text{erschaffen} \end{array} \right)$ um $\left(\begin{array}{c} \text{geschickt zu arbeiten.} \\ \text{Entscheidungen zu treffen.} \\ \text{Probleme zu lösen.} \end{array} \right)$

Wissen ist somit überprüfbar, fest gegliedert und lässt sich Kategorien zuordnen [GRU02]. Es stützt sich auf Daten und Informationen und ist im Gegensatz zu diesen immer an Personen gebunden [RR03], dabei weist es die Merkmale nach Bild 6.119 auf.



Bild 6.119: Grundlegende Merkmale des Wissens, nach [BAU07]

6.12.2 Wissensmanagement und Werkzeuge der Wissensrepräsentation

Unter Wissensmanagement/**Knowledge Management** (KM) versteht man ganz allgemein den Prozess und die dazugehörigen strategischen und operativen Tätigkeiten, um vorhandenes Wissen zu verwalten. Dem Wissensmanagement liegt eine Knowledge Base, s. u., zu Grunde. Die Funktion des „Managen“ bemüht sich darum, diese Wissensbasis gezielt zu beeinflussen um das darin enthaltene Wissen zu organisieren und zu strukturieren.

Der in der Literatur oft zitierte Ansatz von Probst/Raub/Romhardt versteht unter Knowledge Management „ein integriertes Interventionskonzept, das sich mit den Möglichkeiten zur Gestaltung der organisationalen Wissensbasis befasst“ [RR03]. Der Ansatz legt dem Wissensmanagement mehrere Kernprozesse zu Grunde, die häufige Problemstellungen in Unternehmen aufgreifen.

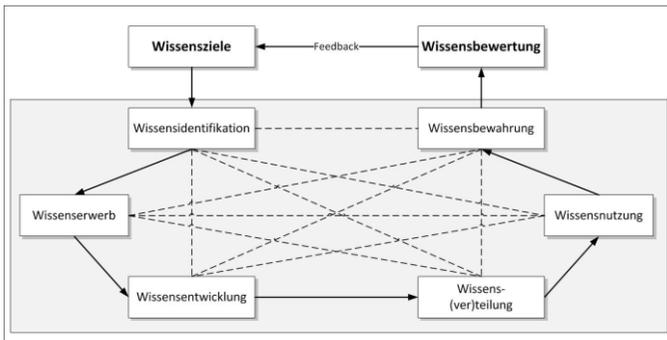


Bild 6.120: Kernprozesse und Bausteine des Wissensmanagement [MIL08]

Betrachtet man Bild 6.120 wird klar, dass es eines Systems bedarf, das die Möglichkeit bietet, geschaffenes Wissen zu speichern und darüber hinaus zu verteilen um es nachhaltig verfügbar zu machen. Üblicherweise bedient man sich hier unterschiedlicher Datenbanken, die verschiedene Informationen über ein gewisses Wissensgebiet zusammenführen.

Die **Knowledge Base** ist jener Ort, an dem sämtliches Wissen, wo auch immer es im Unternehmen vorhanden ist, vereint wird. Um die gespeicherte Information auch noch übersichtlich verwalten zu können und um sie ebenso wieder zugänglich zu machen, bedarf es einer Strukturierung. [RR03] schlägt vier Grundsäulen vor, wie diese Struktur prinzipiell aussieht:

- **Begriffe:** Konkrete Dinge eines Fachgebietes, wie z.B. Personen, Dokumente, Organisationseinheiten, Aufgaben, Ideen, etc.
- **Attribute:** Generelle Eigenschaften der Begriffe
- **Werte:** Eigenschaften des einzelnen Begriffs, die es von anderen unterscheiden
- **Beziehungen:** Angaben, wie einzelne Begriffe miteinander zusammenhängen



Bild 6.121: Unterschiedliche Möglichkeiten, wo Wissen gespeichert sein kann [ALC14]

Knowledge Engineering beschäftigt sich mit dem Bau von Informatiksystemen, die das Wissen von Knowledge Bases wiedergeben. Die Wissensmodellierung wird stark vom Arbeits- und Forschungsbereich der Künstlichen Intelligenz beeinflusst, da Knowledge Engineering – je nach Art des Systems – den Anspruch erhebt, menschliche Problemlösungswege nachzubilden. Die daraus resultierende Software wird unter dem Titel **Knowledge Technologies** zusammengefasst (siehe auch Abschnitt 6.13).

Knowledge Technologies bilden das Wissensmodell der Wissensdatenbank entsprechend ab, sodass es für den User verständlich, übersichtlich und produktiv nutzbar ist. Dieser Prozess wird naheliegenderweise Knowledge Representation genannt.

Knowledge Based Systems (KBS) stellen eine spezifische Klasse von wissensbasierter Software dar. Ein wissensbasiertes System – im technischen Umfeld spricht man auch vom **Expertensystem (XPS)**– bezeichnet ein Programm, das „... Expertenwissen über ein spezielles Fachgebiet speichert, aus dem Wissen Schlussfolgerungen zieht und zu konkreten Problemen des Gebiets Lösungen anbietet, d.h. Aufgaben übernehmen kann, die bisher von Experten gelöst werden mussten.

Expertensysteme können große Mengen auch diffusen, vagen und unformalisierten Wissens in problembezogener Weise darstellen, aus diesem auf logischem und/oder heuristischem Weg neues Wissen gewinnen sowie Anfragen zu präzisen und vollständigen Problemstellungen umformulieren und im Dialog mit dem Benutzer Lösungen finden und den Lösungsweg erläutern. Hierbei ist wesentlich, dass die Verlässlichkeit der Lösung überprüfbar ist“ [BRO03]. Bild 6.122 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Knowledge-based Systems.

Wenn man sich mit Wissensmanagement im Ingenieurwesen im Allgemeinen beschäftigt stößt man auf die VDI-Richtlinie 5610, die das Management von Wissen in unterschiedlichsten Bereichen der Ingenieurstätigkeit beschreibt und jenen eine Hilfestellung bietet, die den Auftrag haben, Wissensmanagement im Ingenieurbereich einzuführen, umzusetzen und zu etablieren. Die Richtlinie beschränkt sich auf die Informationen, die für die erfolgreiche Umsetzung von Wissensmanagement relevant sind. Folgende zentrale Fragestellungen werden in der Richtlinie behandelt: Welche typischen Herausforderungen sind beim Wissensmanagement zu lösen? Was ist hierbei die beste Vorgehensweise in der Praxis? Worauf ist in Wissensmanagement-Projekten zu achten? Welche Fragen müssen im Vorfeld eines Projektes erörtert werden? [VDI 5610-1]

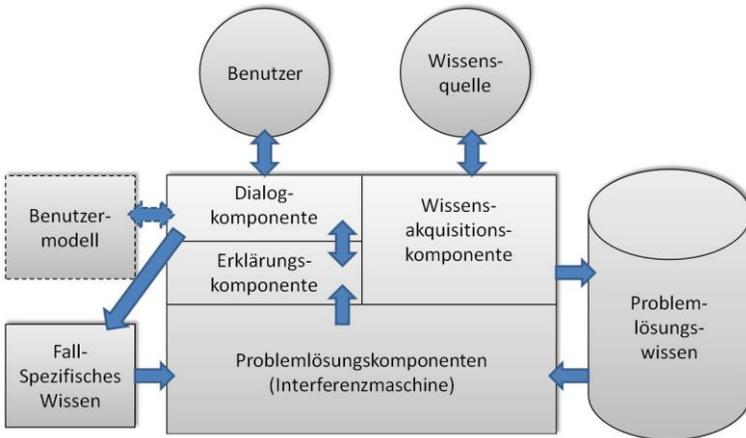


Bild 6.122: Allgemeine Architektur eines XPS-Systems [BOD05]

Weitere Detailbereiche dazu sind in Ausarbeitung [VDI 5610-1], auch mit Bezug zur Entwicklung und Konstruktion. Dazu findet man allerdings in der VDI-Richtlinie 2209 unter „Aspekte der Wissensverarbeitung“ schon einiges an Beispielen für die Wissensunterstützung in der 3-D-Modellierung.

„Durch die 3-D-Produktmodellierung findet eine zunehmende Verlagerung von Aktivitäten aus den der Entwicklung nachgelagerten Bereichen auf den frühestmöglichen Zeitpunkt in der Produktentwicklung statt. Diese Tendenz verstärkt sich derzeit durch das zunehmende rechnerunterstützte Bereitstellen und Verwenden von anwendungsbezogen miteinander verknüpften Daten, Informationen und (Auslegungs- sowie Handhabungs-)Regeln, die in ihrer Gesamtheit auch als „Wissen“ bezeichnet werden.

Insbesondere durch das relativ leicht verfügbare (Produkt- und Prozess-) Wissen aus abgeschlossenen Produktentwicklungen kann die Informationsgrundlage für aktuelle Entscheidungen beim 3-D-Modellieren verbessert werden. Zusätzlich lassen sich diese Entscheidungen durch den Einsatz von leistungsfähigen Simulations- und Animationssystemen wesentlich schneller als bisher überprüfen. Insgesamt betrachtet steht aber die Wissensunterstützung für die Produktentwicklung noch am Anfang [SCH64].

Beispiele für bereits existierende bzw. in Kürze verfügbare Formen der Wissensunterstützung in der 3-DModellierung sind:

- wissensbasierte Parametrik, bei der im Unterschied zur „reinen“ Parametrik, wo überwiegend Maßparameter die treibende Kraft für die Geometrie sind, das Wissen in Form von Konstruktions- und Konfigurationsregeln die Geometrie bestimmt; Konstruktionsregeln beinhalten dabei sowohl geometrische und nicht geometrische Regeln als auch Prüfregeln
- erweiterte Features, die nicht nur die Geometrie eines Produkts, sondern durch hinterlegtes Produktwissen auch dessen Funktion und weitere Eigenschaften modellieren können oder zur Lösung von Auslegungsproblemen eingesetzt werden (beispielsweise für die bestmögliche Art der Verbindung zweier Bauteile oder die geeignete Auslegung von Spritzgusswerkzeugen)
- wissensbasierte Produktkonfigurierer, die neben den einzelnen kombinierbaren Komponenten auch die zur Kombination notwendigen Regeln enthalten und die auf dieser Basis ein Produkt widerspruchsfrei konfigurieren können
- wissensbasierte Projektmanagementsysteme, die bei gegebenem Aufgabenspektrum Vorschläge zur Optimierung und Parallelisierung der Arbeitsschritte unterbreiten, je nach Projektfortschritt Werkzeuge und Datenbestände kontextsensitiv aktivieren, die für einen Arbeitsschritt benötigte Wissen bereitstellen sowie dynamisch auf Störungen reagieren können, um so die bestmögliche Bearbeitungsreihenfolge zu forcieren]
- externe Wissensquellen ...
- „intelligente“ Komponentenkataloge aus dem Internet, die nicht nur die Auswahl eines Produkts anhand von Problembeschreibungen ermöglichen, sondern auch seine Geometrie in das CAD-System des Anwenders laden sowie die Angebots und Auftragsbearbeitung weitgehend unterstützen können.

Die im Folgenden aufgezeigten Werkzeuge dienen aus heutiger Sicht der Unterstützung der Erfassung und Entwicklung von Wissen im konstruktiven Umfeld. Ganz unterschiedlich stellen sich die Anforderungen an Wissenserfassung und –wiederverwendung je nach Konstruktionsart (Neu-, Anpassungs- oder Variantenkonstruktion) wozu nicht jedes der gelisteten Werkzeuge der Wissensrepräsentation gleichermaßen geeignet ist. Hier versucht die xKBE-app (alle Konstruktionsarten) und die im Kapitel 6.11.1 vorgestellten Ansätze Variantenanalyse (Varianten- und Wiederholkonstruktion) und AxiomaticDesign (Neukonstruktion) einzuhaken und Wissen aufgabenspezifisch bereitzustellen bzw. die Methodik dafür anzubieten.

Ziel dieser Ansätze ist es dabei nicht, in den Bereich des Komplexitätsmanagements im Rahmen des Systems Engineering vorzudringen

(Kap. 6.12.2.5), sondern das für automatische Konstruktionen nötige implizite und explizite Wissen und die formalen Zusammenhänge zentral und grafisch unterstützt zu verwalten und darzustellen und aus diesen verwandten Disziplinen Synergien zu ziehen!

6.12.2.1 Konstruktionskataloge³⁰⁷

Konstruktionskataloge sind eine vor-EDV-Zeitalter-Form des Informations- bzw. Wissensmanagements. Als Konstruktionskataloge werden Informationsspeicher bezeichnet, die hinsichtlich ihrer Inhalte, ihrer Zugriffsmöglichkeiten und ihres Aufbaus auf das methodische Konstruieren zugeschnitten sind. Ihre besonderen Kennzeichen sind weitgehende Vollständigkeit, klare systematische Gliederung und, sofern das möglich ist, Existenz von Zugriffsmerkmalen [ROT00].

Um Konstruktionskataloge der Unverbindlichkeit beliebiger Lösungssammlungen zu entziehen, möglichst allgemeingültig und vielseitig verwendbar zu machen sowie den neuen Konstruktionsverfahren anzupassen, müssen Sie folgende Bedingungen erfüllen:

- Schnellen Informationszugriff und bequeme Handhabung ermöglichen, Gültigkeit für einen großen Benutzerkreis haben,
- dem Konstruktionsablauf angepasst sein, Widerspruchsfreiheit in sich und untereinander aufweisen, konstruktionsmethodische Gesichtspunkte und Verfahren berücksichtigen, Vollständigkeit innerhalb gesetzter Grenzen gewährleisten
- Erweiterungsfähig, systembeständig sowie im Detail änderbar sein und die Gesichtspunkte ihrer Gliederung erkennen lassen.

Hier wird ein Katalog mit „eindimensionalem“ Gliederungsteil vorgestellt. Der Katalog unterteilt sich dabei in den Gliederungs-, den Haupt- und den Zugriffsteil, sowie den Anhang (Bild 6.123).

Gliederungsteil			Hauptteil		Zugriffsteil					Anhang			
1	2	3	1	2	Nr.	1	2	3	4	5	1	2	3
					1				X				
					2					X			
					3	X	X						
					4								
					5			X					
					6								
					7	X							

Bild 6.123: Aufbau Konstruktionskatalog [ROT00]

Der Gliederungsteil enthält die wesentlichen Gesichtspunkte, die die Elemente des Hauptteils, also den eigentlichen Kataloginhalt, widerspruchsfrei unterteilen und dem Benutzer die Möglichkeit geben, die Vollständigkeit zu überprüfen [ROT00].

Der Hauptteil enthält den eigentlichen Inhalt des Katalogs. Je nach Katalogart handelt es sich entweder um Objekte, Operationen oder um Lösungen. Sie

³⁰⁷ Für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes danke ich meinem Stipendiaten Alexander Ketter (Bericht nicht publiziert).

werden in Form von Skizzen, Gleichungen oder Texten dargestellt. Sehr vorteilhaft, weil optisch schnell zu erfassen, sind gut durchdachte, von allen Nebensächlichkeiten befreite Skizzen [ROT00].

Der Zugriffsteil ist besonders kennzeichnend für Konstruktionskataloge und soll dem Verwendungszweck gut angepasst sein. Während Gliederung- und Hauptteil, formal streng gehandhabt werden müssen, ist die Wahl der Zugriffsmerkmale sehr stark anwendungs-, ja sogar branchengebunden. Die Zugriffsmerkmale sollen das jeweilige Objekt beziehungsweise die entsprechende Lösung des Hauptteils so charakterisieren, dass man bei Vorgabe dieser Eigenschaften stets die günstigsten Lösungen findet und nicht in Frage kommende sofort ausscheidet [ROT00].

Der Anhang bietet die Möglichkeit auf zusätzliche Literatur oder auf die Quelle der im Zugriffsteil verwendeten Werte zu verweisen.

Ehrlenspiel [EM13] gibt einen Überblick über derzeit verfügbare Konstruktionskataloge.

6.12.2.2 Semantische Netze und Ontologien

Mit dem Wort Semantik wird in der Informatik die Bedeutung eines Programmiercodes als Anweisung an einen Prozessor beschrieben. **Semantische Netze** sind eine technologische Möglichkeit, Informationen über ein bestimmtes Wissensgebiet so anzuordnen, dass sie sowohl für einen Menschen, als auch für einen Computer interpretierbar sind. Sie sollen die Lücke zwischen natürlicher und formaler Sprache schließen.

Abgelegte Informationen werden dazu zunächst so explizit wie möglich gemacht und als Verknüpfung zwischen Objekten (Objekte als „Begriffe“) veranschaulicht. Die Verknüpfungen können unterschiedlichen Typs sein und sollen die natürliche Sprache des Users wiedergeben. Durch semantische Netze ist es Computerprogrammen möglich, einen Sinn für Objekte wie Abstraktion, Konkretisierung, Kontext, thematische Entfernung und Ähnlichkeit zu entwickeln, wodurch sie eine Annäherung zwischen den Erwartungen des Users der Software und den tatsächlichen Ergebnissen bei einer Informationssuche erreichen [REI10]. Semantische Netze zeichnen sich im Gegensatz zu Hierarchien besonders durch eine uneingeschränkte Objektidentität und der Fähigkeit von Wissensableitung aus. Durch die Homonymie bzw. Polysemie (mehrdeutige Begrifflichkeiten) der im Sprachgebrauch verwendeten Wörter stellt die Projektion der natürlichen Sprache in eine, vom Computer umsetzbare Sprache, eine große Aufgabe dar. Bild 6.124 zeigt verschiedene Ausbaustufen von semantischen Netzen.

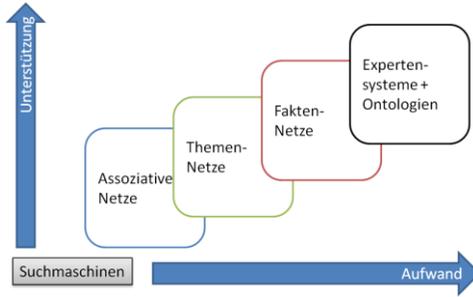


Bild 6.124: Repräsentation von Wissen in verschiedenen Ausbaustufen von semantischen Netzen, nach [REI10]

Zusammen mit den Expertensystemen stellen die sogenannten **Ontologien** die höchste Komplexitätsstufe von semantischen Netzen dar [REI10]. Im Unterschied zu den bereits beschriebenen Expertensystemen, die das hinterlegte Wissen mit sämtlichen Details beschreiben, versucht eine Ontologie Anspruch auf Allgemeingültigkeit des Wissens zu erheben. „Eine Ontologie enthält Metawissen, nie instanzielles Wissen. Sie liefert ein Weltbild mit Gegenständen ... und Naturgesetzen (Axiomen), ohne Aussagen über Zustände zu treffen“ [BOD05]. Die verwendeten Axiome ermöglichen es, das formulierte Wissen zu verifizieren und verhindern, dass Wissen formuliert wird, welches dem „Weltbild“ offensichtlich widerspricht. Axiome sind aber nicht nur Gesetze, die durch einfache Relationen (Beziehungen zwischen den Objekten) nicht abbildbar wären, sondern regeln ebenso die Existenz der einzelnen Relationen durch Logik. Sie sind somit aufgrund ihrer Globalität den Relationen übergeordnet. Ontologien zeichnen sich zusammenfassend durch das Abbilden von Objekten unabhängig vom Verwendungskontext aus und garantieren auf diese Weise eine absolute Übertragbarkeit und Wiederverwendbarkeit des formulierten Wissens [BOD05].

Am Beispiel des Freeware-Ontologieeditors Protégé sollen die Grundbegrifflichkeiten im Zusammenhang mit der Arbeit an Ontologien gezeigt werden; siehe dazu auch Bild 6.140.

Protégé ist eine Plattform, die eine Reihe von Werkzeugen zur Repräsentation eines Wissensgebiets bzw. einer wissensbasierten Anwendung in einer Ontologie anbietet. Das Programm wurde an der Stanford University entwickelt und kann unter [SOC14] kostenlos heruntergeladen werden. Die drei wesentlichsten Bestandteile von Protégé bilden der Class Browser, der Property Browser und der Instance Browser.

Klassen stellen die hauptsächliche Basiskomponente einer Ontologie dar. Klassen können als Gruppe von Individuen aufgefasst werden. Die Klassen werden im Class Editor beschrieben und folgen den Gesetzen einer Taxonomie. Dies bedeutet, dass es eine hierarchische Gliederung der Klassen in Überklassen (Superclass) und Unterklassen (Subclass) gibt. Ein Individuum einer Unterklasse ist automatisch Teil der Überklasse. Die höchste Klasse in Protégé stellt ohne Ausnahme immer die Masterklasse »things« dar. Alle folgenden, vom User definierten, Subclasses müssen automatisch ein »thing« sein.

Bei der Definition muss also darauf geachtet werden, dass man nicht wahllos Klassen untereinander anordnet. Als Beispiel: Falsch wäre es, die Klasse Bauteile als Subclass von Baugruppen zu definieren nur, weil Baugruppen aus Bauteilen bestehen. Tut man dies, so würde das für Protégé heißen, dass jedes Bauteil für sich eine Baugruppe wäre, was definitiv falsch ist.

Die **Beziehungen** sind das Herzstück der Wissensverknüpfung. Es gibt drei verschiedene Arten von Properties, wovon zwei grundlegend wichtig sind. Zum einen gibt es die Object properties, die zwei Individuen miteinander verbinden und zum anderen die Datatype properties, die Individuen mit einem Datensatz (string, date, number, ...) in Zusammenhang bringen. Die Definition der Properties geschieht im Property Browser, die der Datensätze im Data Browser.

Wie bereits unter der Definition der Klassen zu erkennen ist, gibt es **Instanzen** der Klassen. Dies sind alle Individuen, die sich in der Klasse befinden. Einzelne Instanzen werden dadurch einer Klasse zugeordnet. Weiters ist es möglich, Instanzen nach gewünschten Kriterien abzufragen und so schnell einen Überblick über gegenseitige Beeinflussungen und Stellmöglichkeiten zu erhalten.

Ontologien können Grundlagen und Abbildungswerkzeuge nicht nur für Zusammenhänge von komplexen Produkten sein, sondern auch als Grundlage für z.B. Kommunikationsmodelle dienen, bzw. als Basis ganze Systeme abbilden. Die UML-Klassendarstellung ist dazu ein geeignetes Mittel um Konzepte, Prädikate und Aktionen grafisch abzubilden [LCK10].

6.12.2.3 DSM und weitere matrixbasierte Methoden³⁰⁸

Matrixbasierte Methoden werden eingesetzt, um die Komplexität von technischen Systemen begreiflich zu machen und überschaubar darzustellen. Die Komplexität der Systeme entsteht aufgrund der großen Anzahl von Elementen (d.h., den Bestandteilen von Systemen, wie Komponenten und Funktionen) und deren Beziehungen zueinander. Die matrixbasierten Methoden für den Umgang mit komplexen Systemen haben ihren Ursprung neben der Graphentheorie vor allem in der Entwicklung der Design Structure Matrix (vgl. [RS12]).

DSM (Design Structure Matrix)

Im Jahre 1981 erschien zum ersten Mal in einer Publikation von Don Steward das Verfahren der Design Structure Matrix. Eine Design Structure Matrix, abgekürzt DSM, ist eine quadratische Matrix, d.h., eine Matrix mit einer gleichen Anzahl von Zeilen und Spalten. Sie bietet eine systematische Beziehungszuordnung zwischen den Elementen. Diese Elemente können physische Produktkomponenten, Leistungsmerkmale, Konstruktionsanforderungen oder Prozessaufgaben sein. Die Elementbezeichnungen werden auf der Ordinate sowie auf der Abszisse in derselben Reihenfolge angeführt. Die Diagonalzellen der Matrix werden meist nicht berücksichtigt und bleiben deshalb leer, oder werden geschwärzt. Die markierte Zelle bestimmt die Abhängigkeit zwischen zwei Elementen. Die Leserichtung der Matrix nach dem europäischen System wird dadurch bestimmt, dass die Zeile die Spalte beeinflusst (beim amerikanischen System beeinflusst die Spalte die Zeile).

³⁰⁸ Für die Ausarbeitung dieses Abschnittes danke ich meinem Diplomanden Stefan Steinkellner 2012, [STE12].

Wenn sich zwei Elemente gegenseitig (bidirektional) beeinflussen, werden die Zellen der Elemente oberhalb und unterhalb der Diagonale markiert. Die markierten Zellen zwischen den Elementen geben nur an, dass die Elemente in Abhängigkeit stehen und in welcher Richtung sie sich beeinflussen. Mehr Information über die Beziehungen ist in der numerischen DSM enthalten. Dabei wird an Stelle der Markierung ein Faktor gesetzt, welcher die quantitative Abhängigkeit zwischen zwei Elementen bestimmt. Die DSM kann nur die Beziehungen von Elementen innerhalb einer Domäne abbilden. Bild 6.125 zeigt an der linken Seite die DSM und an der rechten Seite ein Flussdiagramm, welches aus der DSM abgeleitet werden kann [MAU07].

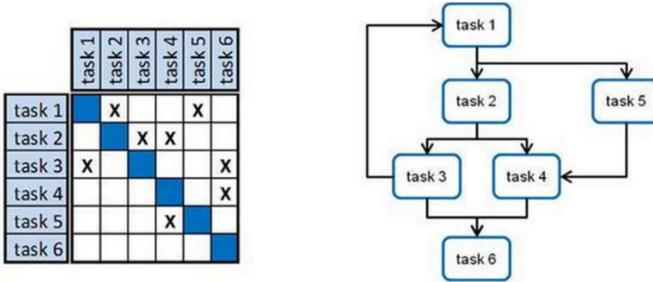


Bild 6.125: Design Structure Matrix - DSM [DSM09]

Die DSM kann für vier unterschiedliche Bereiche angewendet werden und wird deshalb in vier verschiedene **DSM-Typen** untergliedert [DSM09]:

- **Komponentenbasierte DSM (Produkt):**
Eine komponentenbasierte DSM dokumentiert die Abhängigkeiten zwischen den Elementen in einer komplexen Systemarchitektur. Sie findet Anwendung in der Entwicklung und Konstruktion.
- **Teambasierte DSM (Organisation):**
Die teambasierte DSM beinhaltet die organisatorische Analyse und den Informationsfluss zwischen den Organisationseinheiten. Einzelpersonen und Gruppen an einem Projekt sind die Elemente die analysiert werden. Sie wird für die Organisationsgestaltung, Schnittstellenmanagement und Teamintegration verwendet.
- **Aktivitätenbasierte DSM (Prozess):**
Die aktivitätenbasierte DSM betrachtet eine Reihenfolge von Aufgaben innerhalb eines Prozesses. Diese Aufgaben müssen aufeinander abgestimmt sein, damit das Ziel des gesamten Prozesses erreicht wird. Sie wird für die Prozessverbesserung und Projektplanung angewendet.
- **Parameterbasierte DSM (unteres Prozessniveau):**
Eine parameterbasierte DSM analysiert die Beziehungen des Konstruktionsprozesses auf der Ebene der Parameter. Sie wird auf einem niedrigeren Niveau der Aktivitätensequenzierung und der Prozesskonstruktion sowie für die Sequenzierung der Konstruktionsentscheidungen verwendet.

Die **DSM-Analysealgorithmen** konzentrieren sich auf die Charakterisierung der gesamten Matrixstruktur. Sie basieren auf der Neuordnung der Elemente in der Matrix, um strukturelle Merkmale hervorzuheben. Wenn umfangreiche Systeme untersucht werden, ist eine Softwareunterstützung erforderlich, da bei einer großen Anzahl an Elementen und Abhängigkeiten der Rechenaufwand zu groß wird [MAU07]. Eine Beschreibung der bekanntesten Analysealgorithmen für die DSM erfolgt untenstehend.

Partitioning

Das Partitioning beschreibt die Umordnung einer DSM (Zeilen und Spalten), mit dem Ziel der Anordnung aller bestehenden Abhängigkeiten an einer Seite der Diagonale. Wenn eine solche Ausrichtung gefunden werden kann, sind keine Rückkoppelungsschleifen in der Struktur vorhanden. Jedoch kann die Menge und die Entstehung der Schleifen nicht weiter spezifiziert werden (es soll dabei erwähnt werden, dass stark verbundene Elemente innerhalb der Struktur mit Partitioning spezifiziert werden können). In Prozess- oder Aktivitätensnetzwerken zeigt die Anwendung des Partitioning eine entsprechende Reihenfolge von Prozessschrittausführung. Die Identifizierung der Abhängigkeitsausrichtungen an einer Seite der Diagonale kennzeichnet einen Arbeitsablauf ohne erforderliche Iterationsschritte. Komplexe Strukturen besitzen oft Rückkoppelungsschleifen, die keine ideale Ausrichtung zulassen. In diesem Fall versucht Partitioning ein Minimum von Abhängigkeitsmarkierungen unter der Diagonale zu positionieren und alle Abhängigkeitsmarkierungen so nahe wie möglich an der Diagonale auszurichten d.h., Rückkoppelungsschleifen besitzen nur eine minimale Länge. Diese Optimierung macht nur Sinn in zeitbasierten Strukturen für die Erreichung einer Zeitersparnis. Andere Bezeichnungen für Partitioning sind Sequencing oder Triangularization. Diese Algorithmen liefern jedoch nicht immer optimale Resultate. Eine potentielle Möglichkeit ist die Kombination aus gemeinsamen deterministischen Algorithmen mit Permutation. Bild 6.126 zeigt links die Ausgangsmatrix und rechts die partitionierte Matrix [MAU07].

	A	B	C	D	E	F	G
A	X						
B		X	X				
C	X		X		X		
D	X			X			X
E					X		
F			X		X	X	
G		X	X				X

	F	B	D	G	C	A	E
F				X	X	X	
B		X			X		
D			X			X	
G		X		X			
C					X	X	
A					X	X	
E							X

Bild 6.126: Partitioning einer DSM [DSM09]

Banding

Das Banding ist eine Erweiterung des Partitioning und stellt voneinander unabhängige Elemente in einer gesamten Struktur dar. Dies erfolgt durch eine Neuordnung der Elemente und durch die Darstellung von hellen und dunklen Streifen in der Matrix.

Wenn die Elemente nebeneinander angeordnet sind und dieselbe Farbe besitzen, können sie unabhängig voneinander bearbeitet werden. Banding bezieht sich auf die unterschiedlichen hierarchischen Ebenen, die durch das Partitioning identifiziert werden, dabei wird jedoch die Erkennung von Rückkoppelungsschleifen ignoriert. Aus diesem Grund ist die nützliche Anwendung von Banding zweifelhaft, da die Analyse wichtige Strukturmerkmale vernachlässigt. Dieser Analysealgorithmus wurde für Prozess- und Aktivitätensnetzwerke konzipiert. Das Ziel dabei ist es, eine geringe Anzahl an Streifen in einer Matrix wie möglich zu erhalten, was zu einem hohen Grad der Parallelität der Prozessschritte führt. Bild 6.127 zeigt eine Matrix nach dem Banding [MAU07].

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	X		X	X	X	X	X		X			X	X	X
2		X												X
3			X	X					X					X
4				X					X	X				X
5					X									X
6					X	X	X		X	X	X			X
7						X				X	X	X		X
8					X			X	X	X				X
9		X												X
10									X		X	X		X
11									X		X			X
12					X		X					X	X	
13					X									X
14														X

Bild 6.127: Banding einer DSM [DSM09]

Clustering

Das Clustering ermöglicht die Identifizierung von spezifischen Teilmengen einer Struktur. Ziel des Clustering ist es, Untergruppen zu erkennen, die viele interne Abhängigkeiten und wenige Abhängigkeiten zu externen Elementen in der Struktur besitzen. Aus diesem Grund bietet sich die komponentenbasierte DSM als eine geeignete Anwendung für Clustering an, welche Erstellung von Produktmodulen ermöglicht. Eine Anpassung eines Elementes an das Cluster verursacht viele Auswirkungen auf die anderen Elemente in dieser Untergruppe, während der Austausch des gesamten Clusters (Modul) nur wenige Abhängigkeiten bzw. Auswirkungen auf die anderen Produktteile haben. Die Graphentheorie bietet verschiedene Clusteringalgorithmen, einige davon basieren auf der Anwendung des Ähnlichkeitsprinzips. Zusätzlich können Cluster durch das Kriterium der stark verbundenen Elemente identifiziert werden. Für das DSM-Clustering kann der Ansatz des genetischen Algorithmus angewendet werden, beispielsweise unter der Verwendung des Minimum Description Length (MDL)-Verfahrens. Bild 6.128 zeigt links die Ausgangsmatrix und rechts die Matrix nach dem Clustering [MAU07].

Bild 6.128: Clustering einer DSM [DSM09]

Im Abschnitt 6.12.2.5 wird ein Softwaretool vorgestellt, welches sich für die Erstellung einer DSM eignet. Die Quellen [P3] und [P11] beschreiben den Einsatz und den Nutzen von DSM zur Entwicklung materialflusstechnischer Gewerke.

DMM (Domain Mapping Matrix)

Die DSM liefert Mittel für die Lösung vieler Probleme in der Produktentwicklung, jedoch besteht bei der DSM nur die Möglichkeit in einer Domäne zu arbeiten. Es entsteht die Komplexität der Produktentwicklung im Zusammenspiel verschiedener Domänen, wie zwischen der Organisationsstruktur und Prozessen, Produkte und Funktionen, Zulieferern und Produktion. Aufgrund dieser Problemstellung wurde die Domain Mapping Matrix kurz DMM eingeführt, die die Möglichkeit bietet zwei Domänen miteinander zu koppeln. Zur Analyse solcher Strukturen wird das DMM-Clustering eingesetzt. Es beruht auf dem Ähnlichkeitsprinzip für unsymmetrische Matrizen, welches auch bei der DSM eingesetzt wird. Die DMM ist jedoch nur auf die Analyse des Clustering beschränkt, andere Analysemethoden können bei der DMM nicht angewandt werden. Bild 6.129 zeigt ein Beispiel einer DMM in dem die Abhängigkeiten zwischen Personen und Aufgaben dargestellt werden [RS12].

	task 1	task 2	task 3	task 4	task 5	task 6
person 1	X				X	
person 2		X				
person 3			X			X
person 4				X		

Bild 6.129: Domain Mapping Matrix DMM [DSM09]

MDM (Multiple Domain Matrix)

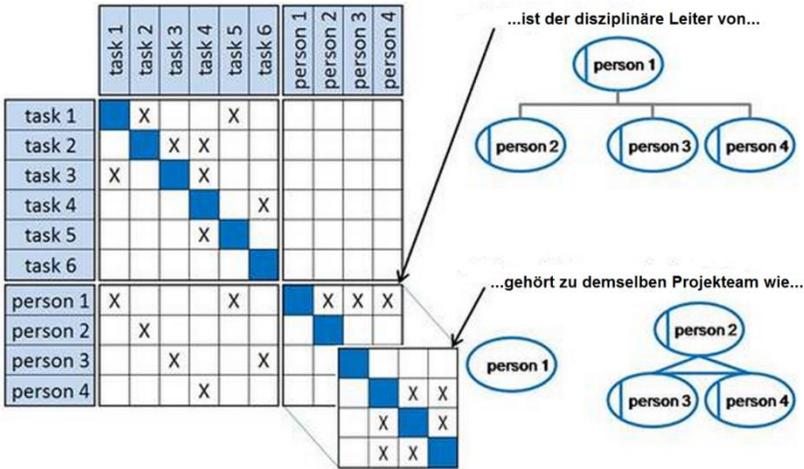


Bild 6.130: Multiple Domain Matrix MDM in Anlehnung an [DSM09]

Die Multiple Domain Matrix, abgekürzt MDM, besteht aus mehreren DSMs und MDMs, damit ein ganzes System modelliert werden kann. Das System beinhaltet mehrere Domänen, von denen jede mehrere Elemente enthält, die durch verschiedene Beziehungstypen miteinander verbunden sind. MDMs erlauben die Analyse einer Systemstruktur über mehrere Domänen. Bild 6.130 veranschaulicht das Konzept einer MDM. Sie zeigt, dass eine MDM im Grunde eine Erweiterung der DSM und MDM ist, mit detaillierten DSMs entlang ihrer Diagonale und DMMs außerhalb der Diagonale. Sie zeigt auch, wie verschiedene Beziehungstypen mehrere Darstellungen der gesamten MDM erstellen [DSM09].

6.12.2.4 Weitere Methoden der Wissensverarbeitung³⁰⁹

MindMapping

Der Begriff und die Arbeitsmittel wurden von Tony Buzan eingeführt. Die Mind-Map dient zur Strukturierung von verschiedenen Themengebieten durch Visualisierungen der Beziehungen zwischen einzelnen Themen. Das Kernthema bzw. die Grundaussage des Konzeptes wird durch einen Kreis in der Mitte der Mind-Map gekennzeichnet. Durch Hauptäste werden die wichtigsten Kriterien zu dem Kernthema mit dem Kreis verbunden. Eine Vertiefung dieser Kriterien kann durch eine weitere Verästelung erreicht werden. Falls die Begriffe komplexer miteinander verbunden sind spricht man von konzeptuellen Karten, semantischen Netzen oder Ontologien [UNI99].

³⁰⁹ Dank für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meine Studierenden Christoph Kranawetter und Christoph Maier im Rahmen ihres Bachelorprojektes 2014 (nicht publiziert)!

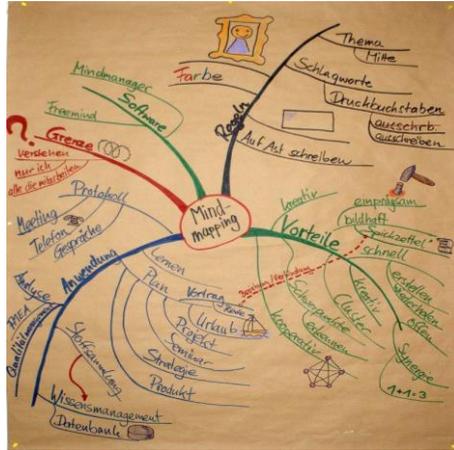


Bild 6.131: MindMapping [WIK14a]

Taxonomien

Klassifikation und Dekomposition, stellen eine erste strukturell orientierte Form der Wissensrepräsentation in Zusammenhang mit Taxonomie dar.

Es handelt sich dabei um ein einheitliches Verfahren, mit dem Objekte nach bestimmten Kriterien, d.h. in Kategorien oder Klassen eingeordnet werden [KOS93].

Durch die Erleichterung des Umgangs mit Einzelfällen und summarischen Aussagen, sind Taxonomien für die Entwicklung einer Wissenschaft von erheblicher Bedeutung [WIK12]

Taxonomien sind neben den klassischen Anwendungen in biologischen Systematiken auch im informationstechnischen Umfeld weit verbreitet (z.B. Organisation von Dateiobjekten in Betriebssystemen). Die Nachteile dieser Form der Wissensrepräsentation liegen in der Starrheit einer einmal definierten Klassifikationsstruktur, in der Linearität der Zugangsmöglichkeiten zu Objekten und allgemein in den Einschränkungen von Relationen zu Objekten untereinander.

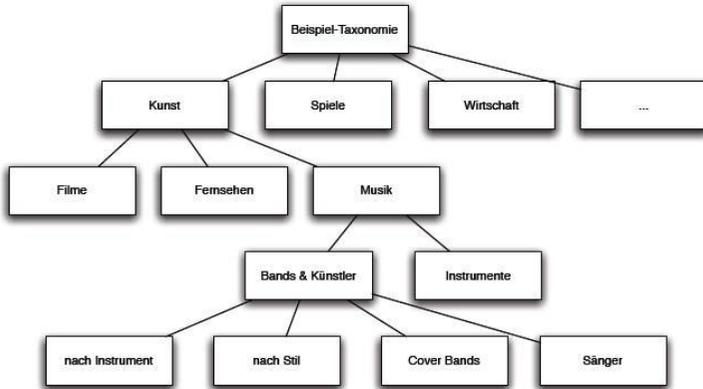


Bild 6.132: Beispiel einer Taxonomie [UNI07]

Wiki-Systeme am Beispiel lexiCan®

Die Verbreitung des wohl bekanntesten Wiki-Systems „Wikipedia“ ist nahezu weltumfassend in der IT-benutzenden Gesellschaft. Im unternehmerischen Verwendungsbereich ist ein offenes System wie Wikipedia nur bedingt sinnvoll und es stehen eine Reihe von Intra-Wiki-Systemen mit Benutzerkonzepten und Sicherheitsroutinen zur Verfügung.

LexiCan ist ein Produkt der deutschen vetafab Software GmbH. Der Einsatz der Datenbank eignet sich generell für alle Gebiete, in denen Wissen gesammelt, organisiert und weitergeben werden soll. So wird lexiCan zum Beispiel als Unternehmens-Wiki, Projektdatenbank, Knowledge Base oder zur systematischen Auswertung von Recherchen eingesetzt [WIK14b].

lexiCan ermöglicht große Mengen multimedialer Inhalte zu einem Thema zu sammeln, zu strukturieren, zu vernetzen und für die weitere Verwendung aufzubereiten. lexiCan stellt eine Gliederungsfunktion bereit, die auch die Mehrfachzuordnung von Begriffen zulässt. Das Anlegen von Inhalten wird durch Importfunktionen unterstützt. So können ganze Windows-Verzeichnisse importiert werden. Die enthaltenen Dateien werden Anhängen oder Artikeln zugeordnet. In den Artikel lassen sich Verweise auf andere Artikel, Weblinks und Dateien frei in die Beschreibung einbinden. Dem Anwender stehen hierzu Drag & Drop-Funktionen und Kontextmenüs zur Verfügung. Die integrierte Quellenverwaltung verhindert das redundante Eintragen von Referenzen. Gleichzeitig erstellt lexiCan automatisch eine Übersicht, welche Artikel aus einer Quelle gespeist werden [WIK14b].

Zum Auffinden von Inhalten stehen daneben ein alphabetischer Index über alle Titel, eine Übersicht über eingebundene Bilder und eingebundene Dateien, die Gliederung sowie die Volltextsuche (inklusive Dateianhänge) zur Verfügung. Durch dynamische Filter wird der schnelle Aufruf unterstützt [WIK14b]. Bild 6.116 zeigt den Einsatz der Software.

Tabellenkalkulations- und allgemein softwarebasierte Auslegungswerkzeuge ³¹⁰

Viel Entwicklungs- und Konstruktionswissen ist in Tabellenkalkulationsprogrammen zur Auslegung maschinenbaulicher Komponenten, Baugruppen und Anlagen angelegt. Obwohl die Übersicht und Editierbarkeit darin begrenzt ist, hat sich diese Methode der automatisierten (Teil)auslegung weit verbreitet, nicht zuletzt deswegen, weil Tabellenkalkulationsprogramme wie Microsoft EXCEL® weitestmöglich verbreitet sind. CAD-Systeme, wie beispielsweise PTC.Creo®, bieten Schnittstellen dazu an, aber auch zu anderen Berechnungsprogrammen, die auf Computer-Algebra basieren, wie PTC.MathCad®. Man könnte von einem KBE light sprechen, da noch Interaktion unterschiedlichster Art mit dem Benutzer nötig ist.

Das Berechnungsprogramm kann auch über GUIs gesteuert und in Programmier-Hochsprachen erstellt sein; die CAD-Systeme bieten ausreichend unterschiedliche Import/Export-Schnittstellen für Konstruktionsparameter. Bild 6.133 und [P6] zeigen Beispiele dafür.

A4		Antriebsseinheit											
1	Geometriedaten	Berechnung/Auslegung				Auswahl				Kontrolle			
2	Parametername	Zeichen	Parametername	Zeichen	Regel		Parametername	Zeichen	Regel	Parametername			
4	Antriebsseinheit												
5	Antriebsleistung [m]	a	Stueckgewicht [kg]	M _s	$M_s = \frac{m_{max} \cdot l}{n}$	Antrieb	Leistung_Antrieb [W]	P _{II}	P _{II} > P _{III}				
6	Metzenabstand [mm]	b	max. Strg. gleichzeitig	l									
7	Arbeitsgeschwindigkeit [m/s]	v	Foerdergeschwindigkeit [m/s]	v									
8	Kettenradradius [mm]	r	Rollenzahl	z									
9	Stranganzahl	n	Archdurchmesser [mm]	d _A	$b_k = \text{Kette_Buchsenlaenge}$								
10	Stützenabstand [m]	s	Stirnradbreite [mm]	b _s									
11	Archhöhe [mm]	x											
12			Kette_Gewicht [kg/m]	M _k									
13	Regel:		Stueckgewicht_Meter [kg/m]	M _s									
14	a = a + 0.0506		Gleitreibkoeffizient	μ _s									
15			Gesamtumfangskraft [N]	F _s	$F_s = 1.1 \cdot a \cdot \mu_s \cdot g \cdot (n \cdot M_s + M_g)$								
16	für Auslegung muss Erfahrungsschätzwert (z) festgelegt werden. Nach Kettenauswahl, Kontrolle mit tatsächlichem Wert		Leistung_theoretisch [W]	P _{III}	$P_{III} = \frac{F_s \cdot v}{\eta}$								
17			Leistung_Strang [W]	P _I	$P_I = \frac{P_{III}}{n}$								
18			Kettenkoeffizienten	f ₀	$f_0 = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \approx 1$								
19			Zahnezahlfaktor	f ₁	$f_1 = f(z) \quad f_2 = 24 \cdot z^{-1.08}$								
20			Anwendungsfaktor	K _A	$K_A = \frac{M_s \cdot P_I \cdot f_1}{F_s \cdot v}$								
21	möglicher Excel-Befehl: WENN(I18=">2;18)		Diagrammleistung [W]	P _{II}	$P_{II} = \frac{K_A \cdot P_I \cdot f_1}{f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6}$								
22													

Bild 6.133: Beispiel der Grundauslegung (konstruktiv und antriebsdynamisch) eines Rollenförderers in EXCEL®

Problematisch wird deren Verwendung in Bezug auf Versionierung der gesteuerten Konstruktionsteile, bei grundlegenden Änderungen an der Modellstruktur der CAD-Modelle und beim Software-Release-Wechsel.

6.12.2.5 Komplexitätssoftware

CAM

Der Cambridge Advanced Modeller, abgekürzt CAM, wurde an der Universität Cambridge entwickelt. Es ist ein Software-Werkzeug für die Modellierung und Analyse von Abhängigkeiten und Flüssen in komplexen Systemen – wie Produkte, Prozesse und Organisationen. Es bietet ein Diagramm-Tool, ein Simulationswerkzeug und ein DSM-Tool [OCE14a].

³¹⁰ Dank für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meinen Studierenden Dominik Schmid im Rahmen seines Bachelorprojektes 2013 (nicht publiziert)!

Mit dem CAM kann sehr einfach und schnell eine DSM erstellt werden. Jedoch ist dabei zu beachten, dass sich die Matrix auf das amerikanische System bezieht, d.h., die Spalte beeinflusst die Zeile. Er bietet die Möglichkeit CSV-Dateien zu exportieren und zu importieren. Nach der Erstellung der DSM und der Bestimmung der Abhängigkeiten der einzelnen Parameter, bietet er die Möglichkeit, die Parameter manuell zu gruppieren. Im CAM sind auch die Funktionen zum automatischen Partitioning, Banding und Clustering enthalten. Für eine grafische Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Parametern kann eine Netzgrafik erzeugt werden. [STE12]

– siehe dazu auch die Funktionalitäten der DSM und DMM in Kap. 6.12.2.3.

Set Visualiser

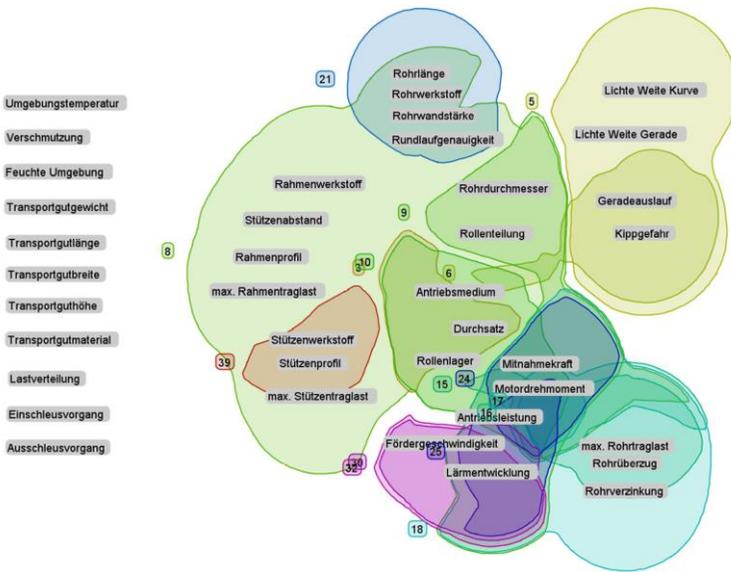


Bild 6.134: Schnittmengendiagramm für einen Rollenförderer

Das Programm Set Visualiser ist ebenfalls eine Entwicklung des EDC der Cambridge University [OCE14b] und dient in erster Linie der Mengen- und Schnittmengendarstellung – ist somit nicht unbedingt dem Bereich Komplexitätssoftware zuzurechnen. Es wurde entwickelt, um die Klassifizierung in eine oder mehrere Kategorien von Objekten grafisch mittels Euler-Diagrammen darzustellen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Visualisierung nicht-hierarchische Klassifikationen, in dem ein Objekt zu mehr als einer Kategorie gehört, darstellt [OCE14b].

Bild 6.134 zeigt ein Schnittmengendiagramm von Rollenfördererparameter. Die Parameter die links außerhalb der Blasen angeordnet sind, werden durch keine anderen Parameter beeinflusst. Die Parameter, die sich in denselben Blasen mit denselben Farben befinden, weisen sehr starke Abhängigkeiten zueinander auf. Liegen mehrere Blasen mit Parameter-Objekten übereinander, gehören diese mehreren Kategorien an und sind die am stärksten abhängigen.

Loomeo

LOOMEO (Beschreibung nach [TES14a] und [TES14b]) hilft bei der Analyse von Systemen und der Identifikation komplexitätssteigernder System-Eigenschaften. Es schafft Transparenz bei komplexen Produktarchitekturen, entwickelt Szenarien für eine verbesserte Zusammenarbeitsstruktur und unterstützt die systematische Bewahrung und Übertragung des Wissens von Know-how-Trägern. Die grafischen Darstellungen helfen, den Anteil einzelner Elemente an dem System, seiner Architektur und seinem Verhalten zu verstehen. Die Hauptfeatures von LOOMEO sind:

- Analyse von Systemen mit Methoden der Grafentheorie
- Unterstützung des intuitiven Verständnisses der Systemarchitektur und des Systemverhaltens
- Berechnen entscheidender, aber nicht erfassbarer, Systemzusammenhänge
- Ausblenden gerade nicht wichtiger Elemente, Fokus auf das Wichtige legen, der Gesamtblick auf das System bleibt aber immer erhalten
- Datenaustausch mit MS Excel

In der Strukturanalyse und im strukturellen Komplexitätsmanagement bietet LOOMEO die folgenden Hauptfunktionen

Problem- und Systemerfassung

- Modellbildung
- Erfassung der Systemzusammenhänge

Problemlösung

- Strukturanalyse
- Berechnung indirekter Abhängigkeiten
- Nutzung der Grafentheorie (Cluster, ...)

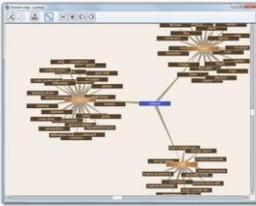
Rückführung auf den Problemkontext

- Ableitung von Handlungsanweisungen
- Umsetzung von Strukturpotenzialen

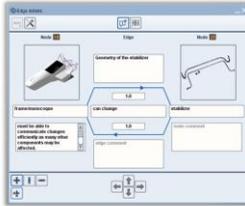
Für den Wissenstransfer stellt LOOMEO zu jedem Zeitpunkt genau die nötigen Optionen zur Verfügung. Importieren von Daten aus MindMaps oder MS Excel ist möglich. Die Erfassung der Aufgaben, Kompetenzen, Netzwerke und Methoden erfolgt zunächst getrennt voneinander. So werden alle relevanten Informationen sicher dokumentiert. Erfasste Elemente können mitsamt ihrer Kinder in der Tabelle – wie sonst nur aus Mindmaps bekannt – an andere Stellen verschoben werden. Zu jedem Element können Kommentare, Prüfungsfragen und Antworten aufgenommen werden.

Ähnlichkeiten zum Ansatz der xKBE-app (vgl. Bild 6.135 mit jenen in Abschnitt 6.14.2) bestehen vor allem in der Verwendung grafischer Werkzeuge und in der ontologischen Beschreibung von Systemen. Der Datenaustausch hat hier den Schwerpunkt nach Microsoft EXCEL®, während bei xKBE-app jener nach CAD-Systemen und PTC.Creo® im Vordergrund steht. Ein Einsatzbeispiel für LOOMEA ist [OSL11] zu entnehmen.

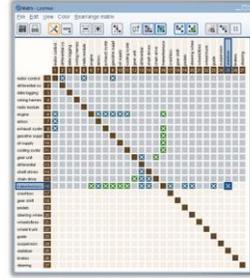
LOOMEO stellt komplexe Systeme an die aktuelle Situation angepasst dar.



Mit der Domain Map können Elemente schnell zu der gewünschten Elementgruppe hinzugefügt werden.



Das Kantendetails-Fenster dient der Fokussierung der Aufmerksamkeit während der Erfassung. Es enthält alle Informationen zu jeweils einer Elementkombination.



In Matrizen werden strukturiert alle möglichen Elementkombinationen auf die Existenz von Relationen überprüft.

Bild 6.135: Systemdarstellung für die Systemerfassung mit LOOMEO [TES14a]

6.12.3 Exkurs: Wissensvisualisierung und Analyse der Komplexität am Beispiel autonomes Shuttle³¹¹

Kleinskalige autonome Fahrzeuge sind ein Trend der Intralogistik und versprechen flexible Logistiklösungen für unterschiedlichste Branchen [HNP14] (siehe Bild 6.136). Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an die maschinenbauliche Seite der Produktentwicklung, da es sich in den meisten Fällen auch um eine Neukonstruktion handelt. Im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten wurde die Systematik und Funktionsstruktur unterschiedlicher Fahrzeugkonstruktionsvarianten erhoben bzw. neu entwickelt, die Ausführungen hier geben einige Erkenntnisse mit Bezug zum Thema Wissen und Wissensmanagement wieder.



Bild 6.136: Dematic/Fraunhofer IML Multishuttle Move [DEM13]

³¹¹ Dank für die Ausarbeitung der Inhalte dieses Abschnittes geht an meine Stipendiaten Alexander Ketter und Michael Schadler (nicht publiziert)!

Man kann sich beim funktionalen Aufbau ansatzweise an [VDI 2510] orientieren, und kommt zur folgenden Struktur (Bild 6.137):

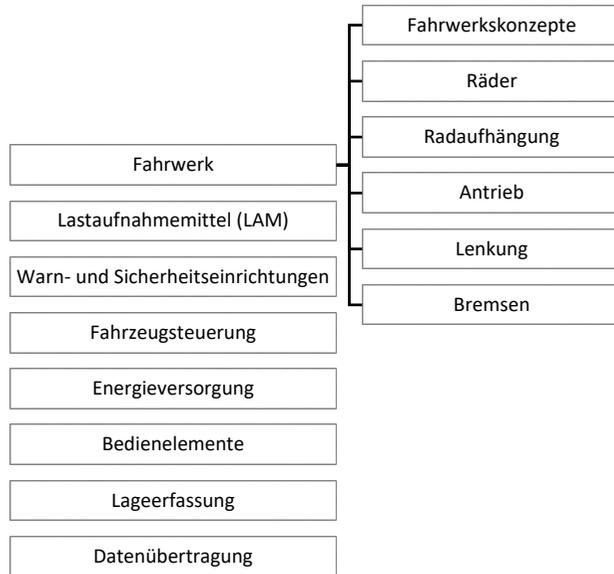


Bild 6.137: Beispielhafte Strukturkomponenten eines Shuttles

Für die Konstruktionsvarianten des Fahrwerkes (nach [VDI 4451]) wurde ein mehrdimensionaler Konstruktionskatalog erstellt – siehe Bild 6.138. Er und die weiteren Komponenten des Antriebes, Bremssystems, Energieversorgung und Lastaufnahmemittel dienen zur Übersicht über die verschiedenen Lösungsprinzipien der Module und zur Gegenüberstellung der wichtigsten Parameter für eine Auswahl.

Gliederungsteil	Hauptteil		Zugriffsteil						Anhang						
	Gebräuchliche Bezeichnung	Bild	Nr	Kippstabilität	Wenderadius	Kostenfaktor	Anforderungen an den Boden	Aufpuffertoleranz	Betrieb auf Schienen	1	2	3	4	5	6
Linienbeweglich	Dreirad		1	--	--	+					[Rak11]-Tab. 3-5		[Rak11]-Tab. 3-6		
	Differentialantrieb mittig		2	+	+	--									
	Differentialantrieb vorne/hinten		3		--	++							[Sch13]-Tab. 9		
	Gegenseitig gekoppelter Lenkantrieb		4		++										
	Achschenkel-lenkung		5			+					[Sch13]-Tab. 9				[Sch13]-Tab. 9
Flächenbeweglich	mehrere unabhängige Fahr-/Lenkeinheiten		6	++							[Rak11]-Tab. 3-5		[Rak11]-Tab. 3-6		
	Differentialantrieb mit Drehachse		7		++			+	+				[Sch13]-Tab. 9		
	Mecanum Antrieb		8			--		--	--	++		[Rak11]-Tab. 3-5	[Rak11]-Tab. 3-6		[Sch13]-Tab. 9

Bild 6.138: Konstruktionskatalog Fahrwerk eines zellularen Fördermittels

Zur einfachen und übersichtlichen Darstellung der unterschiedlichen Verbindungen und -arten zwischen den Elementen des Shuttles wurden im CAM mehrere DSMs erarbeitet. Sie bieten einen Überblick über die vorhandenen Zusammenhänge der folgenden Verbindungsarten. Die vier Arten von Verbindungen ergeben sich aus den Erkenntnissen der allgemeinen Funktionsstrukturierung (Stoff, Energie und Information [ROT00]) angenähert an VDI-Richtlinie 2222 [VDI 2222] und der grundlegenden konstruktiven Strukturierung, in welcher alle Elemente des Shuttles untersucht wurden:

- physische Verbindungen (schwarz)
- mechanische Verbindungen (grün: physisch und mechanisch zur Leistungsübertragung)
- elektrische Verbindungen (rot: Stromversorgung)
- Datenverbindungen (orange und lila)

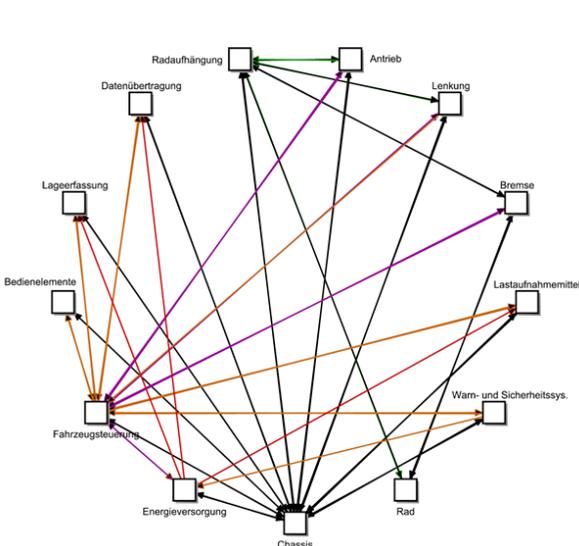
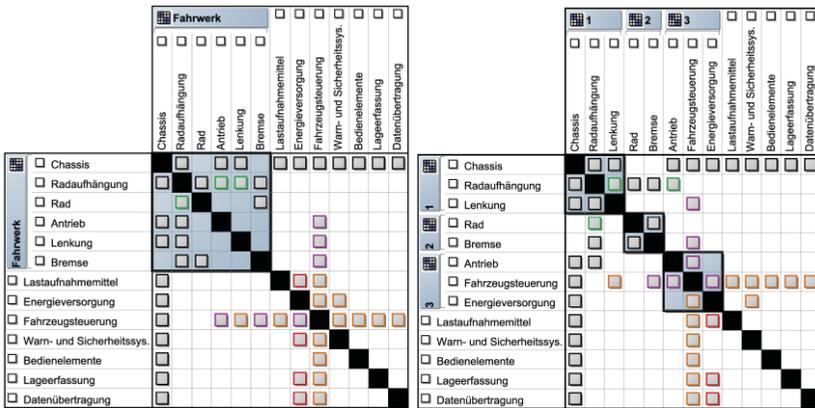


Bild 6.139: DSM (links autom. geclustert) und Verbindungsgraph eines Shuttle-Fahrzeuges

Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Clusterungsmöglichkeiten, die teilweise von der Software automatisch erkannt werden und somit die Struktur für Module und die Modularisierung des Produktes bieten. In Bild 6.139 ist die Abbildung und Analyse der Struktur des Shuttles wiedergegeben. Die Funktionsgruppe bzw. das Modul „Fahrwerk“ wurde darin ebenso automatisch erkannt und geordnet, wie die nicht primär sichtbaren Gruppen Karosserie „1“, Radnabe „2“ und elektrischer Antriebsstrang „3“. Neben dem Überblick über aktuelle ausgeführte Konstruktionen bewährt sich der Einsatz dieses Instruments natürlich im Falle von Änderungen an der Produktstruktur. Bei Entfall oder Hinzukommen neuer Komponenten können sich dann neue Module bzw. Gruppen ergeben, die für die Änderungskonstruktion und deren effektive Produktion erfolgsentscheidend sein können.

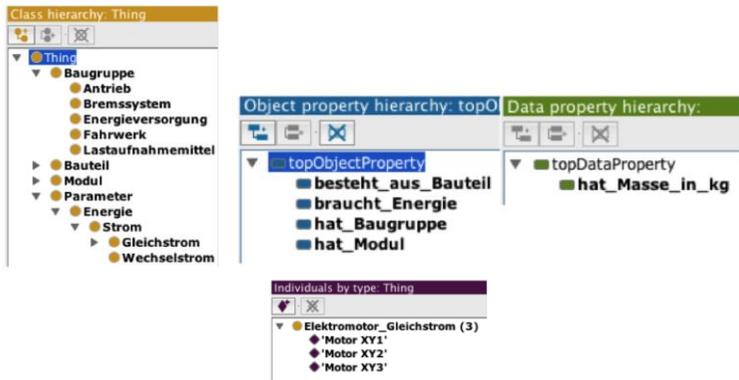


Bild 6.140: Klassen, Beziehungen und Instanzen des Shuttles in Protégé

Wenn man nicht nur die Richtung und Existenz einer Beziehung/Verbindung von Elementen, wie in der DSM, betrachten möchte, sondern auch deren Art relevant ist, kann man Ontologieeditoren verwenden.

Folgende Daten sind dabei enthalten:

- Abbildung der modularen Struktur (physische Verbindungen) des Shuttles
- Beispielhaft Instanzen der einzelnen Elemente mit den wichtigsten Parametern
- Erfüllungsgrad der Elemente basierend auf einer Anforderungsliste
- Gegenseitige Beeinflussung der Elemente durch bestimmte Parameter
- Elektrische, mechanische und Datenverbindungen laut DSM
- Relevante Shuttle-Parameter inkl. Abhängigkeiten der Bauteile davon
 - Reichweite
 - Geschwindigkeit
 - max. Beladung
 - Abmessungen Transporteinheit (TE)
- Kostenfaktor mit Bewertung von 1-10

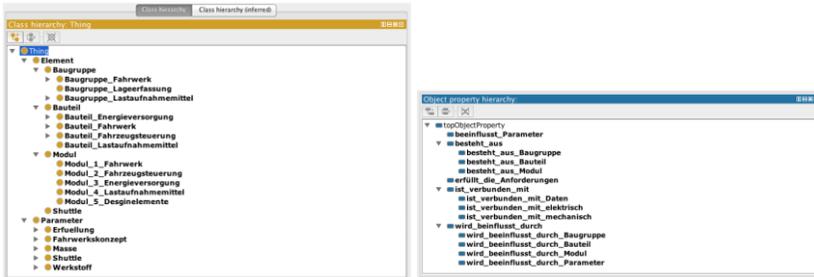


Bild 6.141: Class hierarchy und object property des Shuttles in Protégé

Bild 6.141 links zeigt den hierarchischen Aufbau der elementaren Klasse »things«. Die Klasse wurde in die beiden Unterklassen »Element« und »Parameter« aufgeteilt. Die Klasse »Element« enthält alle physischen Elemente des Shuttles aufgeteilt in Module, Baugruppen und Bauteile. Der modulare Aufbau des Shuttles ist über die Verknüpfungen (Bild 6.141 rechts) der Klasse »besteht_aus« festgelegt. Die weiteren Verbindungen aus den DSM sind durch die Eigenschaften »ist_verbunden_mit« dargestellt. Die gegenseitigen Beeinflussungen, als auch die Beeinflussung einzelner Parameter des Shuttles sind über die Objekteigenschaften »wird_beeinflusst_durch« und »beeinflusst_Parameter« abgebildet. Zusätzlich gibt es noch die Zuordnung des Erfüllungsgrades der Anforderungsliste »erfüllt_die_Anforderungen«.

Mit Hilfe des in Protégé enthaltenen Abfragetools „DL Query“ ist es möglich, die enthaltenen Daten zu durchsuchen. Die Suchergebnisse lassen sich auch in der Ontologie als eigene Klasse speichern. Mögliche Abfragen sind:

- hat_Masse_in_kg
- Bauteil and beeinflusst_Parameter some Reichweite
- beeinflusst_Parameter some Geschwindigkeit
- wird_beeinflusst_durch_Parameter some max_Beladung
- wird_beeinflusst_durch_Parameter some Werkstoff
- ist_verbunden_mit_Daten some „Element“
- Fahrwerkskonzept and erfüllt_die_Anforderungen some Ideal_Erfuellung

Mit DSM und Ontologie kann ein entscheidender Informationsgewinn bei der Betrachtung von Produkt- und Konstruktionsstrukturen technischer Systeme, wie am Beispiel Shuttle gezeigt, erreicht werden. Bei einer durchgängigen Pflege, die leider oft parallel zu bestehenden CAD, PDM/PLM oder ERP-Systemen zu erfolgen hat, kann schnell, flexibel und sicher auf Anforderungen reagiert werden, die Änderungen am Produkt nach sich ziehen.

6.13 KBE und KBx³¹²

Das Knowledge Based Engineering (KBE) System versteht sich als Sammelbegriff für objekt-orientierte Software, künstliche Intelligenz und rechnerunterstützte Problemlösung [TEC12]. KBE-Systeme können als Subkategorie von Knowledge Based Systems angesehen werden. Sie vereinen das reine KBS mit fortschrittlichen Datenverarbeitungsprogrammen und anderen rechnerunterstützten Systemen – auch Computer-aided-X (CAx) genannt [MIL08]. Das „x“ in CAx nimmt dabei die Rolle eines Platzhalters ein, der jeweils für das angewandte Tätigkeitsfeld steht:

- Computer-Aided Design
- Computer-Aided Engineering
- Computer-Aided Innovation
- Computer-Aided Manufacturing
- Computer-Aided Planning
- Computer-Aided Quality assurance
- Computer-Aided Styling
- etc. (vgl. auch Kap. 6.6)

In weiterer Folge wird Knowledge Based Engineering nur mehr im Kontext von rechnerunterstützten Konstruktionsprogrammen, also CAD betrachtet, da KBE hauptsächlich auf den Fachbereich der Konstruktion und Entwicklung abzielt.

Es ermöglicht die Gestaltung einer vollauf technisierten Konstruktion mit bewährten Methoden und Verfahren durch die Speicherung und Verknüpfung von Erfahrung, Geometrie und anderen Daten, die mit der Entwicklung eines neuen Produktes in Verbindung stehen. Dies wird durch die Bereitstellung von Hilfsmitteln und geeigneter Automatisierung von repetitiven Routinearbeiten ermöglicht [BCK+98]. In KBE-Systemen wird das Wissen mehrerer Ingenieursdisziplinen zusammengeführt, was dem Konstrukteur ein interdisziplinäres Arbeiten erlaubt.

„KBE kann heute als die natürliche und logische Ergänzung der rechnerunterstützten Produktentwicklung betrachtet werden. Das Bereitstellen von Wissen durch das CAx-System zum frühestmöglichen Zeitpunkt ermöglicht nicht nur fundierte Entscheidungen, sondern bildet auch die Ergänzung zur vollständigen digitalen Beschreibung des Lebenszyklus eines Produktes (und dort insbesondere der Simulation und Animation des Produktverhaltens). KBE bietet besondere Vorteile, wenn eine Kombination aus Konfiguration, (Ingenieur-)Wissen und Geometrie zur Problemlösung bzw. zur Erfüllung der Aufgabenstellung vorliegt. Das Wissen beinhaltet dabei die Regeln über die Anwendbarkeit und Gültigkeit von Bauteilen und Baugruppen sowie deren Kombination und Positionierung zueinander.“

³¹² Dank für die Mitgestaltung dieses Abschnittes geht an meine Bacheloranden Sarah Dober und Michael Schadler 2012, sowie meinen Diplomanden Stefan Steinkellner 2012 [STE12].

Insbesondere in Belangen der Produktstrukturierung sowie funktionaler und parametrischer Beziehungen zwischen Einzelteilen bzw. Baugruppen kommen diese Regeln zum Einsatz, um das Einhalten von Konstruktionsrichtlinien, Fertigungsbedingungen und Montierbarkeit etc. zu prüfen.“ [VWB+09]

Wird es möglich, Engineering-Prozesse mit ihren Abhängigkeitsbeziehungen zu automatisieren (nicht nur CAD donkeywork), kann ein echter Mehrwert für die Produktentwicklung gewonnen werden. Da die Hauptkosten in der Konzeption festgelegt werden, aber wirklich erst in der Produktion entstehen. Da nach Bild 6.142 und [CP99] in der Konzeptphase lediglich 25% des Entwicklungswissens verfügbar ist, hier aber 75% der späteren Produktkosten festgelegt werden, ist es ein Ziel von KBE, Wissen aus vorherigen Entwicklungen schon für die Konzeption bereitzustellen und dadurch die Variantenvielfalt frühestmöglich zu steigern und die Kostensicherheit zu erhöhen.

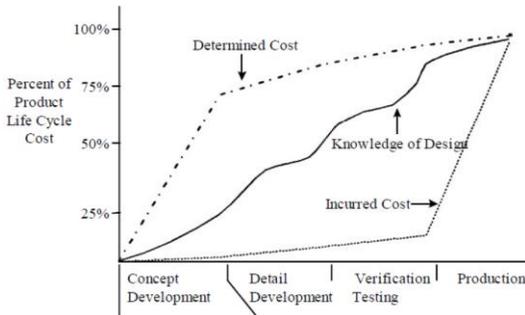


Bild 6.142: Produktkosten mit Zuordnung zum Entwicklungsprozess [CP99]

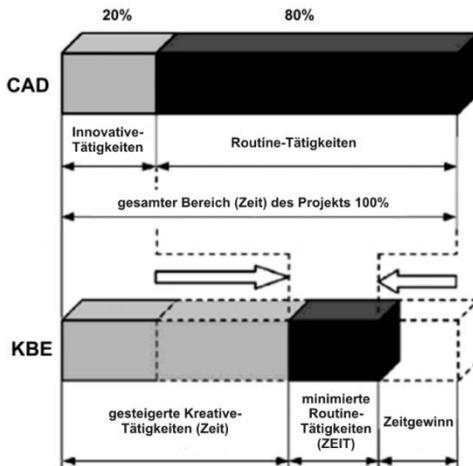


Bild 6.143: Erreichbare Zeiteinsparung durch KBE –Einsatz, nach [VBD+12]

Einer der Hauptvorteile bei der Anwendung von KBE-Systemen ist nun die Automatisierung von nicht-kreativen und sich wiederholender Konstruktionsaufgaben (donkeywork). Die Automatisierung ermöglicht nicht nur enorme Zeit- und Kostenersparnisse, sondern befreit den Konstrukteur auch von monotonen Arbeiten und erlaubt ihm, dadurch sich auf kreative und innovative Konstruktionstätigkeiten zu konzentrieren. Der Konstrukteur benötigt des Weiteren 20% seiner Arbeitszeit mit der Suche nach Informationen, durch die Wissenswiederverwendung von KBE-Systemen erlaubt dieser Ansatz eine weitere Arbeitszeiteinsparung. Bild 6.143 veranschaulicht die Umverteilung der repetitiven Arbeiten zu den kreativen und innovativen Konstruktionstätigkeiten [VBD+12].

Eine quantitative Anführung für die Zeiteinsparung einer KBE-Anwendung liefert [VBD+12]. Dabei wurde im speziellen Anwendungsfall ein KBE-System im Fachbereich Flugzeugbau für eine Flügelkonstruktion, die aus Metallfaserlaminaten besteht, eingesetzt. Für diesen Anwendungsfall benötigt die Entwicklungszeit einer herkömmlichen CAD-Konstruktion sechzehn Mannwochen. Bild 6.144 veranschaulicht die Gegenüberstellung einer herkömmlichen CAD-Konstruktion zu einer KBE-Lösung. Dabei zeigt die Grafik, dass bei sechs Konstruktionszyklen die KBE-Konstruktion mit der herkömmlichen CAD-Konstruktion in ihrem zeitlichen Aufwand gleichgestellt ist. Das anfängliche Zeitdefizit der KBE-Anwendung gegenüber der traditionellen Konstruktion, ergibt sich aus der Erfassung des Wissens und der Erstellung des Codes. Das Bild zeigt, dass bei der Durchführung von zehn herkömmlichen Konstruktionszyklen in derselben Zeit hundert KBE-Konstruktionszyklen ausgeführt werden können. Dies gilt jedoch nur für diesen konkreten Anwendungsfall und kann nicht für jede KBE-Lösung verallgemeinert werden, da das Verhältnis der beiden Konstruktionszyklen sehr stark von anderen Faktoren abhängt, wie z.B. der Komplexität der Konstruktion [EM07].

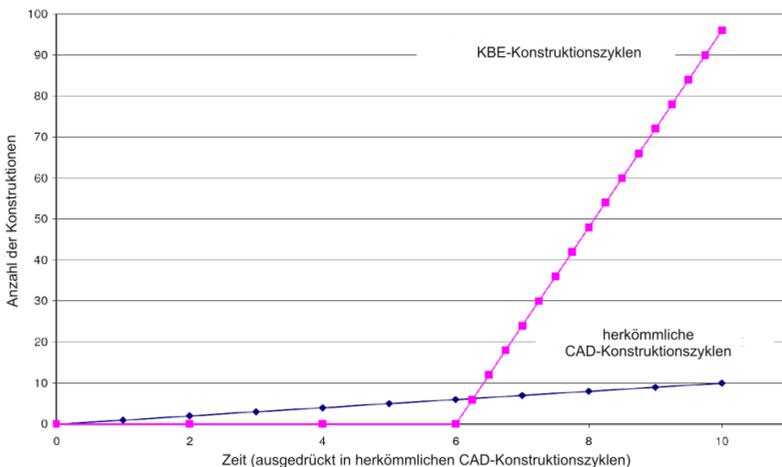


Bild 6.144: KBE-System Entwicklungszeit versus herkömmliche Konstruktionszeit, nach [EM07]

In einer völligen Neukonstruktion entstehen nicht nur lange Entwicklungszeiten, sondern auch besonders hohe Investitionskosten für ein Unternehmen. Nach [CKT06] belaufen sich diese Kosten auf bis zu 75% der gesamten Produktionskosten. Sie können nur gesenkt werden, wenn Wissen effizienter (durch bspw. KBE) verfügbar gemacht wird.

Bild 6.145 verdeutlicht nochmals alle bisher diskutierten Methoden und Ansätze des Wissensmanagements und zeigt, wie dessen grundlegende Bestandteile zusammen mit dem CAD-Programm ein wissensbasiertes Gesamtsystem formen. Zum tieferen Verständnis der wissensbasierten 3D-Modellierung ist es weiters noch wichtig, die Integration des Wissensmanagements im Zusammenhang mit der im Maschinenbau üblichen Konstruktionsmethodik (s. Kap. 6.11.1) zu betrachten. Diesen Zusammenhang stellt Bild 6.146 dar.

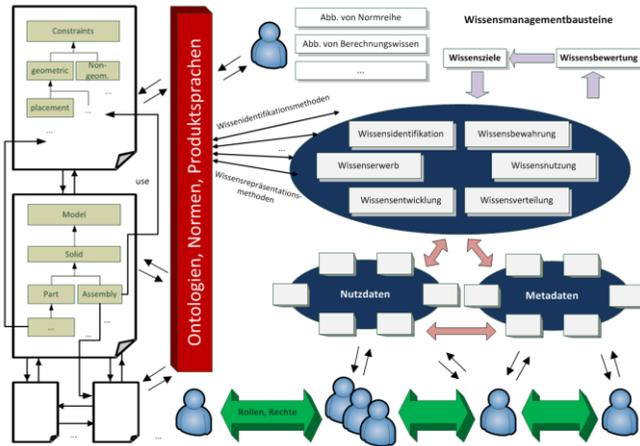


Bild 6.145: Vom Wissensmanagement zum CAD Bauteil [LIE03]

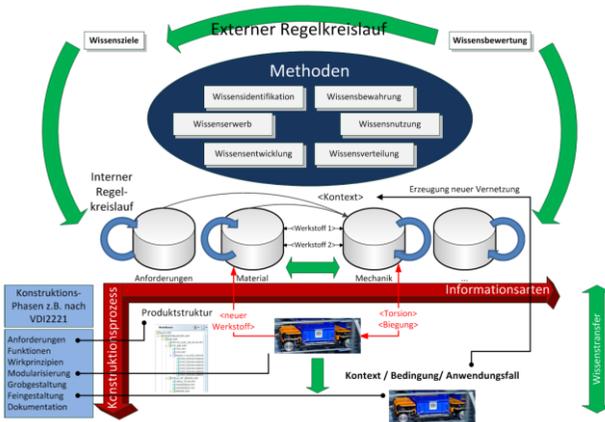


Bild 6.146: Integration des Wissensmanagements in den Konstruktionsprozess [LIE03]

6.13.1 Für und wider den Einsatz des KBE

Einer der wichtigsten Aspekte in heutigen Zeiten für Unternehmen wettbewerbsfähig zu bleiben, ist der richtige Umgang mit der Ressource Wissen, das spezifische Produktwissen eines Unternehmens spielt dabei die tragende Rolle. Bei der Handhabung des Unternehmens-Know-how können sich Fehler einschleichen, die durch eine Anwendung eines KBE-Systems vermieden werden können. Die Einführung und Umsetzung von KBE-Systemen in einem Unternehmen ergibt sich aus verschiedensten Anforderungen und Notwendigkeiten, wie [ALC14] und [ALC12] auflistet – ein Unternehmen mit Erfahrung und Tradition im Entwickeln und Verbreiten von KBE-Lösungen:

- **Unsicherheit:**
Erfahrungen und Dokumentationen aus vergangenen Projekten, Konstruktionsregeln oder Datenbanken werden unzureichend verwaltet, sind schwer zugänglich oder schlicht nicht vorhanden
- **Volatilität:**
Wissen von erfahrenen Fachkräften geht verloren, wenn diese aus dem Unternehmen austreten
- **Aktualität:**
dezentrale Datenbanken überschneiden sich zwangsläufig und sind nie in allen Bereichen auf dem aktuellsten Stand
- **Benutzerfreundlichkeit:**
bisherige (KBE) Systeme sind oft schwer zu benutzen oder deren Inhalt wurde schlecht dokumentiert, sodass er schwer verständlich wird
- **Unordnung:**
Wissen ist wertvoll, zu viel Wissen aber schädlich, daher muss dieses gefiltert, sortiert und geordnet werden und dann dem Nutzer verständlich verfügbar bereitgestellt werden

Wie für die Einführung von Wissensmanagement im Allgemeinen [VDI 5610-1] gilt auch für die Einführung und Verwendung von KBE im Speziellen, dass der Einführungs- und Verwendungsprozess von Management-Ebene herunter bis zum befassen Sachbearbeiter getragen werden muss. Nur bei vorhandener Akzeptanz, den anfänglichen Mehraufwand zu tragen und dadurch in Folge neuartige Entwicklungsperspektiven zu eröffnen, können mit KBE die o.a. Anforderungen erreicht werden.

Die folgende Anführung beinhaltet den unternehmerischen Nutzen, der durch die Anwendung eines KBE-Systems laut [ALC12] erfolgt:

- **Schnelligkeit:**
Eine wertvolle Zeitersparnis durch die Automatisierung von wiederholender und monotoner Routinearbeiten, die andernfalls produktive Arbeitszeit in Anspruch nehmen.
- **Fehlerfreiheit:**
Ermöglicht komplexe Berechnungen fehlerfrei durchzuführen, sowie ein schnelles Nachschlagen in diversen Datenbanken.
- **Kernkompetenzen:**
Der Ingenieur benötigt kein spezifisches Wissen anderer Fachdisziplinen für die Ausführung seiner Aufgaben.

- Einfacher Konstruktionsprozess:
Das Einschreiten des Ingenieurs ist nur mehr bei wenigen Konstruktionsentscheidungen von Nöten, daraus erfolgt eine Vereinfachung des Entwicklungsprozesses.
- mehr Innovationen:
durch den Wegfall von vielen Routineaufgaben kann der Ingenieur mehr Zeit und mehr Kapazitäten in neue Innovationen stecken; außerdem dreht sich das normale Verhältnis der Arbeitszeit, bestehend aus 80% Routinearbeit und 20% Innovationsprozess zu 20% Routinearbeit und 80% Innovationsprozess um.

Die Autoren [AMM08] erwähnen Vorteile sowie einige Nachteile (*) von KBE-Anwendungen, ergänzt durch eigene Erfahrungen und Sichtweisen:

Vorteile:

- Reduktion der Produkteinführungs- und Vorlaufzeiten (*)
- Ermöglicht die Wiederverwendung von kritischem Wissen (*)
- Ermöglicht die gemeinsame Nutzung von Konstruktionen in Echtzeit unter der Verwendung von WWW, HTML und Hyperlinking Protokollen (*)
- Reduktion der Produktionskosten (*)
- Automatisiert wiederholende Arbeiten (*)
- Auch für die Verwendung von Analyse- und Simulationsprozessen geeignet (*)
- Kosten- und Zeitersparnis bis zu 90% (*)
- Ergänzt das traditionelle CAD (*)
- Schneller und breitere Variantenvielfalt bei Anpassungs- und Variantenkonstruktionen mit weniger Iterationen – maßgeschneidertere Produkte möglich
- Bessere Kostenkontrolle durch frühzeitiger vorliegende Produktdetails
- Verbesserung in der Zusammenarbeit durch standardisierte Schnittstellen und Konstruktions- und Berechnungsprozesse
- Vermeidung von Redundanzen und Doppelarbeiten durch erhöhte Transparenz und verbesserte Organisation, ebenso Zeiteinsparung beim Suchen nach Daten und Teilen
- Geringe Einarbeitungszeit
- (Zusätzliche) Erlöse erzielen durch
 - Vermarktung von Wissen als „Dienstleistung“ für Dritte
 - bessere Positionierung der eigenen Produkte im Markt durch schnellere Berücksichtigung der Kundenanforderungen und innovative Produkte
- transparentere Unternehmensprozesse
- Standardisierung bezüglich Anforderungen an
 - Inhalte und Gestaltung von Ergebnissen (z.B. Vorlagen mit Fragen zu benötigten Inhalten)
 - Papier-Ablagen
 - (Projekt-)Erfahrungsberichte

- Standardisierung bezüglich IT-Lösungen durch
 - Vereinheitlichung von Zugriffskonzepten
 - Vereinheitlichung von Suchtechnologien
 - Ablagen auf Laufwerken in einheitlicher Ordnerstruktur (z.B. für Projektverzeichnisse)
 - Datei- und Ordner-Namenskonvention
- systematische Aufbereitung von Erfahrungswissen (z.B. Lessons Learned, Best Practice)
- systematisierte direkte Kommunikation und Austausch mit den Kunden (Foren, Befragungen etc.)

Nachteile:

- Kostenintensive Implementierung (*)
- Benötigt anfänglich viel Zeit für die Erfassung des Konstruktionswissens (*)
- KBE-Anwendungen sind nur gerechtfertigt, wenn ähnliche Probleme mehrmals vorkommen (*)
- Aufwändige Systempflege bei Software-Release-Wechsel
- Hoher Nachpflegeaufwand bei Änderungen an der Produktarchitektur (tritt bei Neu- und Anpassungskonstruktion auf)
- Wissensweitergabe ist ein sensibler Prozess; Mitarbeiter können aus Furcht ersetzbar zu werden Wissen gezielt zurückhalten – gilt für KM im Allgemeinen.
- Die KBE-Systeme können nicht für jedwede Problemstellung im Konstruktionsbereich sinnvoll angewendet werden, die folgende Auflistung enthält laut [VBD+12] einige Beispiele, wann es nicht sinnvoll ist, KBE einzusetzen.
 - Die Konstruktionsaufgabe ist sehr einfach zu modellieren und benötigt wenige Ressourcen, anstatt für diesen Fall eine anspruchsvolle KBE-Anwendung zu entwickeln.
 - Das Unternehmen zeigt keine Bereitschaft oder verfügt über keine finanziellen Mittel um ein KBE-System einzuführen. Heutige Unternehmen neigen dazu, Commercial-Of-The-Shelf (Kommerzielle Produkte aus dem Regal) Lösungen einzuführen und scheuen den Weg eine betriebseigene Software zu entwickeln, welche jedoch für den Einsatz einer KBE-Entwicklung benötigt wird.
 - Der Konstruktionsprozess besteht vorwiegend aus kreativen Prozessen und die Produkte sind starken Änderungen unterworfen.
 - Das Wissen für die angestrebte Anwendung ist nicht vorhanden.
 - Der Konstruktionsprozess kann nicht eindeutig definiert werden, es besteht keine Möglichkeit, die einzelnen Schritte im Konstruktionsprozess abzugrenzen und zu bestimmen.
 - Es herrschte eine ständige Technologieänderung im Konstruktionsprozess.

[VBD+12] gibt fünf Punkte als gefilterte Zusammenfassung eines umfangreichen KBE-reviews an:

1. KBE-Entwicklung ist noch immer situationsangepasst und motiviert, anstelle Entwicklungsprozesse, -methoden und -frameworks zu verwenden. Die Lösungen scheinen improvisiert.
2. Entwicklung von Black-Box-Lösungen, mit kontextlosen Daten und Formeln als Folge von Denkdiskrepanzen zwischen den Wissensinhabern und den Knowledge Engineers.
3. Ein Mangel an Wissenswiederverwendung durch die Arbeitsweisen unter 1. und 2. Dazu ein Mangel aus höherem interdisziplinärem Wissen wie bspw. Supply Chain Wissen.
4. Ein Mangel an quantitativen Kostenbewertungsansätze von KBE Entwicklungskosten und Nutzen.
5. Ein Mangel eines quantitativen Frameworks zur Identifizierung und Beurteilung des geeigneten Einsatzes von KBE.

6.13.2 KBE: Überblick, Ansätze und Entwicklungsziele

Für die bisher realisierten dokumentierten automatischen Konstruktionslösungen existiert weder eine Systematisierung noch eine Klassifizierung derer Möglichkeiten. Folgend werden einige KBE-Systeme gegenübergestellt und zuvor eine Unterscheidung nach Aufwand/Funktionsumfang des Systems getroffen.

6.13.2.1 KBE-Systeme – eine Klassifizierung

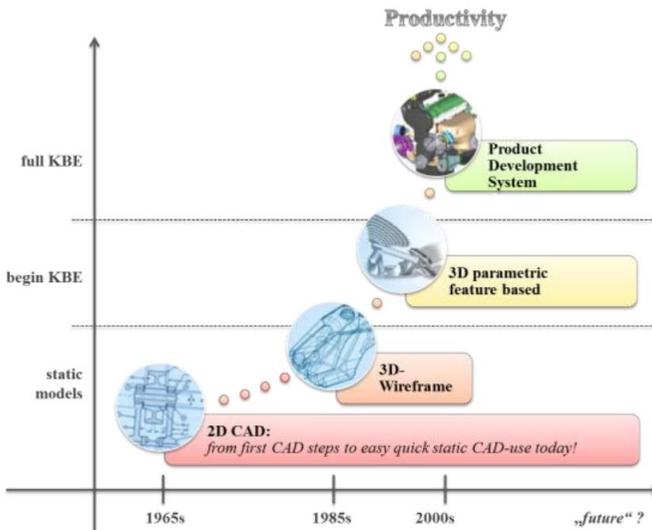


Bild 6.147: Historische Entwicklung von CAD und KBE [P5]

Der Funktionsumfang der KBE-Systemlösungen ist direkt proportional zu den Fortschritten der Datenverarbeitungstechnik, was Bild 6.147 darstellt. In den 1980er Jahren wurden bereits in der 2D-CAD-Technik simple Konstruktionsaufgaben durch einfaches kopieren und wiederverwenden vereinfacht. Der nächste Schritt in der Konstruktionsautomatisierung war die berechnungsgesteuerte Feature-Technologie, dabei wurden Wellengeneratoren und Schraubenberechnungstools eingesetzt, die hinterlegte Dimensionierungsberechnungen enthielten. Als in den 1990er Jahren die parametrische Konstruktion aufkam, war es möglich die ursprünglichen „statischen“ Parameterauslegungen einfach zu adaptieren und die hinterlegten Teilebibliotheken wurden durch Parametertabellen angesteuert, die auf einem parameterautomatisierten Berechnungsprozess basieren. Dadurch war eine Anpassungskonstruktion durch die Ansteuerung von Parametern möglich, diese Vorgehensweise wird auch heute noch in vielen Konstruktionsbüros so praktiziert.

Nach [VWB+09] sind Beispiele für bereits existierende Formen von KBE:

- „wissensbasierte Parametrik, bei der im Unterschied zur „reinen“ Parametrik, bei der überwiegend Dimensionsparameter die treibende Kraft für die Geometrie sind, das Wissen in Form von Konstruktions- und Konfigurationsregeln die Geometrie bestimmt. Konstruktionsregeln beinhalten dabei sowohl geometrische und nicht-geometrische Regeln als auch Prüfregele Grundsätzlich hat ein Anwender die Möglichkeit, die Regeln sowohl direkt im Modell (adoptiver Ansatz) als auch in einer externen Datei (generativer Ansatz) zu verwalten. Beim generativen Ansatz werden alle Konstruktionsregeln inklusive der geometrischen Informationen in einer externen Datei gespeichert. Beim adoptiven Ansatz werden Bestandteile der Modellgeometrie wie Komponenten, Konstruktionsfeatures oder Linien in das Regelwerk übernommen (adoptiert), die dann mit Hilfe von Konstruktionsregeln verknüpft werden. Die Regeln werden in diesem Fall direkt in der Modelldatei gespeichert.
- erweiterte Features, die nicht nur die Geometrie eines Produktes, sondern durch hinterlegtes Produktwissen auch seine Funktion und weitere Eigenschaften modellieren können ... oder zur Lösung von Auslegungsproblemen eingesetzt werden.
- „intelligente“ Komponentenkataloge aus dem Internet, die nicht nur die Auswahl eines Produkts anhand von Problembeschreibungen ermöglichen, sondern auch seine Geometrie in das CAx-System des Anwenders laden sowie die Angebots- und Auftragsbearbeitung weitgehend unterstützen können.
- wissensbasierte Produktkonfigurierer, die neben den einzelnen kombinierbaren Komponenten auch die zur Kombination notwendigen Regeln enthalten und die auf dieser Basis ein Produkt widerspruchsfrei konfigurieren können.

Die wissensbasierte Produktkonfiguration geht davon aus, dass ein Teil der durch interaktives Modellieren erstellten individuellen Produkte große Ähnlichkeiten zu Standardprodukten aufweist, die beispielsweise mit Parametrik erstellt worden sind. Damit ist es möglich, die entsprechenden Regeln in ein KBE-Werkzeug zu formulieren.

Das führt dazu, dass weitaus mehr Produkte als vorher rechnerunterstützt und weitgehend automatisiert erstellt werden können. Im Gegenzug erhält der Produktentwickler mehr Freiraum für die Modellierung von individuellen Lösungen.“ Bei den Aufgaben der Produktkonfiguration in Verbindung mit intelligenten Komponentenkatalogen sind Parallelen zur automatisierten Layout-Planung (KBL) aufzeigbar und konfigurierbare Produktdetails werden zu konfigurierbaren Objekttypen (s. Kap. 6.13.3).

Bei den gegenwärtigen KBE-Systemen kann man zwischen zwei unterschiedlichen KBE-Ansätzen unterscheiden [P5]:

- Zum einen gibt es die **full-KBE-Lösung**, die mit einer Spezialsoftware umgesetzt wird, welche vor allem in der Flugzeug- und Fahrzeugindustrie eingesetzt wird (bspw. MOKA, KOMPRESSA, ... s. unten) und ggf. nur zur Visualisierung des CAD benötigt.
- Zum anderen gibt es die KBE-fähigen **augmented CAD-Systeme**. Hierunter fallen parametrische CAD-Baugruppen, die durch übergeordnete Berechnungstools, wie MS EXCEL, MathCad, MATLAB oder selbstständige VB-Programme generiert werden können, oder direkt im CAD generiert werden.
Es muss von Spezialsoftwareprodukten der CAD-Hersteller abgegrenzt werden, wie z.B., der Hersteller CATIA mit Knowledge Ware oder NX mit Knowledge Fusion, die eine Reihe der eigenständigen KBE-Lösungen darstellen.

Der Nachteil von augmented KBE-Lösungen besteht in der „statischen“ Wissensformulierung, weshalb eine Kommunikation mit Wissensmanagementsystemen nur begrenzt umzusetzen ist. Das erfasste Wissen steht nur innerhalb des CAD/KBE-Systems zur Verfügung. Jedoch haben diese Systeme einen geringeren Implementierungsaufwand mit oft nicht unbedingt userfreundlichen Skript-Sprachen, wohingegen die full-KBE-Lösungen stets in Programmierhochsprachen realisiert sind. Für die vorliegenden eigenen Ansätze soll im Bereich augmented CAD-Systeme festgemacht werden mit dem Ziel, das erfasste Wissen außerhalb des CAD-Systems zur Verfügung zu stellen; das ist der Hintergrund der xKBE-app (Kap. 6.14.2).

Mit all diesen Faktoren ist es immer eine Entscheidung unter Berücksichtigung des intellektuellen und finanziellen Aufwands, abzugrenzen, welche Funktionen bedingt und welche unbedingt nötig im KBE zu Gunsten oder Laster manueller Nacharbeitungsaufwands umzusetzen sind. Ein Investment in full-KBE-Lösungen ist heute nur im automotive- und aerospace-Bereich erkennbar (und publiziert; die „Dunkelziffer“ nicht publizierter KBE-Lösungen v.a. des Bereichs augmented-KBE ist hoch), da die Branchen zu schneller Innovation und kurzen Produktlebenszyklen gezwungen werden. So kann von [MIL08] zitiert werden: „Jaguar cars reduced the design time for an inner bonnet from 8 weeks to 20 minutes.“ „British Aerospace reduced the design time of a wing box from 8000 hours to 10 hours.“

6.13.2.2 Überblick KBE-Systeme und Methoden zur KBE-System-Entwicklung

Die im Folgenden gelisteten Ansätze sind in der Literatur dokumentiert und relevant für full-KBE Lösungen; [STE12] gibt eine detailliertere Zusammenfassung als hier wieder.

MOKA

Wird aufgrund vieler Systeme, die darauf aufbauen, hier ausführlicher beschrieben. Die Abkürzung MOKA steht für Methodology Oriented to Knowledge-based Engineering Applications. MOKA war ein europäisches Forschungsprojekt und sollte als Gerüst für die Strukturierung und Repräsentation von Ingenieurwissen dienen. Dabei wurde das Einsatzfeld einer Knowledge-based Engineering Anwendung vorwiegend auf die Automobil- und Flugzeugindustrie festgelegt [MOK12a].

MOKA-Hauptaspekte

Das MOKA-Projekt umfasste die folgenden Hauptaspekte:

- Die Reduktion der Einführungszeit und die damit verbundenen Entwicklungskosten einer KBE-Anwendung um 20-25%:
Die primären Kostenkomponenten zur Entwicklung einer KBE-Anwendung, sind die Aufgaben zur Erhebung und Formalisierung des Wissens innerhalb eines bestimmten Fachbereiches. Das, mit dieser Aufgabe beauftragte, Personal besitzt oft nicht das notwendige Know-how für die Erfüllung dieser Anforderungen. Das führte dazu, dass viele KBE-Programme von Drittunternehmen erstellt wurden. Deswegen hat sich das Projekt MOKA auf die zwei folgenden Punkte konzentriert [MOK12b]:
 - Die Entwicklung eines strukturierten Gerüsts, welches den Anforderungslevel für die Erfassung und Formalisierung eines Fachbereiches reduziert.
 - Die Veranschaulichung des MOKA Softwaretoolpotentials bei der Erstellung eines KBE-Codes [MOK12b].
- Die Verwendung eines konsistenten Weges zur Entwicklung und Wartung einer KBE-Anwendung:
Es sollte einfacher werden, bestehende Modelle zu modifizieren oder bereits erarbeitete Lösungen für neue Projekte zu verwenden. MOKA sollte die Modularisierung der Arbeit erleichtern und einheitlichere Ergebnisse von verschiedenen Entwicklergruppen liefern [MOK12b].
- Die Entwicklung einer Methode, die die Grundlage für den internationalen Standard bilden soll:
Das Ziel dieses Projektes war es, industriellen Anwendern eine formalisierte Methodik zur Analyse und zur Modellierung von Produkten zu liefern. Dabei sollen die Konstruktionsprozesse mit ihrem hinterlegten Wissen die Kenntnisse eines Unternehmens repräsentieren. Die Methodik soll in der gesamten Industrie gefördert werden und soll als Normungsgremium dienen [MOK12b].

- Die Bereitstellung eines Softwaretools zur Unterstützung der Methodik: Die MOKA-Methodik liefert einen systematischen Denkansatz für die Entwicklung von KBE-Anwendungen. Die Entwicklung einer KBE Anwendung ist meist eine komplexe Aufgabe, in Verbindungen stehen damit Managementbereiche, Regeln und Beschränkungen. Daher ist es wesentlich, dass das Softwaretool die Methodik benutzerfreundlich unterstützt [MOK12b]. Die Anforderungen an das Softwaretool beinhalten:
 - Unterstützung bei der Anwendung der Methodik
 - Überprüfung der Modellkonsistenz
 - Erleichterung der Iterationen bei der Anwendung des Entwicklungszyklus
 - Verbesserung der Softwarequalität

Das Softwaretool ermöglicht den Entwicklern, die Methodik auf die effizienteste Art zu nutzen und verkürzt dabei die Entwicklungszeit. Die Phase der Wissenswartung wird ebenso verbessert [MOK12b].

Eines der wichtigsten Ergebnisse des MOKA Projekts war die Definition des sogenannten KBE-Lebenszyklus, der einen detaillierten Leitfaden für die Entwicklung einer KBE-Anwendung liefert. Angefangen bei der Identifikation der Möglichkeit einer KBE-Entwicklung bis zum Einsatz der KBE-Anwendung im Unternehmen. Die vier Hauptphasen des KBE-Lebenszyklus dargestellt sind (Details dazu siehe Bild 6.148):

- Problem- oder Möglichkeitenidentifikation
- Wissenserfassung und -formalisierung
- Bündelung
- Einsatz
-

Für den Prozess der Erstellung eines KBE-Systems wurde eine Methodik entwickelt, die v.a. den Knowledge-Engineer unterstützen soll. Diese MOKA-Methodik zur KBE-System-Erstellung gliedert sich in sechs Phasen bzw. Schritte:

1. Identifizieren:
Festlegen von Umfang und Verwendungszweck der KBE-Lösung mit Bewertung der technischen Realisierbarkeit.
2. Abgleichen:
Risikobewertung, Kosten- und Aufwandsschätzung (Ressourcen) und Entwicklung von Geschäftsmodellen.
3. Erfassung:
Wissenserfassung von den Wissensträgern zur Erstellung eines informellen Modells als strukturierte Repräsentation des Wissens. Dieses informelle Modell kann zur Verwendung eines Knowledge Management (System) verwendet werden und besteht aus einem informellen Produktmodell und einem informellen Prozessmodell.
4. Formalisierung:
Die Formalisierung verwendet das informelle Modell des Erfassungsprozesses um ein formelles Modell zu erstellen. Dazu bedarf es einer grafischen, objektorientierten Repräsentation des Engineering-Wissens eine Ebene über dem Programm-Anwendungscode, formuliert bspw.

In einer Modellierungssprache wie MML (MOKA Modeling Language). Das formelle Produktmodell spezifiziert die Wissensaspekte des informellen Modells mit unterschiedlichen Sichtweisen, fokussierend auf Struktur, Funktion, Verhalten, Technologie und Geometrie. Das Designprozessmodell ist das Prozessmodell der KBE-Lösung mit Berücksichtigung der Randbedingungen und des Software-Systems sowie den unterschiedlichen zu Rate gezogenen Spezialisten des gesamten Prozesses.

5. **Package:**
Bedeutet Erstellung, Testung und Debugging des Codes des formellen Modells.
6. **Aktivierung:**
Bedeutet die Einführung des KBE-Systems in seinem geplanten Verwendungsbereich bei den End-Usern mit unterstütztem Training.

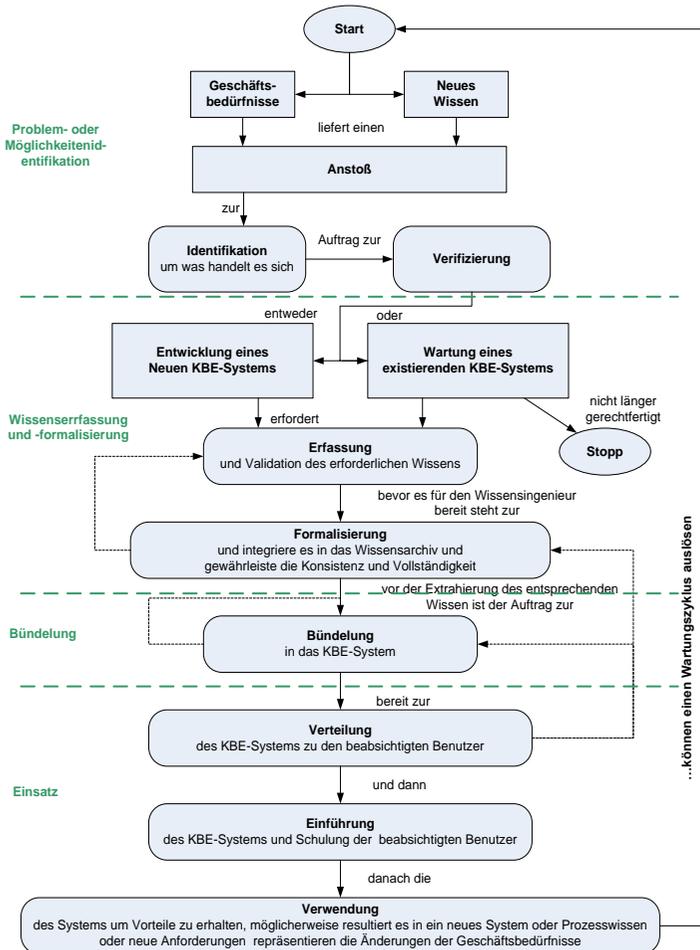


Bild 6.148: Spezifizierung der vier Hauptphasen (angelehnt an[ROC12])

Das **informelle Modell** unterstützt die Sammlung und Strukturierung von komplexem Wissen. Dabei bietet es ein nützliches Kommunikationsgerüst zwischen den Wissensingenieuren und den Domänenexperten. Alle Elemente des informellen Modells können zur ursprünglichen Wissensquelle verknüpft werden. Das informelle Modell besteht aus den fünf ICARE Vorlagen, welche wie folgt lauten und in Bild 6.149 dargestellt werden [MOK12b].

- Illustrations (Darstellungen) repräsentieren das generelle Wissen z.B.: Übersicht, Beschreibung oder Kommentar
- Constraints (Beschränkungen) dienen zur Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den Entitäten
- Activities (Aktivitäten) beschreiben die verschiedenen Problemlösungsschritte im Konstruktionsprozess
- Rules (Regeln) erlauben die Modellierung von Steuerungswissen
- Entities (Entitäten) beschreiben die Produkt Objekt-Klassen [MOK12c]

Die ICARE Vorlagen in dem informellen MOKA Modell können untereinander in Verbindung gesetzt werden und bieten dadurch ein reichhaltiges Repräsentationsnetzwerk für das strukturierte Wissen. In Bild 6.149 kann man die verschiedenen Grafikarten sehen die zur Hilfe herangezogen werden um die Beziehungen der ICARE Vorlagen zu visualisieren [MOK12c]. Das informelle Modell umfasst zwei miteinander verbundene Modelle:

- Das **informelle Produktmodell**:
Die Struktur des Produktes wird so abgebildet, dass die Beschränkungen und Funktionen mit jedem Bauteil verbunden sind.
- Das **informelle Prozessmodell**:
In jeder Phase sind die Aktivitäten inklusive der Regeln, die vom Konstrukteur ausgeführt werden, erfasst und dargestellt [MIL08].

Das **formelle Modell** hat rigorosere Anforderungen zu erfüllen als das informelle Modell. Formales Wissen muss in einer Art und Weise digitalisiert werden, dass auf die beabsichtigte Bedeutung des Wissens Rückschlüsse gezogen werden können. All die Konsistenzanforderungen, welche in einer Domäne und bei der Modellierung angewendet werden, müssen durch das formelle Modell erfüllt werden. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen zur Folge [MOK12d]:

- Das formelle Modell muss in einer einheitlichen und computerverständlichen Form repräsentiert werden.
- Welche die große Vielfalt des Wissens und ihre Aspekte in einem differenzierten Weg darstellen.

Für die Erstellung des formellen Modells wird das informelle Modell als Eingabebasis zur Wissensrepräsentation verwendet. MOKA benützt eine eigene Sprache für die Entstehung des formellen Modelles, die den Namen MOKA Modelling Language trägt. Die MML ist eine graphisch objektorientierte Repräsentation des Ingenieurewissens und steht eine Ebene über den Anwendungs-codes.

Das formelle Modell beinhaltet zwei unterschiedliche Modelle [MIL08]:

- Das **formelle Produktmodell**:

Wird für die Spezifizierung der verschiedenen Eigenschaften der Wissens Elemente innerhalb des informellen Modells verwendet. Dabei werden die fünf Ansichten wie, Funktion, Verlauf, Struktur, Repräsentation und Technologie eingesetzt, die ihren Ursprung in der MML haben.

- Das **Design-Prozessmodell**:

Dies ist der Ablaufprozess des KBE-Systems und beinhaltet die Beschränkung der Anwendung, des Betriebssystems, die gewählte Programmiersprache und die Spezialistentypen, die in dem Prozess involviert sind [MIL08].

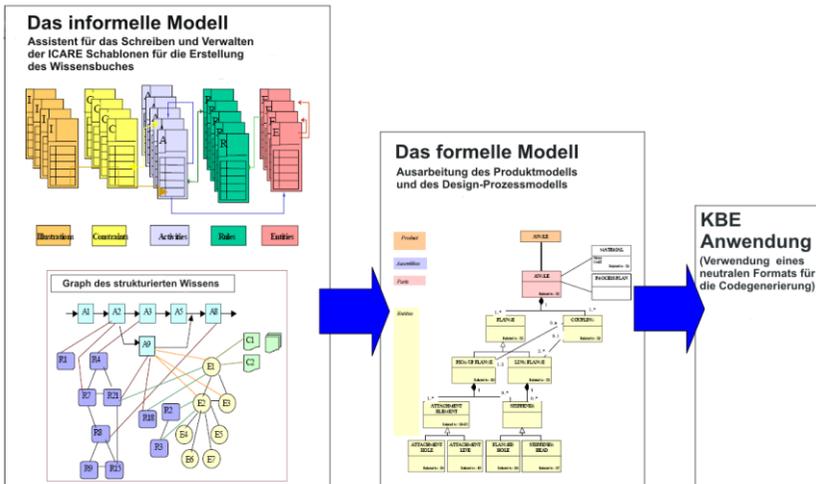


Bild 6.149: Die Wissensverarbeitungskette von dem informellen zum formalen Modell, nach [MOK12d]

Damit ein formelles Modell erstellt werden kann, benötigt der Benutzer eine formelle **Modellierungssprache**. MOKA hat sich für die UML Unified Modelling Language entschieden, da sie in der Industrie die führende Rolle der objekt-orientierten Modellierungssprache einnimmt. Ein weiterer Vorteil der UML besteht darin, dass die Softwareentwickler mit dieser Sprache sehr vertraut sind. MOKA gewährleistet, dass dadurch bewährte Praktiken zum Einsatz kommen. UML ist eine universelle Sprache. Um die Entwicklung von KBE-Anwendungen besser unterstützen zu können, wurde eine eigene Sprache entworfen. Das Ergebnis war die **MOKA Modeling Language MML**, eine graphisch objekt-orientierte Modellierungssprache, die auf der UML basiert. Damit kann das konstruktive Ingenieurwissen von KBE-Anwendungen auf einer Benutzerebene repräsentiert werden. MML erbt all die Modellierungsfähigkeiten der UML, dadurch kann der Benutzer bei auftretenden Fehlern auf die Standards der UML zurückgreifen. MML liefert ein Gerüst zur Erstellung von Modellen [MOK12e]. Die MML bietet einen Ratgeber innerhalb der KBE-Entwicklung. Sie ist weder in der Definition noch in der Anwendung starr.

MML nimmt bewährte Praktiken von vordefinierten Klassen, Assoziationen und Attributen ein. Diese Elemente ermöglichen dem MML-Benutzer einen

strukturierten und logischen Weg für die Modellierung. Ziel ist es, ein Gerüst und einen Leitfaden für den Modellierer zu bieten, der die Verwaltung zur Erstellung und Erfassung von Modellierungspraktiken ermöglicht und nicht vorschreibt, was modelliert werden kann und was nicht. Es ist eine Erweiterung der UML und dem Benutzer steht es frei, ob er auf der UML-Ebene arbeitet, falls es erforderlich ist. Der Benutzer hat die Alternative die Kern MML-Definitionen zu erweitern, damit maßgeschneiderte Lösungen angefertigt werden können. Die Kernelemente der MML sind die Produktmodellierung und die Prozessmodellierung. Die Beschreibung der beiden Modellierungen erfolgt darunter [MOK12f].

Der **MOKA Designprozess** beschreibt die Schritte zur Realisierung der Produktmodellinstanz, die von einem Produktmodell abgeleitet werden. Er definiert die Lösung der Produktauswahl, die den Produktbeschränkungen unterliegen und in welcher Reihenfolge die Konstruktionsschritte und Konstruktionsentscheidungen ausgeführt werden sollen. Die MML Prozessmodellierung umfasst die Punkte statische und dynamische Prozesse, das Prozessmodell sowie die Prozessdiagramme [MOK12e].

Der Ablauf wie Konstruktionsaktivitäten durchgeführt werden sollen, ist nicht immer fixiert und verfolgt unterschiedliche Strategien. MOKA unterscheidet hier zwischen dem statischen (entspricht den konstruktionsmethodischen Vorgehensweisen der Art nach) und dem dynamischen Konstruktionsprozess [MOK12e].

- **Statischer Konstruktionsprozess:**
Beim statischen Konstruktionsprozess ist die Reihenfolge der Aktivitäten fix festgelegt, d.h. vordefiniert.
- **Dynamischer Konstruktionsprozess:**
Beim dynamischen Konstruktionsprozess wird die Reihenfolge der Ausführungen nicht fixiert, sondern wird erst während der Laufzeit bestimmt.

Das **Prozessmodell** ist das zugrundeliegende Metamodell des Prozesses, unabhängig von der Informationsart werden sie dem Benutzer präsentiert. Es erfasst die Aktivitätenzerlegung, den seriellen und parallelen Ausführungsablauf, den Verzweigungsgrad, die Synchronisierung, den statischen und dynamischen Prozess. Das UML Aktivitäten Modell wurde um die zwei neuen Klassen Verbindungsaktivität und Elementaraktivität erweitert. Verbindungsaktivität ist eine Spezialisierung der UML-Klassen und wird als Aktivitätenphase bezeichnet, die für die Repräsentation der Phase verwendet wird und eine Reihenfolge von Aktivitäten beinhalten. Elementaraktivitäten sind eine Spezialisierung der UML-Klassen und werden als Aktionsphase bezeichnet, die für die Repräsentation der Phase verwendet wird und die eine Einzelaktivität beinhalten [MOK12e].

Die **Prozessdiagramme** können in unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten die Konstruktionsprozessmodelle für den Benutzer repräsentieren. Ein naheliegender Ansatz ist es, Klassendiagramme wie bei dem Produktmodell zu verwenden. Sie repräsentieren die Aktivitäten und Abläufe in einer ähnlichen Art und Weise wie es bei Flussdiagrammen üblich ist. Der Klassendiagrammansatz wird nicht von MOKA empfohlen, kann aber bei Tools, die die Aktivitätsdiagramme nicht unterstützen, eingesetzt werden [MOK12e].

Die KOMPRESSA-Methodik wurde im Zuge des Projektes REFIT im Jahre 1999 von der Coventry Universität entwickelt. Die Abkürzung KOMPRESSA bedeutet Knowledge-Oriented Methodology for the Planning and Rapid Engineering of Small-Scale Applications. Der Projektname REFIT steht für Revitalisation of Expertise in Foundries using Information Technology. Ziel des Projektes ist es, die Wettbewerbsfähigkeit von klein- und mittelständischen Unternehmen in der Gießereiindustrie zu verbessern. Die Prinzipien und Praktiken, die bei REFIT zum Einsatz kommen, eignen sich auch für andere Fachbereiche im Ingenieurwesen [BIL00]. KOMPRESSA bietet [SLI12]:

- Richtlinien für die Analyse, um die Aktivitäten des Produktes zu strukturieren.
- Anleitungen für die Konstruktion, um die Praktiken zu standardisieren und die Wiederverwendbarkeit zu verbessern.
- Formate für die Modellierung, um das komplexe Wissen zu repräsentieren, manipulieren und zu verwalten.
- Techniken für die Implementierung, um die Fähigkeiten von erfahrenerem Personal auf neue Mitarbeiter zu übermitteln.
- Hinweise für die Dokumentation, um die Planung, Überwachung und die Steuerung zu unterstützen.

DEE

Die Design und Engineering Engine kurz DEE ist ein erweitertes Konstruktionsgerüst und wurde von der Gruppe für Flugperformance und Antrieb an der TU Delft im Jahre 2002 entwickelt. Dabei wird der Konstruktionszyklus in Synthese, Analyse und Bewertung aufgeteilt, diese sind in ein formelles Gerüst für die Unterstützung der Konstruktionsaktivitäten von multidisziplinären Konstruktionsoptimierungen eingegliedert [COO11].

KNOMAD

Die Abkürzung KNOMAD steht für Knowledge Nurture for Optimal Multidisciplinary Analysis and Design. Da die MOKA-Methodik nur darauf abzielt, eine KBE-Anwendung zu entwickeln und nicht dafür bestimmt ist, eine größere multidisziplinäre Konstruktionsanwendung wie die DEE abzudecken, wurde die KNOMAD-Methodik an der TU Delft entwickelt. Während MOKA für jegliche KBE-Anwendungsentwicklungen eingesetzt werden kann, ist die KNOMAD-Methodik speziell für die Unterstützung des DEE-Konzeptes entwickelt worden [COO11]. Für eine analytische Verwendung eines multidisziplinären Ingenieurwissens innerhalb des Konstruktionsprozesses sind für die KNOMAD-Methodik folgende Merkmale entscheidend [CLT+10]:

- Ein Ansatz für eine multidisziplinäre Konstruktionsoptimierung.
- Eine Vorgehensweise für Wissenserfassung und –formalisierung.
- Eine signifikante Begründung der Methodik-Phasen beinhalten Beispiele, Tools und Techniken.
- Eine ausreichende Flexibilität und Skalierbarkeit für die disziplinspezifische Anwendung, z.B., könnte die Fertigungsdisziplin ein Anwendungsfall für die Instanziierung einer neuen Methodik sein.

MDE

Da die Erstellung einer KBE-Anwendung sehr softwarelastig ist, wurde noch das Model Driven Engineering betrachtet. Dabei handelt es sich um eine automatische Programcodegenerierung zur Softwareentwicklung aus einem zuvor festgelegten Modell. Die Methode ist den Wissenschaften der Informationstechnik zuzuordnen. Synergie für das KBE sind nicht relevant identifizierbar.

CommonKADS

CommonKADS ist die führende Methodik zur Unterstützung von Knowledge-based Systems bzw. Expertensystemen. Sie wurde von vielen Unternehmen und Universitäten im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms ESPRIT entwickelt und getestet. CommonKADS bildet den europäischen Standard für die Knowledge-based Systems-Entwicklung und wurde in europäischen, amerikanischen und japanischen Unternehmen eingesetzt. Sie liefert ebenso eine Methode für eine detaillierte Analyse der Wissensaufgaben und der Prozesse. CommonKADS stammt aus dem KADS-I-Projekt, KADS steht für Knowledge Acquisition Design System und baut die Knowledge-based Systems im Grunde durch Modellierungsaktivitäten auf. Eines der wichtigsten Merkmale von KADS ist, unabhängig von der Implementierung, die Erstellung eines vollständigen Wissensmodelles [COD09].

Die CommonKADS-Methodik beinhaltet eine Modellreihenfolge, die den Kern des wissensbasierten Systems bildet. Die Modelle werden in drei Gruppen untergliedert, da es im Wesentlichen drei Arten von Fragen gibt, die beantwortet werden müssen [GUU02]:

1. Warum?
Warum ist ein Wissenssystem eine mögliche Hilfe? Für welches Problem? Welche Vorteile, Kosten und organisatorische Auswirkungen hat es?
Das Verstehen des organisatorischen Umfeldes ist in diesem Punkt das Wichtigste.
2. Was?
Was für eine Art und Struktur von Wissen ist involviert? Was für eine Art und Struktur der dazugehörigen Kommunikation herrscht vor? Die Hauptaufgabe dieses Punktes ist die konzeptionelle Beschreibung des Wissens in einer angewendeten Aufgabe.
3. Wie?
Wie muss das Wissen in einem Computersystem implementiert werden? Wie sehen die Software-Architektur und die rechnerischen Mechanismen aus? Dieser Punkt betrachtet schwerpunktmäßig die technischen Aspekte der Computerrealisierung.

Die Modellreihenfolge von CommonKADS beinhaltet das Organisations-, das Aufgaben-, das Agenten-, das Wissens-, das Kommunikations- und das Konstruktionsmodell.

6.13.2.3 Bewertung und Vergleich der KBE Methodiken

Die KBE-Methodiken von oben werden in der folgenden Matrix (Tabelle 34) hinsichtlich einiger Kriterien bewertet, des Weiteren erfolgt ein Vergleich der Methodiken bezüglich ihrer Ähnlichkeiten und Unterschiede.

Die Methodiken KOMPRESSA und MOKA sind in ihrem Ablauf sehr ähnlich, sie wurden auch ungefähr zum selben Zeitpunkt entwickelt. Die Risikoanalyse ist bei KOMPRESSA gegenüber von MOKA detaillierter ausgeführt. Des Weiteren werden bei KOMPRESSA vermehrt Aktivitätsdiagramme für die organisatorische Leitung eingesetzt. Literatur über die KOMPRESSA-Methodik ist nur in sehr geringem Ausmaß vorhanden, was eine Beurteilung der Methodik erschwert [VBD+12].

Tabelle 34: Bewertungsmatrix der KBE-Methodiken [STE12]

	MOKA	KOMPRESSA	DEE
Dokumentation	+	-	+
Aktualität	-	-	+
Wissenserfassung	+	+	-
Theorielastigkeit	-	~	-
Multidizipl. Ansatz	-	-	+
Praxisanwendung	-	-	~
EDV-lastig	-	~	-
Realisierungsaufwand	-	~	-

+ sehr gut

~ befriedigend

- mangelhaft

Die Wissenserfassungs- und Normierungsphase von KNOMAD weisen starke Ähnlichkeiten mit der Phase „Problem- und Möglichkeitenidentifikation“, sowie der Wissenserfassung von MOKA auf. Der Unterschied zwischen MOKA und KNOMAD ist der multidisziplinäre Ansatz von KNOMAD in der Modellierungs- und Analysephase. Zusätzlich bietet KNOMAD gegenüber MOKA in der Normierungsphase eine genauere Qualitätsprozedur bei der Wissenserfassung [CLT+10].

Die Ähnlichkeit zwischen den Methodiken KNOMAD und DEE besteht darin, dass KNOMAD den Multi-Model Generator (MMG) von DEE übernommen hat. Zusätzlich wurde die Kommunikationsverknüpfung zwischen der Modellierungs-, Analyse- und Bereitstellungsphase von der DEE-Methodik adaptiert. KNOMAD unterscheidet sich von DEE durch die explizite Wissenserfassung, -normierung und -organisation. Zudem ist die Phase Bereitstellung der KNOMAD- Methodik gegenüber der DEE-Methodik ausgereifter [CLT+10].

Der Multi-Model Generator (MMG), der KNOMAD- und DEE-Methodik beinhaltet die gesamte Wissensformalisierung von der MOKA-Methodik, sprich das Formelle Modell von MOKA inklusive der MLL [CLT+10], [PIC12].

Die einschlägige Engineering-Monographie-Literatur behandelt das Thema KBE nur am Rande [FEL13a] und [RS12] bzw. gar nicht. Auch in den universitären Ausbildungsschemen findet sich zumindest im klassischen Maschinenbau nur wenig Inhalt zur systematischen Erstellung von KBE-Systemen. Vielleicht ist dies mit ein Grund für die von [VBD+12] angeführten fünf Punkte (siehe S. 528), allen voran jener der improvisierten Erstellung von KBE-Systemen.

6.13.2.4 Entwicklungsziele für KBE

Aus der Literatur (v.a. [VBD+12]), den Funktionsweisen und –umfängen der o.a. realisierten KBE-Lösungen und den eigenen Beobachtungen und Erfahrungen kann man Entwicklungs- und Forschungsfragen für KBE identifizieren (s. auch [P5]).

1. Methodik [VBD+12]:
Methodiken müssen von anwendungszentrierter Entwicklung hin zu einer generellen Methodikunterstützung des KBE-Entwicklungsprozesses überarbeitet bzw. erstellt werden. Dazu ist Unterstützung mit probaten Software-Tools nötig (wo gegenwärtig eine Lücke identifizierbar ist). Diese sollen die automatische Konvertierung von informellen zu formalen Methoden übernehmen.
2. Die Werkzeuge müssen weniger software-lastig und "ingenieurtauglicher" werden:
Aktuelle full-KBE Ansätze (MOKA, ...) sind in der Regel von Software-Entwicklern erstellt und adressieren damit nicht primär eine ingenieurliche Denkweise (wie bspw. Produktstrukturen als Stücklisten-Sicht wie in CAD anstelle von Eingabemasken für Datenbanken – bspw. xKBE-app).
3. Abkehr von Black-Box-Entwicklungen [VBD+12]:
Engineering Wissen muss vom Software-Code entkoppelt werden. Schlüsseltechnologien dazu sind Semantische Analysen für Wissenswiederverwendung aus einzelnen Anwendungen anstelle Wiederneuerstellung.
4. Engineering von Materialflusstechnik ist vielseitig unterschiedlich zu jenem von automotive und aerospace:
Hier wiederholt sich Konstruktionsarbeit oft in Adaption vorhergegangener Projekte (wenn z.B. eine Fahrzeuggeneration von der nächsten abgelöst wird, bleibt der Grundproduktaufbau erhalten). In der Materialflusstechnik sind fast alle Projekte Speziallösungen und man muss nach dem Grad sinnvoller Konstruktionsautomatisierung differenzieren (KBx).

KBE-Entwicklung kann als ein Arbeitsfeld gesehen werden, um heutige Anforderungen an Technik, bei denen der automatisierte Einsatz von Wissen entscheidend ist, zu treffen. Wenn Systeme transparenter geworden sind, und wenn die vollständige Automatisierung aller Gestaltungsaufgaben nicht das Hauptziel ist (wie Versuche nach der Lösung einer Taste-Drücken-design-Generation-Software in den 1990er Jahren scheiterten), ist KBE heutzutage ein geeigneter Weg, um Engineering-Arbeiten in der Materialflusstechnikentwicklung effektiv zu erledigen.

Für die vorliegenden eigenen Ansätze sollen im Bereich augmented CAD-Systeme festgemacht werden mit dem Ziel, das erfasste Wissen außerhalb des CAD-Systems zur Verfügung zu stellen (Ziel 3), die Wissensdarstellungsweisen wie o.a. benutzend; das ist der Hintergrund der xKBE-app (Kap. 6.14.2). Durch eine Differenzierung des Grades der Konstruktionsautomatisierung (Ziel 4) kann den unterschiedlichen Anforderungen an Produkt- und Systementwicklung in der Materialflusstechnik begegnet werden.

6.13.3 Erweiterung auf KBx

Der Grundtenor der Literatur und der dokumentierten Einsätze von KBE [VBD+12], [MIL08], [CP99] in den mehrfach erwähnten Trendsetter-Branchen (automotive,...) geht dahin, den Einsatz von KBE auf abgegrenzte Entwicklungsaufgaben zu beschränken und besonders variantenreiche Konstruktionen dem KBE zu unterziehen; vollautomatisch erstellte Gesamtprodukte sind nur in einigen wenigen Fällen sinnvoll (s. dazu auch die Differenzierung zwischen „augmented-CAD“ und „full-KBE“ in [P4], [CLT+10] und Kap. 6.13.2). Die Vorteile des KBE lassen sich gegenüber dem Hauptnachteil des hohen Erstellungs- und Verwaltungsaufwandes wie folgt subsumieren (auch in [MIL08]):

- raschere Durchlaufzeit der Konstruktion,
- größere Variantenvielfalt – effizientere Variantenkonstruktion,
- Vermeidung von fehleranfälliger Routinearbeit,
- automatische Dokumentation der Konstruktion und des Wissens dahinter.

Es bleibt die Fragestellung, ob mit KBE den Herausforderungen des Marktes adäquat begegnet werden kann und ob dieses ein probates Mittel für die Technische Logistik ist?

Wenn man diese Vorteile versucht in Anforderungen eines zu automatisierenden Engineering-Prozesses für die Entwicklung von Materialflusstechnik umzusetzen ergeben sich mehrere Schichten von sinnvoll zu automatisierenden Regeln an ein augmented-CAD-KBE-System für die Technische Logistik, siehe Bild 6.150.

Aus vor allem ökonomischen Gesichtspunkten wird aus den spezifizierten Regelklassen rasch klar ersichtlich, dass der Aufwand zur Automatisierung der unterschiedlichen Regelklassen nicht für alle gleich lohnenswert ist. Für die Technische Logistik muss und kann das nun bedeuten, eine Differenzierung der Intensität der Konstruktionsautomatisierung entsprechend den Kriterien nach Bild 6.151 vorzunehmen (detaillierte Beschreibung mit Beispielen in [P4]).

Die Automatisierung der Konstruktion, die in allen heutigen CAD-Systemen umsetzbar ist, wird dabei abgestuft angewandt als KBx mit dem x repräsentierten unterschiedlichen Disziplinen:

- E: Engineering
KBE:
 klassische automatische Konstruktionslösung
 (Variantenkonstruktion von Teilen und Baugruppen)
- SD: System Design
KBSD:
 Bauraumdefinition, Schnittstelle zur Berechnung und Simulation (CAE) zur Funktionsspezifikation mit reduzierter Geometrie
 (Maschinenanpassungen, Geometriedaten-Übergabe, Geometrierohdaten für CAE von Maschinen)
- L: Layouting
KBL:
 Layouten mit 3D-Geometriemodulen, konfektionieren von Systemen. (Bereitstellung von konstruktiven Informationen – z.B. Stücklisten – auf Maschinen- und Systemebene)

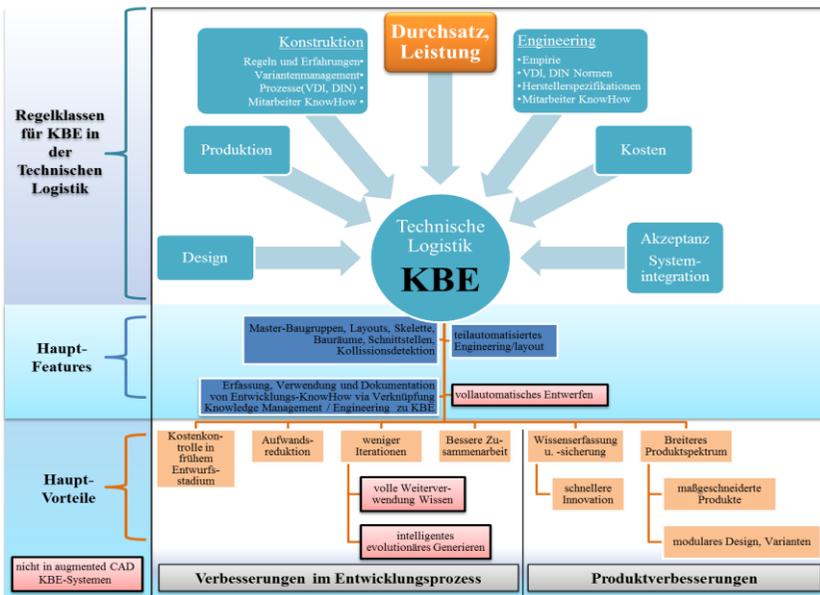


Bild 6.150: Regelklassen, Hauptfeatures und –vorteile des Einsatzes von KBE in der Technischen Logistik [P5]

Als entscheidend für die Entwicklung von Lösungen in allen Bereichen des KBx hat sich die Wahrung der Übersicht über alle die KBx-Lösung betreffenden internen und externen Abhängigkeiten und Regeln herausgestellt, die in den seltensten Fällen ohne Zuhilfenahme von Hilfsmitteln möglich ist.

Die Verwendung von Daten- und Informationsmodellen zur Visualisierung bringt eine dokumentierte Übersicht, gewährt aber weder eine umfangreiche kreative Beziehungsentwicklung auf verschiedenen Ebenen bzw. Klassen (Geometrie, Produktion, Lieferant, ...) noch die nötige Schnittstelle zum CAD. Daraus wurde am ITL die Idee der xKBE-app entwickelt, die als Ontologieeditor diverser Wissensklassen mit einer bidirektionalen Schnittstelle von/zu CAD in der Lage ist, die Entwicklung automatischer Konstruktionen des KBx zu unterstützen. Die dahinter liegenden Technologien sowie die gegenwärtigen Einsatzbeispiele sind Bild 6.151 zu entnehmen, Details zum Funktionsumfang finden sich in Kap. 6.14.2. In allen Bereichen des KBx konnten sowohl in der Literatur Lösungen identifiziert werden, als auch eigene Projekterfahrungen gesammelt werden [P3], [P5], [P8]. Die Untergliederung der Konstruktionsautomatisierungsaufgaben nach der KBx-Klassifizierung ermöglicht nicht nur die Ableitung von unterschiedlich mächtigen KBE-Lösungen, sondern soll auch helfen, das Automatisierungsziel stets vor Augen zu halten und die Systeme nicht zu überreizen, was aus den oben dargestellten Gründen und Erfahrungen rasch zum Misserfolg von KBE führen kann.

KBx Knowledge-based x Ansätze			
steigende Objektgröße und sinkender Konstruktionsautomatisierungsgrad			
	KBE	KBSD	KBL
Domäne	Knowledge Based Engineering Komponenten, Baugruppen	Knowledge Based System Design Baugruppen, Maschinen	Knowledge Based Layouting Maschinen, Anlagen
Funktionen	vollautomatische (Detail)Konstruktion von Teilen und Unterbaugruppen	automatische master- und layout-Konstruktion von Baugruppen und Maschinen, Funktionsspezifikation von Maschinen	automatisiertes layouten von Anlagen und deren Spezifikation mit 3D-Geometriemodulen (*), Konfektionieren von Anlagen (+)
Verwendung für	- Variantenkonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Produktkonfiguration - Produktfamilienerstellung	- Variantenkonstruktion, - Anpassungskonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Antriebsdimensionierung - Schnittstellendefinition - CAD top-down design (Struktur)	- Anpassungskonstruktion (Wiederholkonstruktion) - Bauraumdefinitionen - Kostenabschätzung (Angebotsphase) - Stücklistenentwurf
CAD domain and Arbeitsbereich	Detailgeometrie Konstruktion/CAD	reduzierte Geometrie (für CAE) Berechnung/CAE	Schrumpferpackungen für Layouts und Schnittstellen Materialflussplanung u. Konstruktion
Regelklassen	Konstruktion, Berechnung/Engineering, Kosten, Produktion, Design		
Daten, Informationen und Wissensquellen (ohne implizites Entwicklungs-KnowHow)	Materialflussrechnung (Kapazität und Durchsatz)		
	- Normen, best practice, Lieferanteninformationen - Maschinendaten - Fertigungsbedingungen - Kostengestaltungsregeln Grundlagen	Maschinenbau- u. Mechanikgrundlagen	Dimensionierungsgrundlagen - Marktakzeptanz - Kundeninformationen (CRM) Logistikgrundlagen
Nutzen	Fehlervermeidung, raschere Bearbeitung (Wissenswiederverwendung), autom. Dokumentation, schnellere Einarbeitung neuer Mitarbeiter, Steigerung der Variantenvielfalt, durchgängige Daten(Produkt)modelle, Kostenkontrolle in frühem Entwicklungsstadium		
Beispiel	Seitrommel; [P6]	Regalbediengerät; [P5]	Hochregallagerauslegung (+); [P3], [PIC12] DC-Design-Suite (*) [FOR14]
Umsetzung KBx mit Unterstützung der xKBE-app			
xKBE-app (aktueller Stand)	Visualisierung: Ontologien, DSM, hierarchische Struktur, TagClouds		
Technologien	Datenbanken: Normen.		
	Umsetzung: CAD-Schnittstellen (VB-API), Visual Basic GUI, mySQL-Datenbank		
Regelklassen	Dimensionierung, Normen, best practice		
Beispiel-Umsetzung	Produktontologien, CAD-Steuerung aus xKBE-app (exemplarisch), Normen-Tagging		

Bild 6.151: Disziplinen der automatischen Konstruktion: KBx-Definition [P4]

Generell ist **KBE** für die Technische Logistik für die Variantenkonstruktion geeignet, wie sie im branchenüblichen Projektgeschäft immer vorkommen. Bei Neukonstruktionen, wie sie methodisch durch die Entwicklungsmethodiken erfasst sind, ist wirtschaftlich zu prüfen, ob die vorgesehene Variantenvielfalt den Einsatz von KBE rechtfertigt. Ein Beispiel für KBE findet sich in [P6].

KBSD wird dann sinnvoll sein, wenn es um hochdynamische Systeme geht, deren Antriebe stets einer Neuauslegung bedürfen. Ebenso, wenn es sich um große CAD-Modelle handelt, die im Top-Down angelegt sind und von Anwendungsfall zu Anwendungsfall umkonfiguriert werden müssen. Es stellt eine Schnittstelle der Systemauslegung hin zu den Fachberechnungswerkzeugen dar und ist ein Geometriegrobauslegungswerkzeug, das automatisierten Austausch zu CAE ermöglicht, wie bspw. in [P5].

KBL schließlich soll eine Lücke schließen, die bei der Materialflussanlagenplanung hin zur technischen Realisierung auftritt. Wenn es hier gelingt, zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt aus dem Anlagenlayouting Konstruktionsrahmenbedingungen abzuleiten, kann zu einem frühen Zeitpunkt die Kostensicherheit gesteigert und durch Simultaneous Engineering die Durchlaufzeit des Gesamtprojektes verkürzt werden. Ein Beispiel für die Wirkmächtigkeit einer umfangreichen KBx-Lösung stellt die fortna[®] DC Design Suite dar [FOR14], die die Materialflusslayoutingaufgaben des KBL mit Produktkonfigurationen auf Maschinenebene des KBE verknüpft.

Weiters dient KBL dem Konfektionieren von Anlagen für einen raschen Überblick über verbaute Geometrien und Materialien (Stückliste), Beispiel [P3], [PIC12]. Die geometrische Detailtiefe ist dabei nochmals geringer als bei KBSD.

Die unterschiedlichsten Ansätze zur Automatisierung von Planungsaufgaben der Logistik sind nicht Gegenstand des KBL (wie z.B. in [SSS14], [UNI12] oder [ZÜL10]). Vielmehr sollen die dort generierbaren Erkenntnisse am Gesamtsystem (Materialflusstechnische Parameter und geometrische Rahmenbedingungen) Input für die konstruktive KBL-Entwurfskonstruktion einzelner Komponenten sein, wie bspw. in [PIC12].

6.14 Erstellung und Visualisierung von Beziehungen zwischen (Konstruktions-)Objekten

Um das Wissen im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess verfügbar zu halten existieren die o.a. Ansätze. Zur effizienten Verwendung der unterstützenden Werkzeuge (Ontologieeditoren, DSM/DMM-SoftwareWerkzeuge,...) ist die Anbindung an existierenden Strukturen wie CAD, PDM/PLM und ERP essentiell. Hier setzen die Methoden und Prototypen im hier vorgestellten Abschnitt an. Ein Anliegen zur Verbreitung des KBx-Gedankens (Kap. 6.13.3) ist die Aufbereitung und Dokumentation des hinter KBx liegenden formalen bzw. formalisierbaren Wissens, das größtenteils in CAD-Systemen und übergeordneten Bedienprogrammen abgebildet ist. Die Ausführungen zeigen Möglichkeiten zur Vernetzung der Welten des Knowledge-Managements mit jenen des CAD. Während die Variantenanalyse (Kap. 6.14.1) versucht, Überblick über eine Gleichteilevielfalt zu erreichen stellt die xKBE-app (Kap. 6.14.2) ein mächtiges Werkzeug zur Entwicklung und Dokumentation von formalen Beziehungen in maschinenbaulichen Geräten dar. Im Exkurs über Axiomatic Design (Kap. 6.14.3) wird versucht und aufgezeigt, aus einer bestehenden Entwicklungsmethodik Informationen für das KBx zu extrahieren.

Zum Einsatzzweck und der Abgrenzung zu Themen des Komplexitätsmanagements siehe auch Ausführungen im Kap. 6.12.2.

6.14.1 Gleichteile: Variantenanalyse

Oft ist die CAD-Konstruktion nicht durch (Firmen-)Standards und Richtlinien geregelt und es kommt zum Phänomen „Gleichteile“. Dann ist dasselbe Bauteil (der Geometrie nach) mehrfach vorhanden und scheint in unterschiedlichen Baugruppen unter anderer Positions/Teilenummer auf, obwohl es geometrisch ident ist. Die Gründe dafür sind mannigfaltig und auch darin bedingt, dass es unaufwendiger sein kann, geometrisch einfache Bauteile neu anzulegen und zu konstruieren, als selbiges im Teilverwaltungssystem (außerhalb des oder verbunden mit dem CAD) zu identifizieren und wiederzuverwenden. Branchen mit hoher Teilevielfalt und/oder großem Konfigurationsaufwand (automotive, aerospace) begegnen dieser Problematik mit Product Lifecycle Management Systemen (PLM), die sich aus dem Product Data Management (PDM) und deren Vorgängern wie CAD-integrierten Teilverwaltungsprogrammen entwickelt haben und Informationen und Relationen unterschiedlichster Art verwalten und mit Rollenkonzepten für die Benutzer ausgestattet sind.

Stellen sich nun Aufgaben der Neuorganisation von Produktstrukturen oder solche der Modularisierung und Variantenentwicklung, ist die teilweise unüberblickbare Flut an gleichen und ähnlichen Teilen oder gar Baugruppen ein Hindernis. Auch die Koppelung zu KBx-Lösungen ist nur mit eindeutig vorhandenen Bauteilen möglich. Neben PDM und PLM werden ebenso Teile- und Enterprise-Ressource-Planning(ERP)-Systeme mit dem CAD verbunden zur Teilverwaltung eingesetzt. Damit stehen wesentliche Informationen (im Gegensatz zu herkömmlichen Teilenummern) als Attribute für klärende Analysen zur Verfügung.

In einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt der Firma Sandvik Mining and Construction GmbH, Zeltweg mit dem ITL konnte für die beschriebene Thematik das Tool „Variantenanalyse“ entwickelt werden. Ein vierstufiges Vorgehen mit (Bild 6.152):

1. Datenerfassung und –aufbereitung,
2. Strukturierung und ggf. Umstrukturierung in Funktionsgruppen,
3. Vergleich bzw. Analyse und Suche mit mehrdimensionalen Filtern,
4. Bewertung mit paarweisem Vergleich (für Kriterien wie Einsatz Erfahrung, Lieferantenzufriedenheit, ...) und Nutzwertanalyse [RS12],

ermöglicht softwaregestützt eine objektive Bewertung oder das Auffinden ähnlicher Teile. Das Tool „Variantenanalyse“ ist bei Sandvik Mining and Construction GmbH seit Jänner 2013 im Einsatz und wurde auf weitere Produktuntergruppen angepasst. Im Rahmen der Entwicklung der xKBE-app (Kap. 6.14.2) ist vorgesehen, die Methodik der Attributerfassung (aus SAP) sowie einzelne Submodule der Software in die xKBE-app zu integrieren.

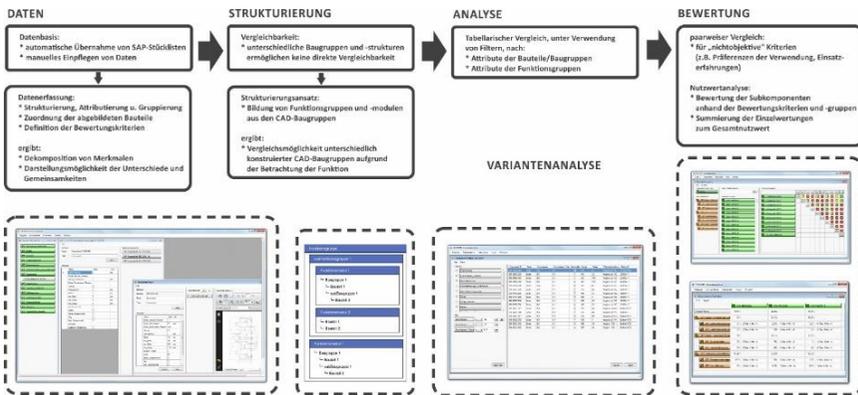


Bild 6.152: Methodik der Variantenanalyse

Wenn Teile und Baugruppen externer Partner einzubinden sind, was heutzutage in wahrscheinlich keinem Fall vermeidbar ist, potenziert sich die Problematik eindeutiger Teilebeschreibung nochmals, da unterschiedliche Zugänge unterschiedlicher Ingenieurteams zusammentreffen. Abgesehen von Speziallösungen firmeninterner Art (wie auch die unten beschriebene Software „Variantenanalyse“) existiert ein hervorzuhebendes kommerzielles Klassifizierungs- und Beschreibungssystem für Produkte namens eCl@ss.

Nach [ECL12] ist „...eCl@ss DER branchenübergreifende Produktdatenstandard für die Klassifizierung und eindeutige Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen. eCl@ss hat sich als einziger ISO/IEC-normenkonformer Industriestandard national und international durchgesetzt.

Über die klassischen Anwendungen in Beschaffung, Controlling und Vertrieb hinaus zeigt eCl@ss mit dem Release 8.1 seine besondere Stärke im Einsatz für das unternehmensübergreifende Prozessdatenmanagement und im Engineering. eCl@ss ist in der Industrie, im Handel, im Handwerk, bei Lebensmitteln, Dienstleistungen u.v.m. seit dem Jahr 2000 etabliert. eCl@ss deckt mit seinen 39.000 Produktklassen und 16.000 Merkmalen einen Großteil der gehandelten Waren und Dienstleistungen ab. Viele Branchenstandards suchen die Interoperabilität, um die Potenziale eines branchenübergreifenden Standards umzusetzen.“

Als Hauptfunktionen nennt [ECL12] „...vergleichende Kostenanalysen über alle Produktgruppen und bietet damit standardisierte Strukturen für das Berichtswesen. Neben dem Kostenmanagement unterstützt die durchgängige Systematik bei zukünftigen Entscheidungen über Eigenfertigung oder Fremdbezug (Make-or-Buy).“

Als wichtig nennt [ECL12] heute standardisiert zu verarbeitende Katalog- und Produktarten genauso, wie die richtigen Ideen, gute Produkte und eine überzeugende Vertriebsmannschaft. Liefertreue. ... Durch standardisierte Kommunikation zwischen Lieferant und Kunde können hochwertige, individuelle Kataloge realisiert werden. ... Während der systemübergreifende Austausch von 2D- und 3D-Modellen mittels DXF, IGES oder STEP gelöst ist, stellt der Austausch der Produkteigenschaften zwischen Geräteherstellern und Nutzern aus Engineering und Einkauf eine bisher ungelöste Aufgabe dar. Hier revolutioniert eCl@ss den Engineering-Prozess über Informationsdurchgängigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Manuelle Tätigkeiten werden minimiert, systemunterstützte Anfrage- und Einkaufsprozesse für CAE- und ERP-Systeme werden möglich. Zudem schafft eCl@ss hiermit die Voraussetzung für viele „Industrie 4.0“-Anwendungen. eCl@ss, die gemeinsame Sprache im Engineering. Für alle Ingenieure – weltweit.“

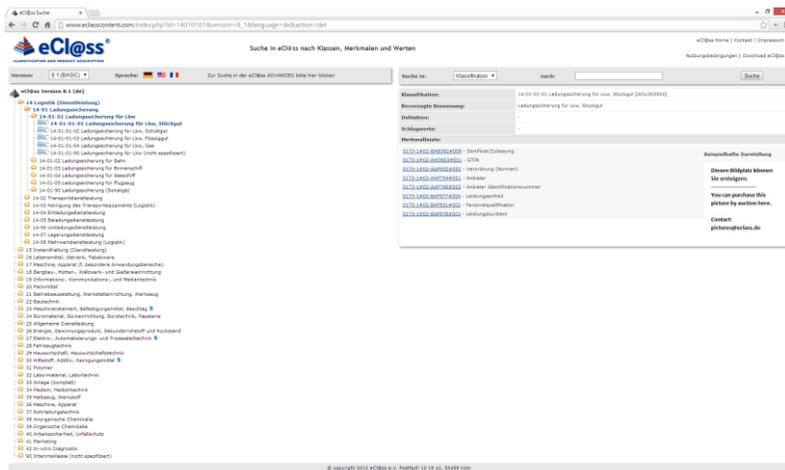


Bild 6.153: Portal eCl@ss [ECL12]

Bild 6.153 zeigt, dass mit dem System eCl@ss auch Daten von beispielsweise Regelwerken standardisiert erfasst werden können.

6.14.2 Arbeitsumgebungen für KBx – die xKBE-app³¹³

Extended Knowledge based Engineering (xKBE) befasst sich als Forschungsziel dieser Arbeit und jener der Arbeitsgruppe am Institut mit der Informationserfassung und -haltung von Entwicklungsprozessen, speziell im Maschinenbau. Es soll damit eine Plattform geschaffen werden, auf welcher unternehmensweit Maschinenbauteile an- und abgelegt werden können um diese für spätere Entwicklungen zur Verfügung zu stellen. Dabei soll dieses System nicht nur die grundlegenden Punkte der heutig etablierten CAD-Systeme beinhalten, wie variablenunterstützte CAD Zeichnungen und Konstruktion, sowie die Beziehungen zwischen Bauteilen auf technischer Ebene und auch die konstruktiven Hintergründe bzw. Zusammenhänge dokumentieren.

Die xKBE-app stellt die darzustellenden Informationen zwar in einer Ontologie dar, jedoch ist dies nur zur Illustration. Der wesentliche und wichtige Punkt des Ansatzes liegt in der Datenstruktur des Datenerhaltungssystems. Ontologieeditoren dienen der Darstellung von „simplen“ Informationen in der gleichnamigen Ontologiedarstellung. Diese dienen vorwiegend der „Illustration“ und beherbergen keine besondere Architektur der Informationserhaltung, sowie der Verwendung dieser Information (s. Kap. 6.12.2.1). Eine große Schwachstelle von Ontologieeditoren stellt auch oftmals die Methode der Datenhaltung dar. Oftmals werden die Daten lediglich in Dateien oder nur sehr grob strukturierten Datenbankarchitekturen gehalten. Diese Methoden sind für umfangreiche Systeme der Datenerhaltung, wie es beispielsweise im Maschinenbau vorausgesetzt wird, nicht haltbar.

Im Gegensatz zu Ontologieeditoren beschäftigt sich die xKBE-app mit der Illustration des gespeicherten Wissens nur sekundär. Die primäre Aufgabe besteht in der Organisation der Struktur der Informationserhaltung, mit Fokus auf technische Anwendungen. So wird hier nicht nur eine einfache Verbindung zwischen Objekten erstellt, sondern dieser Verbindung auch Eigenschaften zugewiesen, mit welchen diese Objekte in Verbindung gesetzt werden. Es entsteht somit eine aktive Verbindung, die auf Eigenschaften der verbundenen Objekte zugreift.

In der xKBE-app soll es möglich sein eine Vielzahl vollständiger Konstruktionen ablegen zu können mit der Intention, alle die Bauteile die dadurch angelegt worden sind, für andere neue Konstruktion wieder verwenden zu können. Eine solche Funktion bieten all die heutigen CAD-Systeme durch die Bank auch, besonders in Verbindung mit PDM und PLM. Jedoch wird bei der xKBE-app dies um einen Schritt weitergedacht und der konstruktive Prozess auch auf einer Abstraktionsebene höher als in CAD-Systemen unterstützt und die Beziehungen/Regeln in unterschiedlichen Klassen verwaltet (s. Kap. 6.14.2.1). Dies geschieht dadurch, dass wesentliche Informationen, die im Laufe der Überlegungen vom Ingenieur angestellt wurden interaktiv und grafisch unterstützt abgelegt werden können.

³¹³ Für die teilweise Erarbeitung der softwaretechnischen Zusammenhänge und deren Dokumentation danke ich meinem Stipendiaten Max Jungwirth und meinem ehemaligen Studienassistenten und nunmehrigen Kollegen DI Alexander Ortner-Pichler.

Somit wird nicht nur ein fertig konstruierter Bauteil abgespeichert und für spätere Verwendung zur Verfügung gestellt, sondern auch die Hintergründe und Überlegungen zu dieser Konstruktion gespeichert.

6.14.2.1 Hauptfunktionen

Wenn man die Technik der Logistik zu deren Auftragserfüllung als ein technisches System betrachtet, kommt man zu den Begrifflichkeiten nach Bild 6.154. So lassen sich die Anlagen der Technischen Logistik als System, Subsystem und Element (Entitäten) mit Relationen unterschiedlicher Art beschreiben (s. dazu Kap. 6.1ff.). Gegenwärtig begegnet diese Beschreibung in CAD, ERP, PLM, ... wobei auch die Darstellung in einer Ontologie möglich ist. Genau dies ist die Funktion der xKBE-app (Funktionsdetails in Bild 6.154) [P3]. Diese kann somit als CAD-verbundenes, aber auch eigenständig verwendbares Entwicklungs- und Dokumentationswerkzeug für Beziehungen technischer Art beliebiger Objekte bezeichnet werden.

„Der **Nutzen für das KBx** der xKBE-app besteht darin, dass mit Drag & Drop Relationen unterschiedlicher Art zwischen Entitäten einfach herzustellen, bzw. vorhandene (z.B. aus CAD-Baugruppenstrukturen) automatisch übernehmbar sind. Wenn nun diese Relationen mit den nötigen Regeln mathematisch formalisiert, (z.B. Innendurchmesser Lager ist gleich Außendurchmesser Welle plus/minus Toleranz) können die das KBx bestimmenden Regeln übersichtlich erstellt und automatisch dokumentiert werden. Abhängigkeitspfade sind daraus (für das Änderungsmanagement) genauso ableitbar, wie Parametersätze (für den Variantenvergleich) exportierbar sind [P5].“

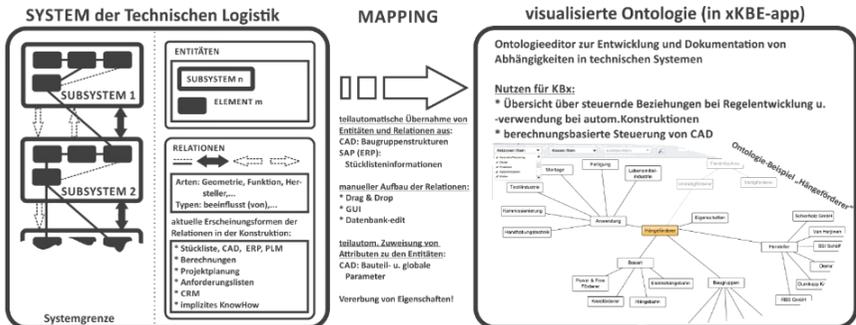


Bild 6.154: Funktion der xKBE-app [P3]

„Als Werkzeug der **Wissensformalisierung** kann die xKBE-app auch zur Vernetzung von Daten und Informationen genutzt werden, um diese zu Wissen zu machen [VDI 5610-1], wie in Bild 6.155 anhand eines Produktportfolios gezeigt. Durch die Möglichkeit des Einpflegens von Dokumenten kann ein umfangreiches Expertensystem aufgebaut werden, um komplexe Systeme, wie beispielsweise Lagersysteme, abzubilden und das Wissen dokumentiert verfügbar zu halten.

Der entscheidende Mehrwert der xKBE-app gegenüber verfügbaren Ontologieeditoren ist vor allem zu sehen in:

- einer Multi-Layer-Struktur der Beziehungen für Wissen unterschiedlicher Klassen
- der mathematischen Formalisierungsmöglichkeit der Relationen
- der Schnittstelle zur Konstruktion (CAD über VB-API)
- der internen Dokumentenverwaltung.

Mit dieser Entwicklungsplattform kann seitens des ITL gezeigt werden, welche Möglichkeiten zur Unterstützung des KBx sinnvoll sind. Im eigenen Gebrauch wird dieses Werkzeug in Projektarbeit und Lehre eingesetzt und für die geneigten Leser steht ab Ende 2014 eine Demonstrationsplattform auf den Internet-Seiten des ITL zur Verfügung.“ [P5]

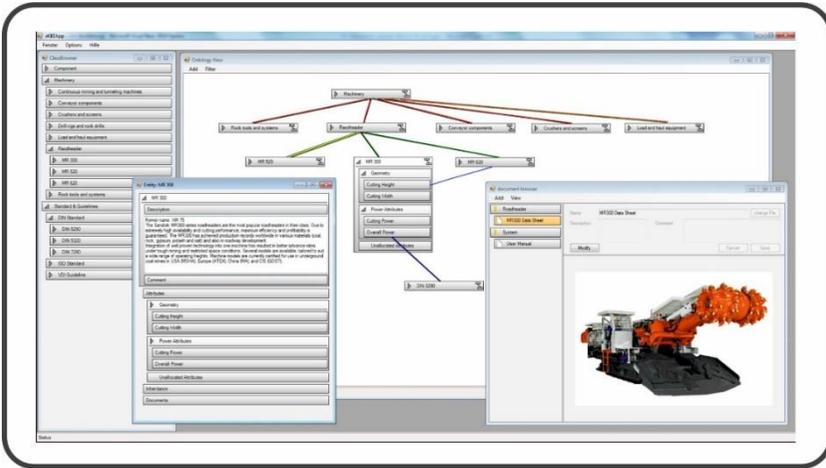


Bild 6.155: Formalisierung von Daten eines Produktportfolios der Fa. SANDVIK mining and construction GmbH, Zeltweg in der xKBE-app [P3]

6.14.2.2 Funktionsdetails

Auf die software-technische Beschreibung von Details wird in diesem Kontext bewusst verzichtet, da einerseits die Wirksamkeit für das Engineering herausgestrichen werden soll, andererseits die Software-Konzeption noch soweit im Fluss ist, dass mehrere Systeme derzeit parallel bestehen (s. Kap. 6.14.2.3).

Die xKBE-app versucht eine Zusammenführung von heute divers verfügbaren Informationen der Subsysteme PDM/PLM, CAD und Wissensmanagement. Um das in Konstruktionen enthaltene Wissen zu formalisieren sind Regeln zu erstellen, die die Zusammenhänge abbilden. Diese Regeln sind z.B. geometrischer Art im CAD bzw. PDM/PLM vorhanden, Beziehungen von und zu Lieferanten werden im ERP oder CRM abgebildet, Produktentwicklungswissen wird gerne in Wikis erfasst. Wenn es nun gelingt, und für das Beispiel CAD-System ist dies hier bereits umgesetzt, die in all diesen Systemen erstellten Beziehungen zentral in der xKBE-app zu verwalten und die Bearbeitung grafisch zu unterstützen kann ein echter Mehrwert für die wissensbasierte automatisierte Konstruktion geschaffen werden. Erweiterungen der app, die die vorhandenen Daten verarbeiten sind in Richtung Semantik und Vorschlag-Systeme denkbar.

Die Regelklassen für den Einsatz der xKBE-app zur wissensgestützten Entwicklung von Materialflusstechnik mit KBx lauten:

- Logistik:
 - Zusammenhang zwischen Entitäten über logistische Grundgrößen wie Durchsatz/Leistung und Kapazität
- Konstruktion:
 - Regeln zur geometrischen Gestaltung von Bauteilen
 - Best Practice Empfehlungen zur Geometrie und Erfahrungen
 - Vorgaben aus Normen
 - Herstellerspezifikationen
 - Prozesse des methodischen Konstruierens
- Produktion:
 - Regeln und Best Practice aus der Technologie-Datenbank bzgl. Fertigungsbedingungen
- Design:
 - Regeln und Best Practice aus Projekten, Anbindung an die Kundendatenbank CRM.
- Kosten:
 - Regeln und Best Practice aus Projekten, Anbindung an die Kundendatenbank CRM.
- Akzeptanz/Systemintegration

Die Regelklassen verwenden die folgenden Datenbanken, die Dokumente, einzelne Objekte/Entitäten oder formale Beziehungen enthalten können, Schnittstellen zu CRM, ERP und PDM/PLM ergänzen die app-integrierten Datenbanken:

- Materialdatenbank
- Normteildatenbank
- Entwicklungsrichtlinien
- Konstruktionsmethoden
- CAD-Datenbank
- Technologie-Datenbank

Begriffsabgrenzungen – Definitionen:

- Grundinformationen:
 - Sind ein Satz von Datenbankfeldern (Name, Beschreibung, Kommentar). Entitäten, Attribute, Attributgruppen, Dokumente, Relationen und Relationstypen verfügen über die Möglichkeit diese Informationen aufzunehmen.
- Revision:
 - Fast alle Informationen werden in der xKBE-App in Revisionen gespeichert. Dieses System begründet sich durch den Grundgedanken, dass keine Information gelöscht oder überschrieben werden kann um die Nachvollziehbarkeit der Informationen zu gewährleisten. Wird eine Information modifiziert, wird die ursprüngliche Information nicht überschrieben. Es wird eine neue Revision der Information erzeugt – die ursprüngliche Information bleibt erhalten.

- **Status:**
Der Status dient dem gleichen Grundgedanken wie das Revisionssystem. Informationen werden nicht gelöscht. Um Informationen jedoch von der Darstellung und Verwendung auszuschließen, wird ihr Status manipuliert.
- **Entität:**
Eine Entität stellt einen „Informationscontainer“ dar und ist in der Lage die Grundinformationen eines beliebigen realen oder imaginären Objektes zu speichern und zu verwalten. Die Entität wird dadurch zum Abbild dieses Objektes. In Erweiterung zu den Grundinformationen kann eine Entität Attribute und Attributgruppen besitzen.
- **Attribut:**
Jedes Attribut gehört zu genau einer Entität und stellt eine Eigenschaft (oder Merkmalsausprägung) der Entität dar, die es besitzt. Es kann, wie die Entität, über die Grundinformationen verfügen, besitzt aber in Erweiterung dazu Informationen über Wert und Einheit des Attributs.
- **Attributgruppe:**
Eine Attributgruppe gehört, wie ein Attribut, zu genau einer Entität. Attributgruppen dienen zur Gruppierung von Attribute und erfüllen keine weiteren Funktionen.
- **Relation:**
Eine Relation stellt eine Verknüpfung von Informationen dar. Sie kann Entitäten und Attribute in beliebiger Kombination in Beziehung setzen. Relationen besitzen nicht alle Grundinformationen. Anstatt des Namens finden in einer Relation Relationstypen Anwendung. Ein Relationstyp besitzt einen Namen und einen „inversen Namen“, da jede Relation eine Leserichtung aufweist. Z.B. wie in Bild 6.156:



Bild 6.156: Relationen zwischen Entitäten

- **Vererbung:**
Die Vererbung ist eine spezielle Art der Relation. Sie wird durch den Relationstyp „derived from“ erstellt und ist in gewisser Hinsicht eine Form der Abstrahierung. Durch die Erstellung einer Vererbungsrelation werden sämtliche Attribute und Attributgruppen von der Elterntätigkeit zur Kindentität vererbt, also eine Kopie erstellt, die der Kindentität zugeordnet ist. In der Kindentität ist die Modifikation vererbter Attribute nur beschränkt möglich. Lediglich der Wert des Attributs kann verändert werden. Vererbte Attributgruppen können in der Kindentität nicht verändert werden. Um die gesperrten Informationen zu ändern,

müssen sie in der Elternentität geändert werden. Sowohl bei der Kindentität als auch bei der Elternentität wird eine neue Revision der Information erstellt. Einschränkungen bei der Vererbung:

- Keine Mehrfachvererbung
- Keine rekursive Vererbung
- Bei einer Relation die mit dem Relationstyp „derived from“ erstellt wurde, kann der Relationstyp nicht mehr geändert werden.

Der Prozess der Wissenserfassung:

Für die Regelklasse „Konstruktion“ existiert bereits eine automatisierte bidirektionale Schnittstelle zu PTC.Creo® über ein API. Diese importiert die Baugruppenstruktur mit ihren Abhängigkeiten und bildet somit das Grundgerüst der Produkterfassung in der xKBE-app, da auch die ERP-Stücklisten meist auf der Geometrie beruhen. Wenn eine Baugruppe importiert ist, können Beziehungen über ein grafisches User-Interface durch Drag&Drop zwischen allen einzelnen Parametern der Baugruppe in unterschiedlichen Klassen erstellt werden, die direkt das CAD-Modell beeinflussen. So wird es möglich, oft in tief im CAD verborgene Konstruktionsbedingungen zu visualisieren und effektiv zu verwalten und noch vielmehr neue zu erstellen.

Die Hauptfunktionen der Wissenserfassung mit der xKBE-app sind, (ergänzend zum automatisierten CAD-Baugruppen-Import, s.o.), s. auch Bild 6.157:

- Erstellung einer Entität mit Erfassung der Grundinformation
- Attributierung einer Entität
- Dokumente erfassen
- Beziehung zwischen beliebigen Kombinationen aus Entitäten und deren Attributen erfassen
 - Relationstypen:
 - vorgegebene Systemrelationen (z.B. Kind/Eltern von,...) und frei erstellbare Typen (z.B. hat auch die Farbe Grün, ...)
 - Vererbung:
 - vererbt alle Attribute und Attributgruppen der Endentität an die Startentität
 - Baugruppen Beziehungen:
 - sind Systemrelationen und weisen der Endentität eine Startentität als Unterelement zu.
- Löschen von Informationen:
 - grundsätzlich durch Statusänderung möglich. Wenn die letzte aktive Revision einer Entität gelöscht wird müssen:
 - alle durch die Entität erfassten Attribute/Attributgruppen
 - alle Beziehungen die die Entität als Start oder Ende aufweisen
 - alle Beziehungen die ein Attribut der Entität als Start oder Ende aufweisen
 - alle Dokumentlinks die zwischen Dokumenten und der Entität erstellt wurden gelöscht werden.

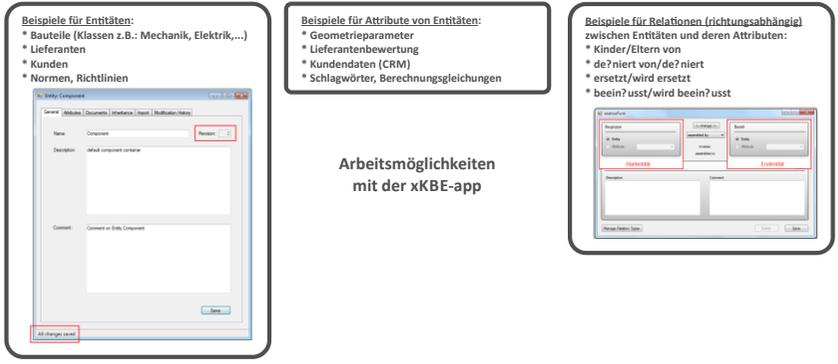


Bild 6.157: Beispiele für Entitäten und Relationen mit zugehörigen Eingabemasken der xKBE-app V1

Der Prozess der Wissensnutzung:

Für den Hauptzweck der Erfassung und Verwaltung von Beziehungen/Relationen zwischen Objekten/Entitäten unterschiedlichster Art stehen in der xKBE-app unterschiedliche Möglichkeiten der Aufbereitung und Nutzung des formalisierten Wissens zur Verfügung bzw. sind vorgesehen.

- Klassenbrowser: stellt das Vererbungssystem der xKBE-app hierarchisch dar
- Ontologiedarstellung (Bild 6.158): In der Ontologiedarstellung werden Entitäten und die Beziehungen zwischen ihnen dargestellt.
 - Darstellung:
 - Entitäten: Darstellung nur anhand ihres Namens (Detailinformationen können durch das Kontextmenü aufgerufen werden)
 - Beziehungen: Alle Beziehungen zwischen zwei Entitäten und den zugehörigen Attributen werden als einzelne Verbindungslinie zwischen den Entitäten dargestellt.
 - Funktionalitäten:
 - Doppelklick auf eine Entität: Darstellung aller mit der entsprechenden Entität in Verbindung stehenden Entitäten.
 - Drag & Drop: Entitäten sind per Drag & Drop beweglich zur freien Anordnung innerhalb der Ontologie
 - Kontextmenü der Entitäten: Details, Erstellung einer Relation, Ausschließen von der Ansicht
 - Kontextmenü des Hauptbereichs: Hinzufügen einer neuen/bestehenden Entität

- Views:
 - Ontologiedarstellungen können als „Views“ gespeichert werden.
 - Views beinhalten Informationen über die dargestellten Entitäten und deren Positionen innerhalb der Ontologiedarstellung.

In Planung befindliche Vorhaben der Aufbereitung und Nutzung durch weitere Darstellung des formalisierten Wissens sind:

- Semantische Netze
 - Tag-Clouds
- Tabellarische Gruppierung
 - DSM
 - DMM
- Hierarchische Gruppierungen
 - Stückliste
 - Strukturstückliste
 - Organigramm
 - Mindmap
- Ablaufdiagramme
 - Prozessdarstellung
 - Flussdiagramm
- Mengendarstellung (vgl. CAM „Setvisualiser“ [ENG13])
- „Datenbankdarstellung“
- Abfragen und Suchmöglichkeiten

6.14.2.3 Entwicklungsplan

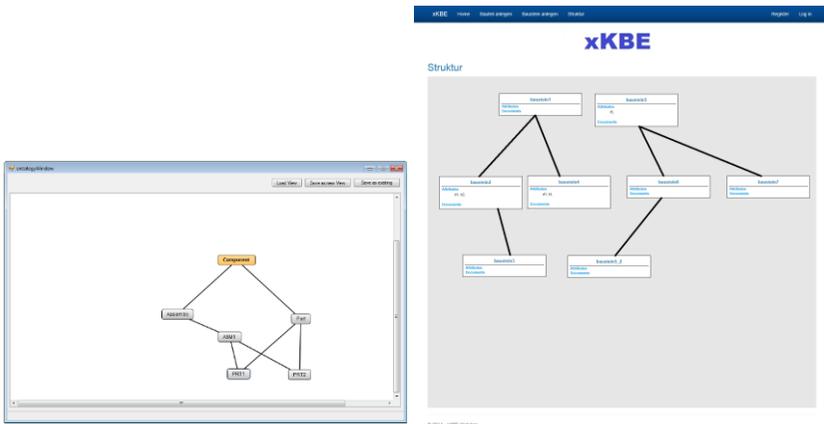


Bild 6.158: Ontologie-View der xKBE-app V1 und V2

Bei dem Entwicklungsvorhaben der xKBE-app handelt es sich, naturgemäß der Forschung an Universitäten, keinesfalls um die Erstellung eines kommerziellen Softwareprodukts sondern vielmehr über die prototypische Erforschung und Umsetzung von Möglichkeiten der Konstruktionsunterstützung mit Fokus wissensbasiertes Konstruieren.

Dementsprechend ist die laufende Entwicklung steten Änderungen unterworfen und es existieren gegenwärtig zwei Versionen der xKBE-app (Bild 6.158):

- V1: MySQL – Datenbank mit VB GUI
- V2: Server/webbasierend

- a. Web-frontend
- b. Lokale Arbeitsumgebung

Während die V1 eine umfassendere Datenbankstruktur und –möglichkeit aufweist ist V2 mit dem Fokus auf webbasiertes Arbeiten im Browserfenster entwickelt worden. Entsprechend den Einsatzerfahrungen und Tests sind unterschiedliche Entwicklungsstränge für die Zukunft vorgesehen. Gegenwärtig findet die xKBE-app Einsatz in der Aufbereitung von Informationszusammenhängen materialflusstechnischer Gewerke. Bild 6.159 fasst die Hauptfunktionen nochmals final zusammen.

facts and figures xKBE-app	
<p><u>Grundlage der xKBE-app:</u></p> <ul style="list-style-type: none">* relationale MySQL-Datenbank (im Hintergrund)* VB - API als CAD-Schnittstelle (im Hintergrund)* Visual Basic - GUI <p><u>erweiterte Bausteine (teils in Planung)</u></p> <ul style="list-style-type: none">* DSM - Editor und Visualisierer für Parameter-Relationen* Intergration des stand-alone Variantenanalyse - Tools	<p>HAUPTFUNKTIONEN und FEATURES xKBE-app:</p> <p><u>Konstruktion CAD:</u></p> <ul style="list-style-type: none">* zentrale Übersicht und Verwaltung von Konstruktionsparametern* Entwicklung und Dokumentation von Konstruktions- u. Baugruppenbeziehungen (auch mathematisch)* Steuerung von Beziehungen in CAD (PTC Creo) aus xKBE-app <p><u>Produktmodell allg.:</u></p> <ul style="list-style-type: none">* verschiedene Sicht auf das System je nach Relationsart (farblich unterschiedlich dargestellt) als Ontologie oder hierarchisch (wenn mögl.)* Zuweisung von Dokumenten zu Entitäten

Bild 6.159: Facts and figures der xKBE-app V1

6.14.3 Exkurs:

Axiomatic design eines Hängeförderers zur Visualisierung von Konstruktionsbeziehungen³¹⁴

Axiomatic Design ist eigentlich eine Entwicklungsmethode mit starker Verwurzelung im angloamerikanischen Raum. Die strukturiert-mathematische Herangehensweise an den Entwicklungsprozess (technischer) Produkte liefert als quasi Nebenprodukt die umfassende Darstellung formaler Abhängigkeiten. Daraus entsprang der Gedanke die Methode Axiomatic Design für die Visualisierung von Abhängigkeiten in Konstruktionen einzusetzen und mit zugehörigen Softwareprodukten (s.u. und Kap. 6.11.1) matrixbasierte Darstellungen wie DMM und MDM (Kap. 6.12.2.3) für Analysen und Visualisierungen im KBx zu generieren. Die durch das Verfahren prinzipiell und durch diverse Software-Werkzeuge speziell generierbare Einflussmatrix [A] ist für die Bestimmung und Bewertung von Relationen im Rahmen des KBE und KBx sowohl in der xKBE-app als auch zur begleitenden manuellen Konstruktionsanalyse verwendbar.

³¹⁴ Dank für die teilweise Ausarbeitung dieses Abschnittes geht an meine Diplomanden Benjamin Gartlacher [GAR14], Stefan Steinkellner [STE12] und die Studierenden Michael Schadler und Matthias Schilcher im Rahmen ihres Bachelorprojektes 2012 (nicht publiziert)!

Eine kurze Darstellung der Methode (vgl. [GAR14], [FEL14]) in ihrem genuinen Gedanken der Entwicklung von Produkten ergänzt um ein Beispiel aus der Technischen Logistik zur Analyse und Visualisierung von Abhängigkeiten in einem Hängeförderersystem ist Thema dieses Exkurses mit der Intention, die Attraktivität dieser Methode zu beleuchten.

Bei der von Nam P. Suh entwickelten Technologie soll die Produktentwicklung, wie in der Mathematik als ein System aufgebaut werden, das auf Axiomen basiert. Damit unterscheidet sich dieses Modell von den Methoden des deutschen Sprachraums (S.o.: VDI 2221, Roth, Ehrlenspiel, ...), die mehr auf die Erfahrung und Intuition des Entwicklers aufbauen. Ein weiteres Ziel bei der Entwicklung von Axiomatic Design war es, die sehr kostspieligen Trail-Error-Prozesse zu minimieren. Axiomatic Design ist ein Domänenkonzept. Im Gegensatz zu den weitläufig bekannten Konstruktionsmethodiken beruht Axiomatic Design hauptsächlich auf Axiomen – analog jenen aus den Naturwissenschaften – und setzt sich zum Ziel, die ProduktentwicklerInnen dahingehend zu fördern, nicht in bestehenden Schemata und Mustern zu denken. Für jede konstruktive Lösung sollen die eigentlich ausschlaggebenden Anforderungen stets neu überdacht und zugeordnet werden. Durch die Förderung der Kreativität durch den wissenschaftlichen Ansatz von Axiomatic Design verspricht sich Nam P. Suh einen effizienteren Entwicklungsprozess sowie eine größere Implementierbarkeit in computergestützte Systeme.

Es gibt 4 verschiedene Domänen, die alle während eines Produktentwicklungsprozesses durchlaufen werden. Mittels Restriktionen soll der Lösungsraum eingeschränkt werden. Die Zuordnung von Anforderungen zu den Lösungen erfolgt mittels Matrizen und für die Beurteilung und den Vergleich von Konstruktionslösungen, werden Axiome angewendet [STE12], [FL08]. Die vier Domänen (Bild 6.160) des Axiomatic Design sind:

- **Customer Domain:**
Der Kundenbereich bildet die Bedürfnisse der Kunden strukturiert ab und beschreibt die gewünschten Produkteigenschaften (Customer Attributes).
- **Functional Domain:**
Führt die geforderten Produkteigenschaften in Funktionsanforderungen (Functional Requirements FR) über. Functional Requirements stellen die kleinste Anzahl unabhängiger kundenseitiger Anforderungen dar.
- **Physical Domain:**
Legt die entsprechenden Entwurfparameter (Design Parameter) fest, welche die FR erfüllen.
- **Process Domain:**
Schließt den Entwurfsprozess durch die Entwicklung geeigneter Fertigungsprozesse, die durch Prozessvariablen (Process Variables) gekennzeichnet sind, ab.

Die Kundenanforderungen werden der Funktionalen Domäne mit funktionalen Anforderungen zugeordnet. Das heißt, die Forderungen an den Entwurf werden aus fiktionaler Sicht betrachtet. In der Physischen Domäne werden die Lösungsmerkmale (Designparameter), auf Basis der vorliegenden Funktionsforderungen, für die Lösung ermittelt. Restriktionen sollen dabei helfen den Lösungsraum einzuschränken. Die Prozessdomäne stellt die letzte Domäne

dar und sie beinhaltet die Prozessvariablen, welche das Vorgehen zur Umsetzung der Lösung beschreiben.

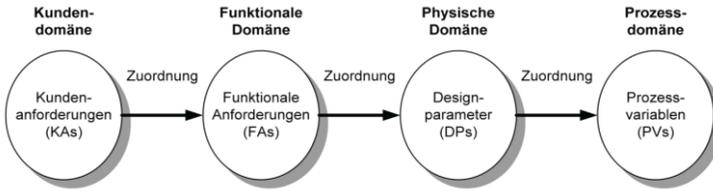


Bild 6.160: Domänen in Axiomatic Design [FL08]

Restriktionen (Constraints) definieren Grenzen für die Lösungssuche, die eingehalten werden müssen. Man unterscheidet zwischen Eingangsrestriktionen, welche die Planungsaufgaben bestimmen und Systemrestriktionen. Letztere bilden die Randbedingungen in welchen die Lösungen funktionieren müssen. Constraints unterscheiden sich von FRs durch die Tatsache, dass erstere nicht von anderen Constraints oder FRs unabhängig sein müssen. Weiters dürfen Constraints keinen Toleranzbereich aufweisen. Je mehr Constraints ein Entwicklungsprozess aufweist, desto einfacher ist es, Kundenwünsche in Functional Requirements umzuwandeln.

Eine Entwurfsmatrix stellt den Zusammenhang zwischen den funktionalen Anforderungen und den Lösungsparametern her. Dabei kann die Qualität der Konstruktion mit der Hilfe eines Zahlenverhältnisses zwischen den Designparametern und den Funktionsanforderungen bewertet werden. Eine optimale Konstruktionslösung liegt vor, wenn keine Parameterzahlabweichung vorhanden ist. Falls die Anzahl der Designparameter größer ist als jene der Funktionsparameter, spricht man von einer redundanten Konstruktion. Ist die Anzahl der Designparameter kleiner als die Anzahl der Parameter aus der Funktionsdomäne, so sind nicht alle Anforderungen erfüllt, oder es liegen unerwünschte Wechselbeziehungen vor.

Für die Bewertung von Konstruktionslösungen werden Axiome definiert. Das Unabhängigkeitsaxiom definiert Regeln für die Zuverlässigkeit von Entwürfen und das Informationsaxiom stellt einen quantitativen Vergleich zweier Entwürfe her.

Zwischen den Funktionsanforderungen und den Designparametern bestehen auf verschiedenen hierarchischen Ebenen Verbindungen. Beginnend mit der obersten Ebene werden den Parametern aus der funktionalen Domäne Designparameter in einem Zuordnungsprozess zugeordnet. Im nächsten Schritt erfolgt ein Rücksprung auf die Funktionsdomäne. Nun wird die zweite Ebene analysiert und auf die physische Domäne projiziert. Dieser Vorgang wird als „Zigzagging“ bezeichnet. Er dient zur Produktstrukturierung, die aufgrund einer rekursiven Projektion von Anforderungen auf Produktfunktionen entsteht.

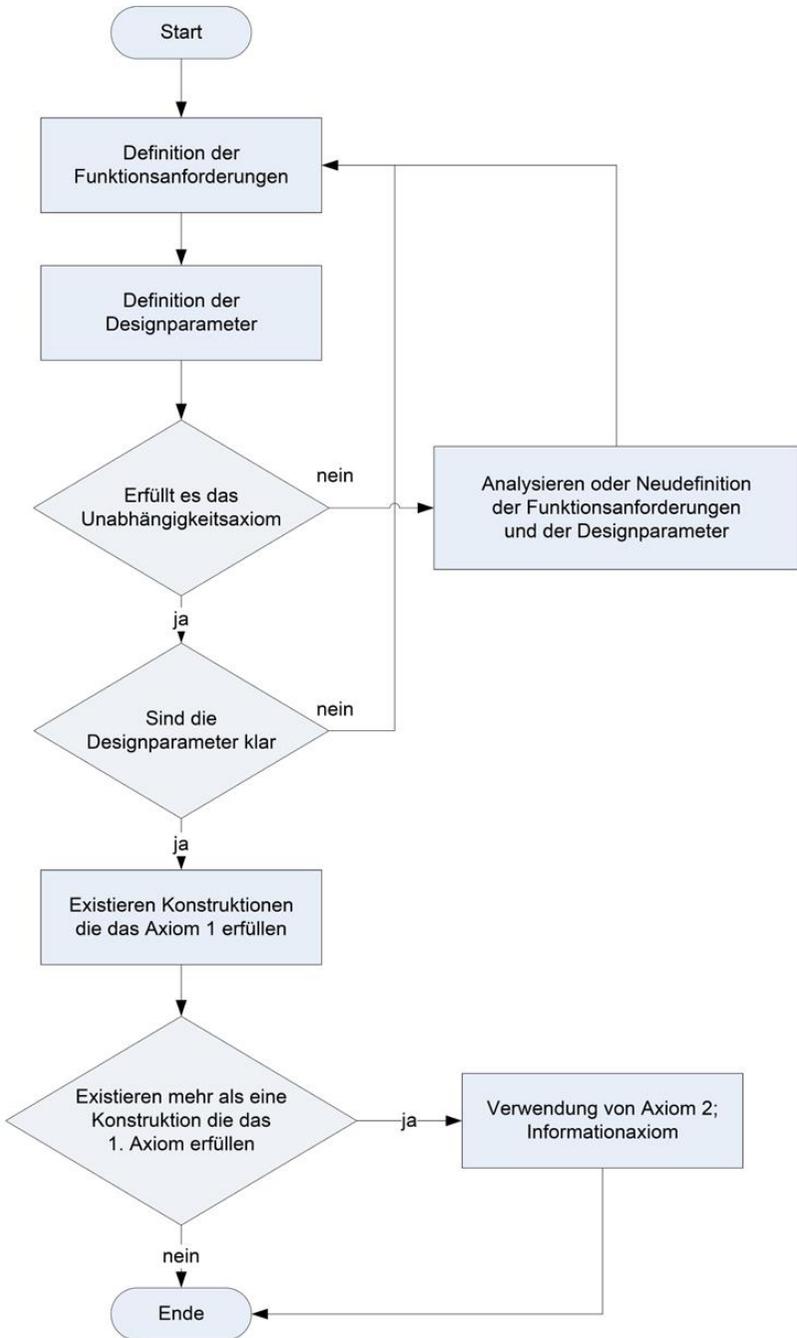


Bild 6.161: Ablaufdiagramm des Axiomatic Design [FL08]

Während des Entwicklungs- und Entwurfsprozess mit Axiomatic Design schreiten die ProduktentwicklerInnen zu immer detailreicheren Konkretisierungen fort. Nachdem die Kundenwünsche identifiziert sind, wird das zu entwickelnde Produkt in die Functional Domain und die Physical Domain unterteilt. Das ermöglicht die Definition von Functional Requirements – man spricht auch von FR-sets. Als nächstes müssen die ProduktentwicklerInnen ein Set von Design Parameters finden, das den Ansprüchen der zuvor festgelegten FRs genügt. Da die DPs essentiell für den Kreativprozess sind, können erst nach deren Festlegung weitere subfunctional requirements definiert werden. Danach wiederholt sich der Prozess von neuem bis alle elementaren Functional Requirements gefunden sind. In diesem Zusammenhang spricht man auch oft vom Zig-Zagging, da die KonstrukteurInnen beim Auflösen der Entwicklungsvorgaben den Konzeptions- und Lösungsraum im Zickzack durchlaufen. Die Idee des Zigzagging besteht darin, dass ein Entwickler im „Zickzack“ den Anforderungs- und Lösungsraum beim Zerlegen der Entwicklungsaufgabe durchläuft. Bevor ein FR weiter zerlegt werden darf, muss ein eindeutig zugehöriger DP formuliert werden. Ist das FR durch ein entsprechendes DP erfüllt, wird das FR in mehrere Sub-FRs bzw. in mehrere Teilanforderungen zerlegt. Diese hierarchische Zerlegung erfolgt solange, bis elementare FRs mit zugehörigen DPs gefunden sind. Das Zigzagging gibt damit eine zielorientierte Vorgehensweise vor.

Die Vorgehensweise des gesamten Axiomatic Designs stellt Bild 6.161 dar. Das Vorgehen in den relevanten Einzelprozessen Zuordnung und Dekomposition (Zigzagging) ist Bild 6.162 zu entnehmen.

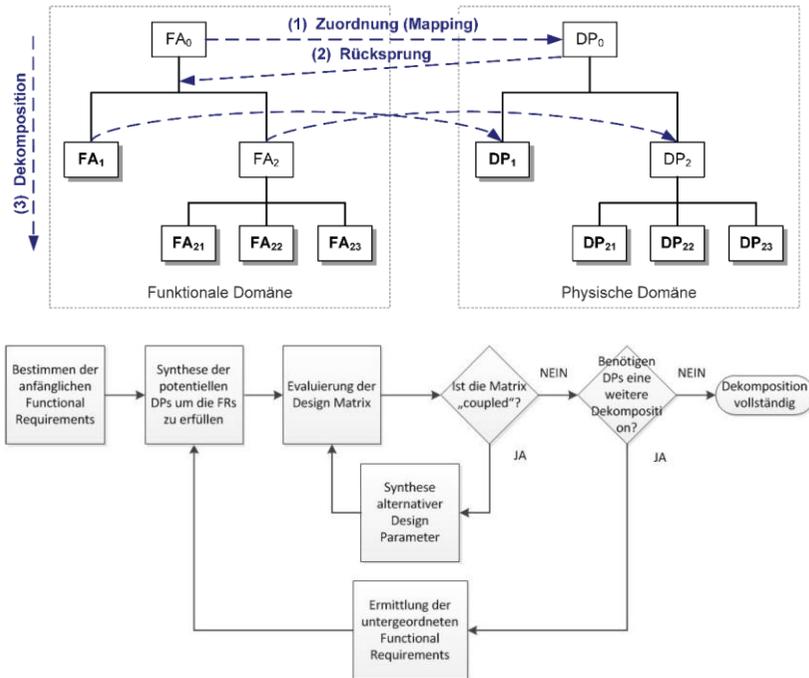


Bild 6.162: Zuordnungs- und Dekompositionsprozess im Axiomatic Design [FL08], [SYS12]

Mathematisch kann mit Hilfe des Unabhängigkeitsaxioms die Abbildung einer Domain auf eine andere, abstrakt durch die Anwendung der Matrizenrechnung erfolgen:

$$\begin{Bmatrix} \text{FR}_1 \\ \text{FR}_2 \\ \dots \\ \text{FR}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \text{DP}_1 \\ \text{DP}_2 \\ \dots \\ \text{DP}_n \end{Bmatrix} \quad \text{Glg. 55}$$

Diese Darstellung wird als Einflussmatrix $[A]$ bezeichnet und stellt den Zusammenhang zwischen den Functional Requirements und den zugehörigen Design Parameters einer Konkretisierungsstufe dar. Die Functional Requirements und Design Parameters einer Abstraktionsstufe werden jeweils in einem Vektor beschrieben. Um die Abhängigkeit zwischen einem FR und einem DP darzustellen, bedient man sich der „zweielementigen booleschen Algebra“ mit den zwei Zuständen „wahr“ bzw. „falsch“. Besteht eine Abhängigkeit zwischen FR_j und DP_j wird in der Matrix für a_j ein „x“ gesetzt, andernfalls „0“.

Die Einflussmatrix A kann somit drei mögliche Formen annehmen:

1. Sowohl ober- als unterhalb der Diagonalen a_{ii} gibt es $a_{ij} \neq 0$. Dieses Erscheinungsbild entspricht einem „coupled design“ und widerspricht dem Unabhängigkeitsaxiom. Der Ansatz stellt keine brauchbare Lösung dar:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 56}$$

2. Alle $a_{ij} = 0$ für $i \neq j$ Diagonalmatrix. Diese Matrix stellt ein „uncoupled design“ dar und ist damit die beste und erstrebenswerte Möglichkeit der Problemlösung:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 57}$$

3. Alle a_{ij} ober- oder unterhalb der Diagonale a_{ii} sind gleich Null (Dreiecksmatrix). Dies stellt ein „decoupled design“, was bedeutet, dass es nicht vollständig frei von Abhängigkeiten ist. Es stellt jedoch eine annehmbare Lösung dar.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 58}$$

Axiomatic Design eines Hängeförderers. Das Software-Tool Acclaro DFSS ist nach wie vor [DFS14] das einzige Werkzeug um mittels Axiomatic Design erstellte FR und DP sets zu analysieren und funktionell dekompositionieren. Es bietet die Möglichkeiten DFSS (Design for Six Sigma) Methoden auf den

Entwicklungsprozess anzuwenden (FMEA, TRIZ,...), Aximotic Design softwaregestützt einzusetzen und daraus Design-Matrizen abzuleiten (s. dazu Kap. 6.12.2.3) sowie weitere hier nicht nötigerweise darzustellende Optionen. Für die folgenden Ergebnisse in den Abbildungen kam eine Testlizenz von Acclaro DFSS zum Einsatz. Die daraus erstellten Ontologien und Matrizen sind im Rahmen des KBx optimal zur Beziehungsvisualisierung verwendbar. Für die Querverbindung zur xKBE-app (Kap. 6.14.2) existiert noch keine Schnittstellenlösung bzw. Workaround zur manuellen Übergabe; die xKBE-app als solche wird in einer höheren Ausbaustufe aber zumindest die Visualisierungsmöglichkeit von in der Datenbank vorhandenen Konstruktionsbeziehungen via DSM und DMM bieten.

Zur Visualisierung von konstruktiven Abhängigkeiten der Baugruppen und Komponenten an einem Hängeförderersystem (Definition siehe die Fachliteratur [HNS07], [BHS11], [MRW08]) zum Beispiel wie in Bild 6.163, wurde mittels Acclaro DFSS die Baugruppenstruktur erfasst, alle Designparameter gelistet und funktionale Anforderungen (FR) gestellt.

Die Abbildung mittels dem „Umweg“ über Axiomatic Design bietet dabei gegenüber dem herkömmlichen matrixbasierten Verfahren DSM die Möglichkeit, mehr als eine Domäne zu analysieren und somit zu einer DMM zu kommen.

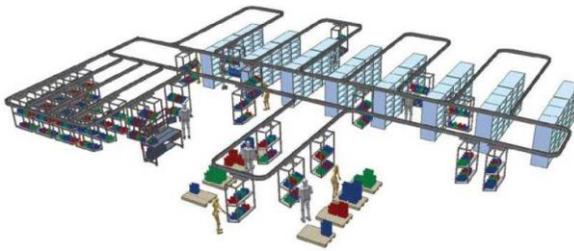


Bild 6.163: Beispiel einer Hängefördereranlage in einem Lager-Kommissionierbereich [OCS12]

Mit dem Axiomatic Design Ansatz ergeben sich die Domänen Produktstruktur (PS: Unterteilung in Baugruppen und Unterbaugruppen), Designparameter (DP) und funktionale Anforderungen (FR: Baugruppenanforderungen, Bemerkungen, Skriptenverweise, Formeln und Hinweise für den Anwender) wie in Bild 6.164 dargestellt.

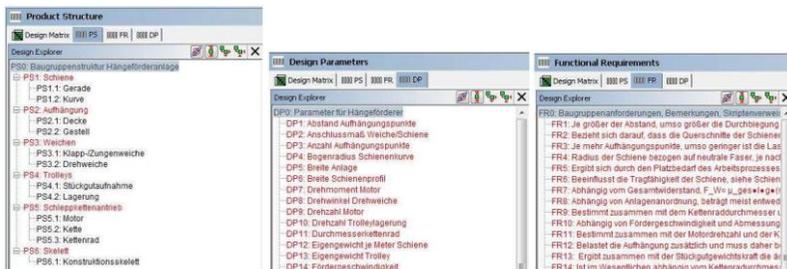


Bild 6.164: Produktstruktur, Designparameter und funktionale Anforderungen eines Hängeförderersystems (Auszug)

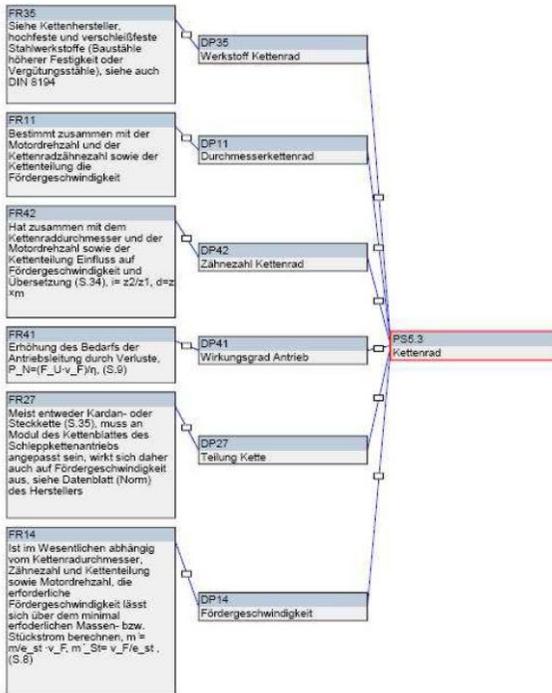


Bild 6.166: Darstellung der Verknüpfungen der Designparameter und funktionalen Anforderungen zum Antriebs-Kettenrad eines Hängeförderers (traceability-view abgeleitet aus der zugehörigen DMM)

Mit der Funktion „view traceability“ können die in der DMM verknüpften Relationen in einem Netzwerk dargestellt werden (Bild 6.166). Leider ist es nicht möglich, alle drei Domänen, also Function Requirements, Design Parameter und Product Structure gleichzeitig in einer großen Grafik darzustellen, sondern maximal zwei davon. Dies wurde hier mit den Baugruppen und Parametern durchgeführt, um auf konstruktiver Seite Informationen und Wissen für v.a. Änderungsprozesse bereitzustellen (s. dazu die Vor/Nachteile und Motivation zu KBE und KBX in Kap. 6.13.3). Wie ersichtlich können für eine ausgewählte Unterbaugruppe (hier: Kettenrad) die zugehörigen Baugruppenparameter und mit diesen verknüpft die Anwenderhinweise dargestellt werden. Dies ermöglicht einen raschen Überblick über alle Einflussfaktoren sowie das Auffinden von Informationen hierzu zur raschen Problemlösung für die jeweilige Baugruppe.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die **Entwicklung der Maschinen in der Fördertechnik**³¹⁵ ist von der geometrisch-stofflichen Gestaltung geprägt, die mit Aufgaben des modernen Maschinenbaus/Mechatronik, hinsichtlich Sensorik, Automatisierung und Einbindung in IT-Systeme, zusehends komplexere Anforderungen aus der Logistik erhält, die wiederum starken Trends (bspw. Megatrends wie Globalisierung, Urbanisierung, Individualisierung) und starkem Wachstum (bspw. e-commerce) unterworfen ist. Diese Maschinenentwicklung ist je nach Einsatzzweck in vielen Bereichen individuell. Somit weist das Engineering von Technischer Logistik und Fördertechnik viele Besonderheiten im Vergleich zu anderen Branchen auf. Vor allem wurde bisher in der (Intra)Logistik der geometrisch-stofflichen Gestaltung, also der klassischen Konstruktion, aufgrund der hohen IT-Relevanz der Logistik nicht ein ebenbürtiges Augenmerk geschenkt. Dies äußert sich in der Praxis als eine verbreitete Lücke des Einsatzes von Konstruktions-Entwicklungswerkzeugen und -methoden hin zu anderen Branchen; betrachtet werden dazu automotive/aerospace in Theorie und Praxis. Diese Branchen sind, durch kurze Produktlebensdauern, Produktindividualisierung, Komfort-, Sicherheits- und Effizienzthematiken, bereits lange in ihrer Entwicklung und Konstruktion zu Kreativität, Vielfalt und Zeitdruck (Virtualisierung) gefordert. Dementsprechend existiert dazu eine Fülle von Erfahrungen, die in den eigenen Fachbereich übertragbar sind.

Ziel der vorliegenden Habilitationsschrift ist, die identifizierte Engineering-Lücke in der Fördertechnik und der Technischen Logistik mit Beispielen und Methoden zu schließen. Dann können Produkte der Branche, ebenso wie jene aus automotive/aerospace, effizienter und kundenangepasster entwickelt sowie virtuell optimiert und abgesichert werden.

1. Identifikation der Entwicklungs-, Technologie-, und Methodenlücke im Engineering von Fördertechnik und Technischer Logistik. Dies wird erreicht durch einen, unter beobachteten Prämissen zu durchlaufenden, Prozess zum auch zukünftig Einsatz.
2. Beitrag zur Schließung der Lücke durch die entwickelten Methoden und damit Etablierung neuer und effizienter Vorgehensweisen wie in automotive/aerospace.
3. Vereinheitlichte und einfach zugängliche Darstellung der Methoden mit Nachweis ihrer Wirksamkeit durch ihre Anwendung an Beispielen aus der Technischen Logistik.

³¹⁵ Die **Fördertechnik** (venia beantragt) ist als historisch etablierte und gegenwärtig erstarkende anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin "Erfüllungsgehilfin" der Logistik in vor allem einer von drei materialflusstechnischen Hauptfunktionen. Im Kontext der Technik in der Logistik handelt es sich dabei um die Beherrschung vor allem intralogistischer Transportaufgaben für Schütt- und Stückgüter. Eine Vielzahl unterschiedlicher Maschinen und deren Systeme bewegen die Güter in allen drei Dimensionen möglichst ressourcensparsam und dabei so schnell wie nötig und sicher.

4. Stärkung der Wissenschaftlichkeit des Fachbereichs durch den Einsatz von Methoden und Aufbereitung von Grundlagen (Lehranhang).

Im ersten Kapitel – **Einleitung** – wird ausgehend von den logistischen Netzwerken der Fachbereich umrissen. Maßgebliche Faktoren werden in Form der Megatrends analysiert und in logistisch-technische Herausforderungen transferiert, die mit den in der Arbeit entwickelten Methoden effizienter bewältigbar werden.

Im zweiten Kapitel – **Engineering: Stand der Technik und Zielentwicklung** – werden Grundlagen und Definitionen der Entwicklung und Konstruktion dargestellt und die Lücke ausgearbeitet. Ein spezieller Blick auf die Grundlagen aus der Perspektive der Engineering-Tätigkeiten in der Logistik stellt die eigentliche Besonderheit des Abschnitts dar und differenziert ihn von einer reinen Grundlegendarlegung. Dargelegt werden eingehend Begriffe wie System, Logistik und Technische Logistik. Grundlagen zum Verständnis vor allem der virtuellen Produktentwicklungsmethoden werden zu Modellen und Modellbildung, Simulation und Simulationsmodell sowie CAx (CAD, MKS und FEM) ausgeführt. Daran knüpfen vergleichende Darstellungen von Produktentwicklungsarten und Konstruktionsmethoden an, um die Wichtigkeit dieser im Fachbereich wenig bekannten Werkzeuge darzulegen. Ausführungen zu Wissen und dessen Handhabung, automatischer Konstruktion (KBE) und dem Beziehungsmanagement von Konstruktionsobjekten beschließen den Grundlagenteil. Der anschließende Abschnitt über eine Analyse des Engineerings in der Technischen Logistik wirft einen kritischen Blick auf den Fachbereich, ob und wie die oben eingeführten Methoden und Werkzeuge, die ja oftmals im Umfeld automotive/aerospace entstanden, zum Einsatz kommen. Über den ersten Teil des Methodenidentifikationsprozesses werden drei Themenkreise eingeführt („konstruieren“, „berechnen“, „wissen“) und zu ersten Ansätzen für die Methoden entwickelt.

Im dritten Kapitel – **Methoden** – wird zuerst ein genereller Blick auf Methodenarten, Methodeinsatz und deren Sinnhaftigkeit und Auswahl gerichtet. Im zweiten Teil des Methodenidentifikationsprozesses werden ausgehend von den Ansätzen über bewertete Entscheidungen aus breiter Erfahrungs- und Quellenbasis schlussendlich zehn Methoden identifiziert, die die am Ende des zweiten Kapitels aufgezeigte Lücke schließen vermögen. Darauf folgt die Darstellung der zehn entwickelten Methoden in Datenblatt-Form. Ausgehend von einer Kurzbeschreibung (Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsansatz/Arbeitsprinzip) wird die Durchführung jeder Methode (Ablaufplan, Schritte, Hilfsmittel) erläutert.

Die jeweilige Einordnung in Entwicklungsprozessphasen (Vorgänger/Nachfolger im Produktentwicklungsprozess (PEP), Vernetzung zu anderen Methoden) und eine Bewertung (Nutzen und Aufwand, Vorteile und Nachteile) runden die Methodendarstellung mit Beispielen und Quellen ab. Die zehn Methoden sind den Kategorien Auswahlempfehlungen, Handlungsempfehlungen und operative Ansätze zuzurechnen und behandeln im Detail:

Themenkreis „konstruieren“:

1. *MeK1 – simultaneous engineering in der Logistik*, zeigt Schnittstellen und Zeitpunkte der Übergabe logistischer Planungsdaten hin zu technischen Anforderungsdefinitionen auf und legt das Potenzial der Vernetzung von Planung mit automatisierter Konstruktion dar.

2. *MeK2 – methodisches Entwickeln*, stellt (mit einem entwickelten Software-Werkzeug) phasen- und konstruktionsartenweise Methoden der Entwicklungsmethodik für die Entwicklungsarbeit in der Technischen Logistik bereit und ermöglicht so einen „barrierefreieren“ Zugang zur Entwicklungsmethodik.
3. *MeK3 – rechnergestützte Bereitstellung und Synthese von prinzipiellen Lösungen*, ermöglicht (auch mittels Software-Werkzeug) eine systematische Lösungsgenerierung mit Wissensspeicherung bei Neukonstruktionen und unterstützt damit das methodische Entwickeln.
4. *MeK4 – Methodikeinsatz im CAD*, zeigt die Notwendigkeit, Einsatzmöglichkeit und Anwendungspraxis von methodisch und damit effizient änderbaren CAD-Modellen in der Konstruktionstätigkeit auf (v. a. bei KMUs der Branche noch kein Standard!) und unterstützt damit das methodische Entwickeln.
5. *MeK5 – KBx*, bietet für die wissensgestützte, automatische Konstruktion der Technischen Logistik eine Klassifizierung und Funktionsspezifizierung der Konstruktionstätigkeiten und einen Entscheidungsfindungsprozess zum oder gegen den Einsatz (teil)automatisierter Konstruktion.

Themenkreis „berechnen“:

6. *MeB1 – Modellbildung und Simulation für die Technik der Logistik – CAE*, bietet einen Auswahlprozess ob und wofür CAE ein geeignetes Entwicklungswerkzeug darstellt und gibt einen Überblick über Einsatzmöglichkeiten bewährter Simulationsmethoden und Lösungen im Fach.
7. *MeB2 – Optimierung empirischer Berechnungsgrundlagen und -gültigkeiten durch CAE*, zeigt Wege zur Erstellung und Verbesserung empirischer, und im Fachbereich verbreiteter und akzeptierter, Berechnungsschemen mittels CAE auf und beschreibt Erstellungsmethoden dazu.
8. *MeB3 – template-driven Simulationslösungen*, zeigt Vorgehensweisen auf, wie von Spezialisten erstellte Simulationsmodelle für weniger versierte Anwender ohne Qualitätsverlust einfach und sicher verwendbar gemacht werden können.

Themenkreis „wissen“:

9. *MeW1 – Wissen im Konstruktions- und Entwicklungsprozess*, gibt einen Überblick für im Ingenieursalltag effizient einzusetzende Wissenswerkzeuge, ordnet diese den Konstruktionstätigkeiten und Wissensaufgaben zu und ermöglicht so die Auswahl des geeigneten Werkzeugs.
10. *MeW2 – Entwicklung und Dokumentation von Abhängigkeiten in automatischen Konstruktionen - xKBE-app*, ist ein softwaregestützter Ansatz zur Verwaltung und Weiterentwicklung von in automatisierten Konstruktionen enthaltenem Wissen.

Im vierten Kapitel – drei synoptische **Beispiele** für den Methodeneinsatz – wird aufgezeigt, wie, wofür und an welcher Stelle im Entwicklungsprozess die Methoden eingesetzt werden können und welche Wirkung damit erzielt wird. Für ein Ladehilfsmittel wird dessen Entwicklung durch den Einsatz von fünf der zehn vorgestellten Methoden beschleunigt, optimiert und weitestgehend virtuell durchgeführt. Die wesentlichen Inhalte sind:

- Frühestmögliches Klären der Aufgabenstellung mit den logistischen Herausforderungen verschafft Entwicklungszeitvorsprung (MeK1).
- Methodische Konstruktion und fast vollständige virtuelle Optimierung des Ladehilfsmittels steigert Entwicklungseffizienz (MeK2, MeK3, MeK4 und MeB1) und verschafft Lösungsvielfalt.
- Dokumentation und Wissensspeicherung sowie Entwurf zukünftiger Szenarien für die Vision 2050 des Physical Internets sichert und verbreitet Wissen (MeW1).

Entwicklungsziele eines Rollenförderers nach effizienter und (v. a. leitungs-)angepasster Konstruktion sowie das Beherrschen der Dynamik der am Förderer transportierten Güter werden durch den Einsatz von sechs Methoden beschleunigt erreicht. Das Beherrschen der Dynamik aller auf einem Verteilförderer eines Sortiersystems transportierten unterschiedlichen Güter ist wesentlich für die Systemleistungsfähigkeit. Beide Beispiele verwenden die Methoden ähnlich:

- Prinziplösungs-systematisierung und -generierung stellt Wissen für Neukonstruktionen bereit (MeW1).
- Generierungsmöglichkeit von Förderervarianten ermöglicht rasches Reagieren auf Anforderungsänderungen und unterstützt Anpassungskonstruktionen (MeK3 und MeK5 mit MeW2, Verteilförderer nur Variantenkonstruktion mit MeK5).
- Berechnung und Optimierung der Dynamik mit geführter (template-driven) MKS-Simulation virtualisiert die Entwicklung und sichert die hochdynamische Funktion (MeB1 und MeB3).

Im fünften Kapitel – **erreichte Ziele und Wirkung** – wird anhand ausgewählter Publikationen und Projekte die Wirkung des Methodeneinsatzes breit dargestellt. Nur durch deren Einsatz konnten die angeführten und bewerteten Ergebnisse erreicht werden, was das Schließen der identifizierten Lücke anzeigt. Da die Weiterverwendung und auch die Entwicklung neuer, weiterer Methoden ein erklärtes Ziel des Vorhabens darstellt, wird großes Augenmerk auf die Darstellung der Verwendungsmöglichkeit der Methoden gelegt.

Dies wird erreicht durch ein interaktives Methodeneinordnungsmodell, das die Hauptwirkungen der Methoden in drei Dimensionen (logistische Anlagengröße, Position im PEP, Detaillierung bzw. Verallgemeinerung der Aufgabe) grafisch darstellt (s. QR-Code im Anhang). Damit ist es sowohl zu Lehrzwecken einfach möglich die Wirkung der Methoden darzulegen, als auch zur Methodenweiter- und -neuentwicklung Bedarfe zu identifizieren.

Das sechsten Kapitel – **Lehranhang** – stellt den unidirektional aus der Schrift und damit auch separat zu verwendenden Lehranhang im Umfang von ca. 300 Seiten der Habilitationsschrift dar, der das Grundlagenkapitel erweitert. Dieser ist der Unterstützung der Lehre an der TU Graz im Umfeld des Engineerings in der Technischen Logistik bereits mit guter Resonanz dienlich.

Im siebenten Kapitel – **Zusammenfassung** – wird die Arbeit kurz und bündig dargelegt.

Im achten Kapitel – **Verzeichnisse** – ist die umfangreiche Quellensammlung hervorzuheben die über 450 wissenschaftliche Quellen der Arbeit listet (link dazu s. Anhang).

Im neunsten Kapitel – **Unterlagen des Habilitationsverfahrens** – enthält die Fachgebietsdarstellung und eine erweiterte Zusammenfassung der Arbeit.

Die **wissenschaftliche Neuheit der Arbeit** resultiert aus den, dem Engineering der Technischen Logistik dienlichen, Beispielen und Methoden, die als eine Zusammenschau langjähriger Konstruktions- und Berechnungserfahrung (eigene Publikationen) mit innovativen Produktentwicklungsmethoden systematisch entwickelt wurden. Ein solch spezifisches Engineering dient dem Bereich zukünftig zu einer systematischeren und innovativeren Produktentwicklung auf operativer und wissenschaftlicher Ebene. Eine besondere Leistung besteht darin, mit den Methoden und deren Identifikationsprozess dem Fach sowohl konkrete Werkzeuge als auch eine Forschungsrichtung mitzugeben.

7.2 Ausblick

Die vorgestellten Ansätze, das Engineering in der Technischen Logistik, mit modernen, branchen- und domänenübergreifenden Methoden der Produktentwicklung, zu höherer Leistungsfähigkeit, besserer Transparenz und mehr Virtualität zu führen, liefern einen Beitrag zur konkreten Anwendung im Jetzt und eine Perspektive für Forschungsansätze der nächsten Jahre. Die wissenschaftliche Herangehensweise, mit deduktiv entwickelten Methoden wiederholbar und nachvollziehbar überprüfbare Wirkungen in der abstrakten Tätigkeit des Engineerings erzeugbar zu machen, soll Beispielwirkung hervorrufen und von den jeweiligen Verantwortlichen in ihrem Einsatzgebiet maßgebend wiederverwendet werden. Dazu zählen v.a. die entwickelten Software-Hilfsmittel (apps), die im Sinne akademischer Forschung keinesfalls Fertigprodukte, sondern vielmehr Leuchttürme möglicher und sinnvoller Funktionalitäten sein wollen. Mit der Möglichkeit, durch den eingeführten Methodenidentifikationsprozess unter geänderten Voraussetzungen wieder je neue Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik zu schaffen, kann der Grundgedanke der Arbeit zukünftig weitergeführt und sogar auf weitere Branchen übertragen werden. Schlussendlich soll der Lehranhang, dem Sinne einer Habilitationsschrift genuin gemäß, Studierende zukünftig rascher in der Erarbeitung von Wissen in unterschiedlicher Tiefe zum Ziel führen, und ihnen Einblicke in übergreifende Bereiche und Disziplinen verschaffen.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur

Aufgrund der Zweiteiligkeit der Arbeit ist nicht jede Literaturquelle in jedem der beiden Teile vorhanden (s. Kap. 1.4). [P11] und [P13] sind jeweils zwei einzelne Publikationen, die im Text aber stets gemeinsam referenziert werden, da es sich um aufbauende bzw. fortsetzende Inhalte handelt.

Entgegen der üblichen Kürzelbildung wird für die sog. „Schlüsselpublikationen“, die einen wesentlichen Bestandteil der Arbeit darstellen (s. Kap. 5.3.1) eine abweichende Kurzzitierung mit [Pnn] mit nn von 1 bis 14 laufend gewählt. Dies soll im Fließtext leichter kenntlichmachen, wann und wofür diese Arbeiten herangezogen wurden.

- [AC12] acatech (Hrsg.): Menschen und Güter bewegen. Berlin: Springer, 2012
- [ACA12] acatech (Hrsg.): Faszination Konstruktion - Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel. Berlin: acatech, 2012
- [ADA14] Adams Support. MSC Software, 2014 [Zugriff am: 20. Februar 2014]. Verfügbar unter:
http://web.mscsoftware.com/products/adams_support.cfm?Q=396&Z=397
- [AF07] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: Materialfluss in Logistiksystemen. 5. Auflage, Berlin: Springer, 2007
- [AIK08] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel: Handbuch Logistik. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2008
- [ALC12] Alcyon Engineering PVT LTD. Introduction to Knowledge Based Engineering [online]. Alcyon, 2012 [Zugriff am: 07. November 2012]. PDF Format. Verfügbar unter:
<http://www.alcyon.co.in/whatiskbe.pdf>
- [ALC14] Need for KBE. Alcyon Engineering PVT LTD, 2014 [Zugriff am: 17. April 2014]. Verfügbar unter:
http://www.alcyon.co.in/kbe_need.html
- [ALT07] Altair HyperWorks. Altair Motion View [Software]. 25. Oktober 2007 [Zugriff am: 26. Jänner 2014]. Verfügbar unter:
<http://www.altairhyperworks.de/Product,18,MotionView.aspx>
- [AMM08] Alavi, Ali; May, Jared; Mohammed, Jaby: Application of Computer Aided Design (CAD) In Knowledge Based Engineering. Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference. Nashville: IAJC, 2008
- [AND10] Anderl, R.: Grundlagen des CAE/CAD. Darmstadt: selbst (Skript), 2010

- [ANS12] Ansys. Ansys Simulation Software [Software]. 14. April 2012 [Zugriff am: 07. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://www.ansys.com/>
- [ANS14] ANSYS 15.0 Release Highlights. Ansys, 2014 [Zugriff am: 20. März 2014]. Verfügbar unter: <http://www.ansys.com/Products/ANSYS+15.0+Release+Highlights>
- [ARN06] Arnold, Dieter (Hrsg.): Intralogistik - Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin: Springer, 2006
- [BAL15] Ballot, Eric: Physical Internet. In: Intralogistik 4.0?!. Graz: Verlag der TU Graz, 2015, (1. Band), S.127-158
- [BAT02] Bathe, K.J.: Finite-Elemente-Methoden. Berlin: Springer, 2002
- [BAU07] Bauer, Renate: Das Praxishandbuch Wissensmanagement: integratives Wissensmanagement. Graz: TU Graz, 2007
- [BAU14] Baumgarten, H: Das Beste in der Logistik – Auf dem Weg zu logistischer Exzellenz, Berlin (u.a.): Springer, 2008
- [BCK+98] Brimble, Richard; Callot, Martine; Kneebone, Stephen; Murton, Adrian; Oldham, Keith: MOKA - A Methodology and tools Oriented to Knowledge-based engineering Applications. In: Changing the Ways We Work. Amsterdam: IOS, 1998, S.198-207
- [BEN04] Bender, Bernd: Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin, 2004
- [BEP06] Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf: Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. 11. Auflage, Berlin: Springer, 2006
- [BER02] Geometrie: Friction modeling for dynamic system simulation. In: Appl Mech Rev. Cincinnati: ASME, 2002, 55(6), S.535-577
- [BEU15] BEUMERGROUP. Beumer Sortier- und Verteiltechnik [online]. , 2015 [Zugriff am: 1.Oktober.2015]. PDF Format. Verfügbar unter: https://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbrochures/BEUMER_Sortier-_und_Verteiltechnik_DE.PDF
- [BGH14] Bötzel, Marco; Groß, Wendelin; Herrmannsdörfer, Maja: Logistik im Handel - Strukturen, Erfolgsfaktoren, Trends. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2014
- [BH06] Bronner, Albert; Herr, Stephan: Vereinfachte Wertanalyse. 4. Auflage, Berlin: Springer, 2006
- [BH07] Bullinger, Hans-Jörg; ten Hompel, Michael: Internet der Dinge. Berlin: Springer, 2007

- [BHC+11] Bae, D.S.; Han, J.M.; Choi, J.H.; Yang, S.M.: A generalized recursive formulation for constrained flexible multibody dynamics. In: Numerical Methods in Engineering. New York: Wiley, 2011, 50(8), S.1841-1859
- [BHS11] Beck, Maria; ten Hompel, Michael; Sadowsky, Volker: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Heidelberg: Springer, 2011
- [BIL00] Bancroft, Chris N.; Ingram, André; Lovett, Phil J.: Knowledge-based engineering for SMEs-a methodology. In: Journal of Materials Processing Technology. Amsterdam: Elsevier, 2000, 107(1-3), S.384-389
- [BM11] Broßmann, Michael; Mödinger, Wilfried: Praxisguide Wissensmanagement: Qualifizieren in Gegenwart und Zukunft. Planung, Umsetzung und Controlling im Unternehmen. Berlin: Springer, 2011
- [BOD05] Bodendorf, Freimut: Daten- und Wissensmanagement. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [BOD06] Bode, Helmut: MATLAB - SIMULINK - Analyse und Simulation dynamischer Systeme. 2. Auflage, Wiesbaden: Teubner, 2006
- [BON13] Bongartz, Robert: Creo Parametric 2.0 - Einstiegskurs für Maschinenbauer. Wiesbaden: Springer, 2013
- [BRE14] Brecher, Christian: Industrie 4.0 - Virtualisierung und Vernetzung in der Produktion. Wien: Fraunhofer, 2014
- [BRO03] Brockhaus, Friedrich A. (Hrsg.): Der Brockhaus: Naturwissenschaft und Technik. 1. Auflage, Mannheim: Spektrum Akademischer Verlag, 2003
- [BRÖ08] Brökel, Klaus: Pro/ENGINEER - Effektive Produktentwicklung. Hallbergmoos: Pearson, 2008
- [BRU14] Brumand, Mahmoud. Was ist Wissenschaftstheorie [online]. 2014 [Zugriff am: 9. April 2014]. PDF Format. Verfügbar unter: https://www.fbi.h-da.de/fileadmin/personal/c.wentzel/was_ist_wissenschaftstheorie_mahmoud_brumand.pdf
- [BSW+09] Bullinger, Hans-Jörg; Spath, Dieter; Warnecke, Hans-Jürgen; Westkämper, Engelbert: Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin: Springer, 2009
- [BTD08] BIBA Bremen, TU Berlin, FLW Dortmund: Industrial Logistics - survey. in "Vorlesung Materialflusstechnik TU Graz 2013": o.V., 2008
- [CAT06] Catia Systems Engineering. Dymola [Software]. 21. Juni 2006 [Zugriff am: 24. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.3ds.com/products-services/catia/capabilities/modelica-systems-simulation-info/dymola>

- [CCT14] CCTech Live Channel. CCTech, 2014 [Zugriff am: 04. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.cctech.co.in/live/2012/09/05/pe-tc-creo-customization-using-vb-api-lecture1/>
- [CEL98] Celigoj, C.: Methode der Finiten Elemente. Graz: selbst (Skript), 1998
- [CFD14] Liggghts open source discrete element method particle simulation code. CFDEM Project, 2014 [Zugriff am: 16. März 2014]. Verfügbar unter: <http://www.cfdem.com/liggghts>
- [CKT06] Chiang, Tzu-An; Ku, Cheung-Chieh; Trappey, Amy J.C: Using a knowledge-based intelligent system to support dynamic design reasoning for a collaborative design community. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Godalming: Springer, 2006, 31(5-6), S.421-433
- [CKV08] Clement, Steffen; Kittel, Konstantin; Vajna, Sándor (Hrsg.): Pro/Engineer Wildfire 3.0 für Fortgeschrittene - kurz und bündig. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2008
- [CLA13] Clausen, Uwe; Geiger, Christiane (Hrsg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2013
- [CLT+10] Curran, Richard; van der Laan, Ton H.; van Tooren; Michel J.L; Verhagen, Wim J.C: A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD. In: Expert Systems with Applications. Amsterdam: Elsevier, 2010, 37(11), S.7336-7350
- [COD09] Knowledge-Based Systems with the CommonKADS Methodology. Code Project, 2009 [Zugriff am: 11. Oktober 2012]. Verfügbar unter: <http://www.codeproject.com/Articles/43474/Knowledge-Based-Systems-with-the-CommonKADS-Method#kbs1.1>
- [COM13] CompendiumLD Software. CompendiumInstitute, 2013 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://compendium.open.ac.uk/institute/download/download.htm>
- [COO11] Cooper, Cory A.: Development of a Methodology to Support Design of Complex Aircraft Wings. Dissertation, TU Delft: Faculty of Aerospace Engineering, 2011
- [CP99] Chapman, Colin; Pinfold, Michael: Design engineering - A need to rethink the solution using knowledge based engineering. In: 18th SGES International Conference on Knowledge-Based Systems and Applied Artificial Intelligence. Cambridge: Elsevier, 1999, 12(5-6), S.257-267
- [CRR+14] Cao, Liu; Richter, Klaus; Richter, Christian; Katterfeld, André: Logistics Journal 2014: Simulation der peristaltischen Förderung von Stückgütern als Schüttgut. Magedburg: Fraunhofer, 2014

- [CRR13] Cao, Liu; Richter, Christian; Richter, Klaus: Stückgüter als Schüttgut - Konzept Peristaltik-Förderer. In: 18. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2013. Magdeburg: Fraunhofer, 2013, Tagungsband, S.171-182
- [DAN05] Dankowicz, Harry: Multibody Mechanics and Visualization. Berlin: Springer, 2005
- [DAS06] Dassault Systems. Solidworks [Software]. 26. November 2006 [Zugriff am: 27. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.solidworks.at/>
- [DAS14] Dassault Systems. Catia [Software]. 08. Juli 2014 [Zugriff am: 06. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://www.catia.at/>
- [DEM12] Dematic Shuttle System. Dematic, 2012 [Zugriff am: 06. August 2012]. Verfügbar unter: <http://www.dematic.com/de-AT/Supply-Chain-Loesungen/Nach-Technologie/Lagertechnik/Dematic-Multishuttle-2-Lagersystem>
- [DEM13] Bausteine. dematic, [Zugriff am: 4.10.2013]. Verfügbar unter: <http://www.dematic.com/bausteine.net/img/showimg.aspx?biid=19636&guid=dcd6-5de4-4e1b-8b3e-590e4495ac2e&fd=3>
- [DEM14] EDEM Software Platform. DEM Solutions, 2014 [Zugriff am: 16. März 2014]. Verfügbar unter: <http://www.dem-solutions.com/software/edem-software>
- [DFS14] DFSS-Software. Acclaro DFSS Design Matrix [online]. DFSS, 2014 [Zugriff am: 13. Februar 2014]. PNG Format. Verfügbar unter: <http://www.dfss-software.com/images/features/ad-2.png>
- [D05] Dresig, Hans: Schwingungen und mechanische Antriebssysteme. 7. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [DH06] Dresig, Hans; Holzweißig, Franz: Maschinendynamik. 7. Auflage, Berlin: Springer, 2006
- [DIN 818-7] DIN (Hrsg.): DIN EN 818-7:2008-07 - Kurzgliedrige Rundstahlketten für Hebezwecke - Sicherheit - Teil 7: Feintolerierte Hebezeugketten, Güteklasse T (Ausführung T, DAT und DT). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008
- [DIN 15201] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer Benennungen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1994
- [DIN 15207] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer - Tragrollen für Gurtförderer - Hauptmaße der Tragrollen für Stückgutförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1988
- [DIN 15209] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer - Pufferringe für Pufferringrollen für Gurtförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1984
- [DIN 15210] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer - Stützringe für Stützringrollen für Gurtförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1984

VERZEICHNISSE

- [DIN 22101] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer Gurtförderer für Schüttgüter - Grundlagen für die Berechnung und Auslegung. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2011
- [DIN 22107] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer - Tragrollenanordnungen für Gurtförderer für Schüttgut - Hauptmaße. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1984
- [DIN 22200] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer - Gliederbandförderer - Berechnungsgrundsätze. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1994
- [DIN 2330] DIN (Hrsg.): DIN 2330 - Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2013
- [DIN 30781] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Transportkette - Grundbegriffe, Erläuterungen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1989
- [DIN 3569] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Stetigförderer; Klassifizierung von Stückgut. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1978
- [DIN 55405] DIN (Hrsg.): DIN 15201 - Verpackung - Terminologie - Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2005
- [DIN 69910] DIN (Hrsg.): DIN 69910 - Wertanalyse; Begriffe, Methoden. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1973 (zurückgezogen)
- [DOW95] Dowlatshahi, S: The role of logistics in concurrent engineering. Texas: Int. J. Production Economics, 1995, 44 S.189-199
- [DR06] Dahmen, Wolfgang; Reusken, Arnold: Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2006
- [DRO95] Droste, Heinrich: Untersuchungen an Kippelementen für Stückgutsortieranlagen. Dissertation, Hörsten: Universität Hannover, 1995
- [DS08] Dresig, Hans; Schreiber, Uwe: Vom Simulationsergebnis zur physikalischen Ursache - Interpretation von Simulationsergebnissen. Dresden: ITI GmbH, 2008
- [DSM09] The Design Structure Matrix (DSM). DSM Web, 2009 [Zugriff am: 24. Oktober 2012]. Verfügbar unter: <http://www.dsmweb.org/>
- [DSM14a] Design Structure Matrices (DSM) Tools. DSMweb, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://www.dsmweb.org/en/dsm-tools.html>
- [DSM14b] Clustering a Design Structure Matrice (DSM). DSMweb, 2014 [Zugriff am: 13. September 2013]. Verfügbar unter: <http://www.dsmweb.org/en/understand-dsm/technical-dsm-tutorial0/clustering.html>
- [DUB01] Dubbel, Heinrich: Taschenbuch für den Maschinenbau. 20. Auflage, Berlin: Springer, 2001
- [ECL12] eClass - Classification and Product Description. eClass, 2012 [Zugriff am: 11. Jänner 2014]. Verfügbar unter: www.eclasscontent.com

- [EH12] Ellinger, Marita; ten Hompel, Michael: Agentenbasiertes Planungsmodell für die Grobplanung von Kommissioniersystemen. Dortmund: Fraunhofer, 2012
- [EKL+14] Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren - Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Auflage, Berlin: Springer, 2014
- [EL14] Ehrentraut, Florian; Landschützer, Christian: D3.2 - Modular Logistic Unit Design. Graz: Modulushca, 2014
- [ELE12] Eley, Michael: Simulation in der Logistik. Berlin: Springer Gabler, 2012
- [EM07] Emberey, Clive L.; Milton, Nick R.: Application of knowledge engineering methodologies to support engineering design application development in aerospace. In: Collection of Technical Papers. Amsterdam: Elsevier, 2007, 1(1), S. 1-13
- [EM13] Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Auflage, München: Hanser, 2013
- [ENG13] Cambridge Advanced Modeller (CAM). Engineering Design Centre, 2013 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam>
- [ENG14] Set Visualiser. Engineering Design Centre, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: http://www-edc.eng.cam.ac.uk/tools/set_visualiser/
- [ES05] Eversheim, Walter (Hrsg.); Schuh, Günther (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer, 2005
- [ES09] Eigner, Martin; Stelzer, Ralph: Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2009
- [FE08] Femerling, Christian J.; Gleißner, Harald: Logistik: Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele. 1. Auflage, Wiesbaden: Gabler, 2008
- [FEL13a] Feldhusen, Jörg.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage, Berlin: Springer, 2013
- [FEL13b] Feldhusen, Jörg: Konstruktionslehre 1 Vorlesung 0 - Einführung. Aachen: RWTH Aachen, 2013
- [FEL14] Feldhusen, Jörg: Konstruktionslehre 1 Vorlesung 0 - Einführung. Aachen: RWTH Aachen, 2014
- [FEM 2.124] FEM (Hrsg.): FEM 2.124 - Einfluß der Schüttguteigenschaften auf Gestaltung und Bemessung gemuldeter Gurtförderer, englisch. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 1989
- [FEM 2.521] FEM (Hrsg.): FEM 2.124 - Gliederbandförderer - Berechnungsgrundsätze, deutsch. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 1995

- [FEM 9.222] FEM (Hrsg.): FEM 2.124 - Regeln über die Abnahme und Verfügbarkeit von Anlagen mit Regelbediengeräten und anderen Gewerken, deutsch. Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 1989
- [FF10] Fischer, Gabriel; Günthner, Willibald A.: Humanschwingungen bei Flurförderzeugen. München: TU München, 2010
- [FG08] Feldhusen, Jörg; Gebhardt, Boris: Product Lifecycle Management für die Praxis - Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung. Berlin: Springer, 2008
- [FL08] Fiege, Renè; Lüttich, Michael: Anwendung von Axiomatic Design für den Entwurf Serviceorientierter Architekturen. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2008
- [FL11] Fritz, Matthias; Landschützer, Christian: Modeling of damping elements for cable force reduction. In: Conference Proceedings of the 14th ITI Symposium. Dresden: , 2011, 14, S.133-137
- [FL12] Fritz, Matthias; Landschützer, Christian: Integration of SimulationX in a User-Optimized Application Software. In: Conference Proceedings of the 15th ITI Symposium. Dresden: , 2012, 15, S.303-308
- [FMI14] Functional Mock-up Interface. FMI, 2014 [Zugriff am: 22. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <https://www.fmi-standard.org/>
- [FOR03] Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 5. Auflage, Frankfurt am Main: VDMA, 2003
- [FOR14] FortnaInc. Fortna DC Design Suite [online]. YouTube, 2014 [Zugriff am: 18. Juni 2014]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=SKeYE5hWypU&feature=youtu.be>
- [FUN13] Functionbay. Complete Flexible & Rigid Body Dynamics Analysis [online]. RecurDyn, 2013 [Zugriff am: 05. Dezember 2013]. PDF Format. Verfügbar unter: <http://www.functionbay.de/phocadownload/RecurDyn%20Product%20Description%202013.pdf>
- [FUN95] Funk, Wolfram: Zugmittelgetriebe: Grundlagen, Aufbau, Funktion. Berlin: Springer, 1995
- [FWJ13] Fritz, Matthias; Wolfschluckner, Andreas; Jodin, Dirk: Simulation von Paketen im Pulk. In: logistics journal. 10.2195/lj_NotRev_fritz_de_201311_01, Stuttgart; Dortmund: online, 2013
- [FWLJ15] Fritz, Matthias; Wolfschluckner, Andreas; Landschützer, Christian; Jodin, Dirk: Simulation of parcel singulation processes - a DEM approach. In: Proceedings of the XXI International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Wien: MHCL, 2015, S.

- [GAR14] Gartlacher, Benjamin: Möglichkeiten zur Unterstützung des methodischen Konstruierens bei der Entwicklung Technischer Produkte. Diplomarbeit, Graz: TU Graz, 2014
- [GDL+06] González, Mariano; Dopico, Daniel; Lugrís, Urbano; Cuadrado, Juan: A benchmarking system for MBS simulation software: Problem standardization and performance measurement. In: Multibody System Dynamics. Berlin: Springer, 2006, 16(2), S.179-190
- [GDR08] Günthner, Willibald; Durchholz, Janina; Kraul, Ralf; Schneider, Oliver: Technologie für die Logistik des 21. Jahrhunderts. In: 4. Wissenschaftssymposium Logistik. Bremen: BVL, 2008
- [GEA71] Gear, C. W.: The Simultaneous Numerical Solution of Differential Algebraic Systems. In: IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971, Vol. 1, S.89-95
- [GEB14] Gebhardt, Andreas: 3D - Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM). München: Hanser, 2014
- [GEP11] Entwicklungsleiter AVL: Gedächtnisprotokoll eines Gesprächs zu KBE. Graz, 2011
- [GEP12] Entwicklungsleiter DEMAG: Gedächtnisprotokoll eines Gesprächs zu KBE. Dresden, 2012
- [GER99] Gerbert, Göran: Traction Belt Mechanics. Schweden: Göteborg, 1999
- [GH] Günthner, Willibald; ten Hompel, Michael: Memorandum - Technische Innovation in der Logistik. o.O.: VDMA Verlag, o.J.
- [GH07] Günthner, W; Heptner, K: Technische Innovationen für die Logistik. München: Huss-Verlag, 2007
- [GHO08] Ghoffrani, Mehdi: Entwicklung und Einführung eines flexiblen Softwaresystems zur Konfigurierung virtueller Produkte. In: Schriftenreihe Maschinenbauinformatik 1/2008. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, 2008
- [GK06] Gröger, Torsten; Katterfeld, Andre: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Grundlagen und Kalibrierung. In: Schüttgut. Magdeburg: Universität Magdeburg, 2006, 12(7), S.480-486
- [GKK13] Günthner, Willibald A. (Hrsg.); Katterfeld, André (Hrsg.); Krause, Friedrich (Hrsg.): 18. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2013. Magdeburg: Logisch GmbH, 2013
- [GL12] Gausemeier, Jürgen; Lanza, Gisela; Lindemann, Udo (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. München: Hanser, 2012

- [GÖT16] Göttlicher, Christoph: Steigende Kundenanforderungen im Kranbetrieb - die Produktentwicklung benötigt neue Ansätze. In: int. Kranfachtagung. Bochum: Selbstverlag der Ruhruniversität Bochum, 2016, 24, S. 11-14.
- [GOL15] Schüttgüter - Bildersammlung. GoldmannLindenberger GmbH, [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://goldmannlindenberger.de/schuettguter>
- [GPS10] Gil, Maclej; Pokojski, Jerzy; Szustakiewicz, Karol: Engineering knowledge modeling in design. Amsterdam: Elsevier, S.257-266
- [GR15] Griemert, R., Römisch, P.: Fördertechnik. 11. Auflage, Heidelberg: Springer, 2015
- [GRI97] Grimmer, Klaus Jürgen: Konstruktionslehre 2. Vorlesung, Leoben: Montanuniversität Leoben, 1997
- [GRU02] Grupp, Hariolf. Sie können ihr Wissen bald abschreiben [online]. Fraunhofer, 2002 [Zugriff am: 18. April 2014]. PDF Format. Verfügbar unter: <http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/magazin/pflege.zv.fhg.de/german/publications/df/df2002/mag1-2002-30.pdf>
- [GUD05] Gudehus, Timm: Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [GÜL03] Gülkenberg, Stefan: Wissensmanagement und Wissenscontrolling in lernenden Organisationen: Ein systemtheoretischer Ansatz. 4. Auflage, Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2003
- [GÜN10] Günthner, Willibald; ten Hompel, Michael (Hrsg.): Internet der Dinge. Berlin: Springer, 2010
- [GÜN14] Günthner, Willibald A.: Skriptum Maschinensystemtechnik. München: TUM, 2014
- [GÜN15] Günthner, Willibald: Visionen von morgen für die Herausforderungen von heute – Intralogistik intelligent automatisieren. In: Intralogistik 4.0?!. Graz: Verlag der TU Graz, 2015, (1. Band), S.200-221
- [GUU02] Guus, Schreiber: Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology. In: Artificial Intelligence in Medicine. Amsterdam: Elsevier, 2002, 24(1), S.97-102
- [GW11] Grosche, Tino; Wimmer, Thomas: Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin in: Flexibel-sicher-nachhaltig. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2011
- [HAI06] Haibach, Erwin: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2006
- [HAR02] Hartlieb, Erich: Wissenslogistik: effektives und effizientes Management von Wissensressourcen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2002

- [HAR02] Hartmann, S. O.: Simulation von Mehrkörpersystemen mit Kontakten komplexer. Aachen: Shaker, 2002
- [HDG+13] Hirz, Mario; Dietrich, Wilhelm; Gferrer, Anton; Lang, Johann: Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development. Berlin: Springer, 2013
- [HEB12] Vollständig dezentraler und autonomer Flexförderer. Hebezeuge Fördermittel, 2012 [Zugriff am: 09. November 2012]. Verfügbar unter: <http://www.hebezeuge-foerdermittel.de/vollstaendig-dezentraler-und-autonomer-flexfoerderer/2010/02/22>
- [HEG14] Hegmanns, Tobias: Planung und Berechnung der systemischen Leistungsverfügbarkeit komplexer Logistiksysteme. Tagungsband, Köln: Fraunhofer, 2014
- [HEI06] Heinecker, Markus: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Dissertation, Technische Universität München: Fakultät für Maschinenwesen, 2006
- [HER10] Hermann, Christoph: Ganzheitliches Life Cycle Management. Berlin: Springer, 2010
- [HES13] Hesse, Stefan: Grundlagen der Handhabungstechnik. 3. Auflage, München: Hanser, 2013
- [HGN92] Hansen, Hans Robert; Göpfrich, Hans Rudolf; Neumann, Gustaf: Wirtschaftsinformatik. 6. Auflage, Stuttgart: Lucius & Lucius, 1992
- [HIR11] Hirz, Mario: Advanced Computer Aided Design in Conceptual Automotive Development. Habilitationsschrift, Graz: TU Graz, 2011
- [HKS04] Hoffmann, Klaus; Krenn, Erhard; Stanker, Gerhard: Fördertechnik - Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen, Logistik. Band 1 u. 2, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 2004, 2005
- [HNP14] ten Hompel, Michael; Nettsträter, Andreas; Prasse, Christian: Infrastructure reduced logistics on the way to a hub to move. Köln: Fraunhofer, 2014
- [HNS07] ten Hompel, Michael; Nagel, Lars; Schmidt, Thorsten: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2007
- [HOI14] Fritz, Andreas; Hoischen, Hans: Technisches Zeichnen. 34. Auflage, Berlin: Cornelsen Scriptor, 2014
- [HOM14] ten Hompel, Michael: Entwicklung RackRacer aus 3D - Druck. Köln: Fraunhofer, 2014
- [HS08] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten: Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2008

- [HÜB10] Hübner, Karl-Thomas: Tragsicherheit automatisierter Hochregallager unter stoßartigen Beschickungslasten durch Regalbediengeräte. Dissertation, München: TU München, 2010
- [HUB84] Hubka, Vladimir.: Theorie Technischer Systeme. Berlin: Springer, 1984
- [HÜR81] Hürlimann, W: Methodenkatalog - Ein systematisches Inventar von 3000 Problemlösungsmethoden. In: Schriftenreihe der FritzZwicky. Bern: 1981
- [HWF+12] Haberfellner, Reinhard; de Weck, Olivier L.; Fricke, Ernst; Vössner, Siegfried: Systems Engineering - Grundlagen und Anwendungen. Zürich: Orell Füssli, 2012
- [IBM14] SPSS Software - Lösungen und Software für Predictive Analytics. IBM Software, 2014 [Zugriff am: 22. März 2014]. Verfügbar unter: <http://www-01.ibm.com/software/de/analytics/spss/>
- [IDC14] Metus Software. ID-Consult, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://id-consult.com/metus/metus-software>
- [IHM14] Cmap Tools. IHMC, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://cmap.ihmc.us/>
- [IIL14] Designcomiler. IILS, 2014 [Zugriff am: 21. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.iils.de/43.htm> - Designcomiler 43
- [IMA14] iMapping Tool. iMapping, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.imapping.info/>
- [IND13] Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt: acatech, 2013
- [INS14] Diskrete-Elemente-Methode (DEM). Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, 2014 [Zugriff am: 18. März 2014]. Verfügbar unter: http://www.isd.uni-stuttgart.de/forschung/fsp/sum/diskrete_elemente_sum/index.html
- [INT14] K-Infinity. Intelligent Views, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://www.k-infinity.de/>
- [ISO 10303] ISO (Hrsg.): ISO 10303 - Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdarstellung und -austausch. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2002
- [ISO 2382-1] ISO (Hrsg.): ISO/IEC 2382-1 - Informationstechnik - Begriffe - Teil 1: Grundbegriffe. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1993
- [ITI13] ITI GmbH: Proceedings of the 15th SimulationX Symposium. Dresden: ITI GmbH, 2013

- [ITI14] Worldsymposium 2014. ITI, 2014 [Zugriff am: 06. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://www.iti.org/worldsymposium2014/>
- [ITL14] Institut für Technische Logistik, TU Graz: „Entwicklung“ - Folder, Graz: o.V., 2014
- [JH12] Jodin, Dirk; ten Hompel, Michael: Sortier- und Verteilsysteme - Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung. 2. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2012
- [JOD11] Jodin, Dirk: Antrittsvorlesung: Technische Logistik - von der Förderkette zur Prozesskette. Graz: o.V., 2011
- [JOD12] Jodin, Dirk: Vorlesungsskriptum Materialflusstechnik. Graz: TU Graz, SS 2012
- [JT12] Jodin, Dirk; Trummer, Wolfgang: Zeitaufwand reduzieren - Wissensbasierte Methoden zur Planung von intralogistischen Anlagen und Systemen. f+h Projektguide Intralogistik. Mainz, 2012, Sonderband, S. 10-13
- [JÜN89] Jünemann, Reinhardt: Materialfluss und Logistik. Berlin: Springer, 1989
- [JW10] Jodin, Dirk; Wolfschluckner, Andreas: Merge problems with high speed sorters. In: Progress in Material Handling Research. Charlotte: NC, 2010, S.186-196
- [KAR12] KARIS PRO - Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistik-System in der Produktion. Karlsruher Institut für Technologie, 2012 [Zugriff am: 09. Oktober 2012]. Verfügbar unter: http://www.ifl.kit.edu/projekte_karispro.php
- [KAT08] Katterfeld, André: Einsatz der Diskrete Elemente Methode zur Simulation von Prozessen in der Schüttguttechnik. In: Tagungsunterlagen für den Schüttgut-Kongress. 28. Mai 2008, Würzburg: Vogel, 2008
- [KGZ12] Kartnig, Georg; Grösel, Bruno; Zrnica, Nenad: Past, State-of-the-Art and Future of Intralogistics in Relation to Megatrends. Belgrade: FME Transactions, 2012, (40), S.193-200
- [KL06] Kartnig, Georg; Landschützer, Christian: Analytic and experimental investigations on a rescue device. In: Proceedings of the XVIII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad: Universität Belgrad, 2006, S.227-234
- [KLE05] Klein, Bernd: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 6. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2005
- [KOE07] Koether, Reinhard; Technische Logistik. München: Hanser, 2007
- [KÖH10] Köhler, Peter (Hrsg.): Pro/Engineer - Praktikum. 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010

- [KOL98] Koller, Rudolf: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. 2. Auflage, Berlin: Springer, 1998
- [KOS93] Koschnick, Wolfgang: Standardwörterbuch für die Sozialwissenschaften. München: G. Saur, 1993
- [KPS75] Kurth, Friedrich; Pajer, Jin; Scheffler, Martin: Grundlagen der Fördertechnik. 5. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik, 1975
- [KR09] Krappe, Hardy: Erweiterte virtuelle Umgebungen zur interaktiven, immersiven Verwendung von Funktionsmodellen. Dissertation, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009
- [KR14] Krcmar, Helmut; Rehäuser, Jakob. Wissensmanagement im Unternehmen [online]. Winfobase, 2014 [Zugriff am: 17. April 2014]. PDF Format. Verfügbar unter:
[http://www.winfobase.de/lehrstuhl%5Cpublikat.nsf/intern01/FC0F0EC41403EF3D412566500029C4A5/\\$FILE/96-14.pdf](http://www.winfobase.de/lehrstuhl%5Cpublikat.nsf/intern01/FC0F0EC41403EF3D412566500029C4A5/$FILE/96-14.pdf)
- [KRA06] Krause, Friedrich: Forschungsgebiet mit Zukunft. In: Schüttgut. Magdeburg: Universität Magdeburg, 2006, 12(6), S.474-478
- [KRA08] Krach, Wolfgang: Analysing assemblies and nonlinear problems in CAD-integrated finite element programs - A discussion about possibilities and bounds using practical examples. Wiesbaden: NAFEMS, 2008
- [KRA09] Krach, Wolfgang: FEM Konstruktion. In: Industriemagazin. Nr. 7, Wien: Konstruktionssoftware, 2009
- [KRC05] Krcmar, Helmut: Informationsmanagement. 4. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [KRE12] Kress, Gerald: Einführung in die FEM - Programme. Zürich: ETH, 2012
- [LA09] Landschützer, Christian: Der Ingenieur in der Technischen Logistik. In: Technische Logistik - Wohin geht die Reise? Vortrag, Dortmund: Institut für Technische Logistik, 2009
- [LAN09] Landschützer, Christian: A new way to calculate for chain lengths with maximal dynamic forces at electric chain hoists. In: Proceedings of the XIX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad: MHCL, 2009, S.79-84
- [LAN04] Landschützer, Christian: Analyse von Schwingvorgängen an einsträngigen Elektrokettenzügen. Dissertation, Graz: Institut für Technische Logistik, 2004
- [LAN15] Landschützer, Christian: Vorlesungsskriptum CAE 2015 - TU Graz. Graz: 2015
- [LCK10] Libert, Sergey; Chisu, Razvan; Keutner, Konstantin: Eine Ontologie für das Internet der Dinge. In: Günthner, Willibald; ten Hompel, Michael (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2010

- [LE13] Landschützer, Christian; Ehrentraut, Florian: D3.1 - Iso-modular logistics containers. Graz: Modulushca, 2013
- [LEF13] Landschützer, Christian; Ebner, Martin; Fritz, Matthias: e-learning for CAE. Vortrag, Graz: Institut für Technische Logistik, 2013
- [LEH99] Allgemeine Bewertungsmethoden. Lehrgang Konstruktionsmethodik, 1999 [Zugriff am: 21. Jänner 2014]. Verfügbar unter: https://homepages.fhv.at/hs/Konstruktionsmethodik/Kap_07/Bewert.htm
- [LEX16] Wiki-Software lexiCan®, 2016 [Zugriff am: 21. Jänner 2016]. Verfügbar unter: https://lexican.de/?qclid=CjwKEAiAova1BRDS15OXjcug_FMSJACWNAKZRZUtEoqDEyhMHLyYn_mUNZHpgJ0hk8y5MbUNZCecPBoCJXbw_wcB
- [LF10] Landschützer, Christian; Firtz, Matthias: Siumlation of load transposition in overhead lines . In: Conference Proceedings of the 13th ITI Symposium. Dresden: , 2010, 13, S.338-350
- [LIE03] Liese, Harald: Wissensbasierte 3D-CAD Repräsentation. Aachen: Shaker, 2003
- [LIN05] Lindemann, Udo: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin: Springer, 2005
- [LIN09] Lindemann, Udo: Methoden der Produktentwicklung: Vorgehensmodelle - Grundprinzipien - Methoden. Berlin: Springer, 2009
- [LJ12] Landschützer, Christian; Jodin, Dirk: Knowledge-Based Engineering (KBE) für Hubseiltrommeln. 20. Kranfachtagung, Dresden: Selbstverlag der TU Dresden, 2012
- [LOG08] Taylor, Don: Logistics Engineering Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2008
- [LOG15] Logistiklexikon iOS-app. Fraunhofer IML, [Zugriff am: 1.Oktober.2015]. Verfügbar unter: <https://itunes.apple.com/de/app/logilex/id448296297?mt=8>
- [LOO14] Looimeo - Complexity Software. Looimeo, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.teseon.de/loomeo>
- [LOS06] Lossack, Ralf-Stefan: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion. Berlin: Springer, 2006
- [LP08] Lindemann, Udo; Ponn, Josef: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2008
- [LW10] Landschützer, Christian; Wolfschluckner, Andreas: Simulation potentialities for a reciprocating compressor. In: Proceedings in manufacture systems [Elektronische Ressource]. Bukarest, 2010, 5(2), S.95-100

- [M2115] MODULUSHCA Consortium: MODULUSHCA Deliverable 2.1: Framework for Physical Internet enabled interconnected FMCG logistics. Paris: non public, 2013
- [MAR11] Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik. 8. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011
- [MAT08] MathWorks. SimMechanics - Model and simulate multibody mechanical systems [Software]. 18. Mai 2008 [Zugriff am: 24. Jänner 2014]. Verfügbar unter: http://de.mathworks.com/products/simmechanics/?s_cid=books_spot_cat7_products
- [MAT15] Materialflusstechnik - Bildersammlung. JM Fachmedien, [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://materialfluss.de>
- [MAU07] Maurer, Maik. Dissertation - Structural Awareness in Complex Product Design [online]. TU München, 2007 [Zugriff am: 19. April 2014]. PDF Format. Verfügbar unter: http://www.researchgate.net/profile/Maik_Maurer/publication/36420600_Structural_Awareness_in_Complex_Product_Design/links/0fcfd505c17a038693000000.pdf
- [MEP14a] Probleme methodisch lösen. Meport.net - das Methodenportal, 2014 [Zugriff am: 11. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.meport.net/index.php>
- [MEP14b] Funktionsanalyse. Meport, 2014 [Zugriff am: 20. Jänner 2014]. Verfügbar unter: www.meport.de
- [MET15] Methodeneinordnungsmodell. Landschützer, Christian, 2015 [Zugriff am: 1. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://ortner-pichler.at/Methodenmodell>
- [MEY07] Meywerk, Martin: CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Berlin: Springer, 2007
- [MIC14] Microsoft Visio Standard 2013. Microsoft Office, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://office.microsoft.com/de-de/visio/visio-standard-2013-software-zum-erstellen-von-diagrammen-FX103791871.aspx>
- [MIX14] Microsoft Excel. Microsoft, 2014 [Zugriff am: 23. März 2014]. Verfügbar unter: <http://office.microsoft.com/de-de/microsoft-excel-tabellenkalkulationssoftware-FX010048762.aspx>
- [MIL08] Milton, Nick: Knowledge Technologies. Corso Milano: Polimetria, 2008
- [MOD05] Modelica.org. Modelica [Software]. 04. Juni 2005 [Zugriff am: 25. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <https://www.modelica.org/>
- [MOD12] MODULUSHCA. PTV, [Zugriff am: 1. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://www.modulushca.eu/index.php/the-project>

- [MOD13] MODULUSHCA Consortium: MODULUSHCA Deliverable 2.1: Framework for Physical Internet enabled interconnected FMCG logistics. Paris: non public, 2013
- [MOD14a] Modelica and the Modelica Association. Modelica, 2014 [Zugriff am: 21. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <https://www.modelica.org/>
- [MOD14b] Functional Mockup Interface (FMI). Modelica.org, 2014 [Zugriff am: 20. März 2014]. Verfügbar unter: <https://www.modelica.org/publications/newsletters/2010-1/index.html#item8>
- [MOK12a] Moka-Projekt. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 11.5.2015]. Verfügbar unter: <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/project.htm>
- [MOK12b] Moka-Report. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 12.5.2012]. Verfügbar unter: <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/reports/publicreport99.pdf>
- [MOK12c] Moka-Report. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 30.5.2012]. Verfügbar unter: <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/consortium/d4-3.pdf>
- [MOK12d] Moka-Report. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 18.6.2012]. Verfügbar unter: <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/Papers/cirp.pdf>
- [MOK12e] Moka-Report. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 25.6.2012]. Verfügbar unter: http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/consortium/mig_def.pdf
- [MOK12f] Moka-Report. MOKA-Konsortium (Hrsg.), 2012 [Zugriff am: 25.6.2012]. Verfügbar unter: <http://web1.eng.coventry.ac.uk/moka/Documents/Papers/ekaw2000.pdf>
- [MON11] Montreuil, Benoit: Towards a Physical Internet: Meeting the Global Logistics Sustainability Grand Challenge. Montreal: Montreuil and Cirrelet, 2011
- [MON12] Montreuil, Benoit. Physical Internet Manifesto [online]. , 2012 [Zugriff am: 15. November 2012]. PDF Format. Verfügbar unter: <http://physicalinternetinitiative.org/Physical%20Internet%20Manifesto%20Version%201.11%202012-11-20.pdf>
- [MOS12] Moser, Christian: Kraftübertragung an Hebezeugkettenrieben. Dissertation, Graz: Institut für Technische Logistik, 2012
- [MRW08] Martin, Heinrich; Römisch, Peter; Weidlich, Andreas: Materialflusstechnik. 9. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2008

- [MSC10] MSC Software. Adams - Mehrkörpersimulation [Software]. 16. Dezember 2010 [Zugriff am: 07. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://www.mscsoftware.com/de/product/adams>
- [MSC12] MSC Software: Adams User Meeting 2012. München: MSC, 2012
- [MSC14] MSC Software. MSC Software Corporation, 2014 [Zugriff am: 06. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://www.mscsoftware.com/>
- [MÜL12] Müller, Dominik: Knowledge Based Engineering Lösung für Komponenten eines Elektrokettenzuges. Master Thesis, Hochschule RheinMain: o.V., 2012
- [MUN04] Munjiza, Ante: The Combined Finite-Discrete Element Method. New York: Wiley, 2004
- [NAC10] Nachtigall, Werner: Bionik als Wissenschaft - Erkennen, Abstrahieren, Umsetzen. Berlin: Springer, 2010
- [NAE09] Naefe, Paul: Einführung in das methodische Konstruieren. Berlin: Springer, 2009
- [NAI82] Naisbitt, J.: Ten New Directions Transforming Our Lives. Warner Books, Inc., 1982
- [NAS15] cosmic objects. NASA, [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. Verfügbar unter: http://www.nasa.gov/images/content/712130main_8246931247_e60f3c09fb_o.jpg
- [NH01] Negrut, Dan; Harris, Ben: Adams Theory in a Nutshell. Michigan: University of Ann Arbor, 2001
- [NW03] Niemann, Gustav; Winter, Hans: Maschinenelemente. Band 3, Berlin: Springer, 2003
- [NWH05] Niemann, Gustav; Winter, Hans; Höhn, Bernd: Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 4. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [OCE14a] Cambridge Advanced Modeller (CAM). OC Engineering Design Centre, 2014 [Zugriff am: 17. April 2014]. Verfügbar unter: <https://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam>
- [OCE14b] Set Visualiser. OC Engineering Design Centre, 2014 [Zugriff am: 17. April 2014]. Verfügbar unter: http://www-edc.eng.cam.ac.uk/tools/set_visualiser/
- [OCS12] OCS Overhead Conveyor System AB. OCS, 2012 [Zugriff am: 05. Juli 2012]. Verfügbar unter: <http://www.ocssysteme.de/>
- [OFF08] Offenlegungsschrift DE 10 2008 040 204 AI 2010.01.14, M. Siering: Vorrichtung und Verfahren zum Transportieren von Produkten mit Linearantrieb, 2008.

- [ÖNO 9722] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer für Schüttgut - Gurtförderer mit gemeldeter Gurtführung (ausgenommen tragbare Gurtförderer) - Kantenabstände der Gurte. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1999
- [ÖNO 9723] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer für Schüttgut - Gurtförderer mit gemeldeter Führung (ausgenommen tragbare Gurtförderer). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001
- [ÖNO 9724] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer für Schüttgut - Tragrollen und Tragrollenanordnung - Gurtförderer mit gemeldeter Gurtführung (ausgenommen tragbare Gurtförderer). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001
- [ÖNO 9725] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer - Gurtförderer in leichter Ausführung (einschließlich fahrbarer und tragbarer Gurtförderer). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001
- [ÖNO 9726] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer - Gurtförderer - Technische Daten von Trommelmotoren. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001
- [ÖNO 9727] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer für Schüttgut - Gliederbandförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [ÖNO 9751] ÖNORM (Hrsg.): ÖNORM M 9722 - Stetigförderer - Gurtförderer für Schüttgüter - Vereinfachte Berechnung und Auslegung. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2005
- [OSL11] Osman, Kresimir; Stamenkovic, Dragi; Lazarevic, Mihailo: Robust Product Architecture Development Combining Matrix-Based Approaches and Function-Based Failure Propagation Method-M-FBFP Framework. In: FME Transactions. Belgrad: Faculty of Mechanical Engineering, 2011, 39(4), S.145-156
- [ÖST14] Statistik Austria. ÖSTAT, 2014 [Zugriff am: 23. März 2014]. Verfügbar unter: <http://www.statistik.at/>
- [OVF+10] Overmeyer, Ludger; Ventz, Kai; Falkenberg, Sascha; Krühn, Tobias: Interfaced multidirectional small-scaled modules for intralogistics operations. In: Logistic Research. Berlin: Springer, 2010, 2(3-4), S.123-133
- [P1] Landschützer, Christian: Schwingungssimulation von Rundstahl-Elektrokettenzügen. In: Konstruktion. 2010, 62, S.59-66
- [P2] Landschützer, Christian: Der Polygoneffekt bei Rundstahlkettentrieben. In: int. Kranfachtagung. Bochum: Selbstverlag der Ruhruniversität Bochum, 2013, 21, S.21-35
- [P3] Landschützer, Christian; Jodin, Dirk: Wissensgestützte Methoden und Werkzeuge zur Geräteentwicklung und -konstruktion in der Technischen Logistik. In: Jahrbuch der Logistik. 2014, S.40-45

- [P4] Jodin, Dirk; Landschützer, Christian: KNOWLEDGE-BASED METHODS FOR EFFICIENT MATERIAL HANDLING EQUIPMENT DEVELOPMENT. In: Proceedings International Material Handling Research Colloquium 2012 - Gardanne. 2012, in press
- [P5] Landschützer, Christian; Jodin, Dirk; Wolfschluckner, Andreas: KNOWLEDGE BASED ENGINEERING – AN APPROACH VIA AUTOMATED DESIGN OF STORAGE/RETRIEVAL SYSTEMS. In: Proceedings in manufacturing systems. 2011, 6, S.3-10
- [P6] Landschützer, Christian; Jodin, Dirk; Thoresson, Julian: Knowledge-Based Engineering in der Technischen Logistik. In: Hebezeuge und Fördermittel. 2012, 1-2, S.38-41
- [P7] Landschützer, Christian: Methoden zur effizienten Anwendung und Verbreitung von Simulation in der Technischen Logistik. Graz: Institut für Technische Logistik, 2014
- [P8] Wolfschluckner, Andreas; Landschützer, Christian; Jodin, Dirk: Dynamics of Sag Flat Cables in the Context of Load Transposition of Overhead Lines. In: Proceedings of the XX International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics. Belgrad: MHCL, 2012, S.303-308
- [P9] Wolfschluckner, Andreas; Landschützer, Christian; Jodin, Dirk: Ein Beitrag zur Auswahl der Modellbildung des dynamischen Verhaltens von Seilen. In: Konstruktion. Berlin: Springer, 2013, 1-2, S.69-74
- [P10] Landschützer, Christian; Ehrentraut, Florian; Jodin, Dirk: Containers for the Physical Internet: requirements and engineering design related to FMCG logistics. In: logistics research. Berlin: Springer, 2015, DOI 10.1007/s12159-015-0126-3, online
- [P11] Landschützer, Christian; Fritz, Matthias; Jodin, Dirk: KNOWLEDGE BASED ENGINEERING AND MODERN CAE FOR SORTING SYSTEMS. In: Proceedings in manufacturing systems. Bucharest: , 2012, 2, S.69-76
- Landschützer, Christian; Wolfschluckner, Andreas; Jodin, Dirk: CAE for high performance in-feed processes at sorting systems. In: Proceedings in manufacturing systems. Bucharest: , 2013, 2, S.79-86
- [P12] Oser, Jörg; Landschützer, Christian: Drive and motion design in material handling equipment. In: Proceedings International Material Handling Research Colloquium 2010 - Milwaukee. 2010, 338-350
- [P13] Jodin, Dirk; Gasperin, Simon; Landschützer, Christian: Zur Ermittlung von Spielzeiten - Teil 1. In: Vereinigte Fachverlage. Mainz: Huss, 2010, 10, S.354-365
- Jodin, Dirk; Gasperin, Simon; Landschützer, Christian: Zur Ermittlung von Spielzeiten - Teil 2. In: Vereinigte Fachverlage. Mainz: Huss, 2010, 11, S.406-409

- [P14] Landschützer, Christian: Dynamische Lasten beim Betrieb eines Kettenzuges; eine neue Auslegungsberechnung im Vergleich zur EN 818/7. In: int. Kranfachtagung. Magdeburg: Selbstverlag der Otto-von-Güricke Universität Magdeburg, 2014.
- [Pr1] Haberer, C.; Landschützer, C.; Wolfschluckner, A.: Auslegung und Simulation eines Kettenfahrwerkes. - in: DMK 2015 (2015), S. 631 – 641, 7. Dresdner Maschinenelemente-Kolloquium, Dresden: 2015.
- [Pr2] Institut für Technische Logistik TU Graz. Tätigkeitsbericht 2012. Graz; Selbstverlag, 2012
- [Pr3] Ortner-Pichler, A.; Rackl, M.; Landschützer, C.; Kessler, S.; Jodin, D.; Günthner, W. A.: Biomasselogistik – innovative Ansätze zur bedarfsorientierten Versorgung von Hackgutfeuerungen. - in: 20. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2015. (2015), S. 213 – 225, Magdeburg: 2015.
- [Pr4] Institut für Technische Logistik TU Graz. Tätigkeitsbericht 2012. Graz; Selbstverlag, 2012
- [Pr5] Lichtenegger, Martin: Steuerkettentriebs-Tool zur kinematisch optimierten und reibungsgünstigen Vorauslegung. Bachelorarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2013
- [Pr6] Institut für Technische Logistik TU Graz. Tätigkeitsbericht 2013. Graz; Selbstverlag, 2013
- [PAR10] Partsch, Helmut: Requirements-Engineering systematisch. Berlin: Springer, 2010
- [PER14] Perfler, Johannes: Ansatz zur Rechnergestützten Entwicklungsmethodik von Stetigförderern in der Intralogistik. Diplomarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2014
- [PFO00] Pfohl, Hans-Christian: Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Berlin: Springer, 2000
- [PIA09a] Piatkowski, Thomasz: Analysis of translational positioning of unit loads by directionally-oriented friction force fields. In: Mechanism and Machine Theory. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2011, 46(2), S.201-217
- [PIA09b] Piatkowski, Thomasz: Model and analysis of the process of unit-load stream sorting by a manipulator with torsional disks. In: Journal of theoretical and applied mechanics. Warsaw: Polish soc theoretical & applied mechanics, 2009, 47(4), S.871-896
- [PIC12] Pichler, Alexander: Knowledge-based Engineering zur Grobplanung und Gestaltung automatisierter Hochregallager. Diplomarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2012
- [PKK88] Pajer, Jiri; Kuhnt, H; Kurth, F: Stetigförderer. 5. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik, 1988

- [PKP79] Pajer, G; Kurth, F; Pfeifer, M: Tagebaugroßgeräte und Universalbagger. Berlin: VEB Verlag Technik, 1979
- [POK06] Pokojski, Jerzy: Knowledge Based Engineering and Intelligent Personal Assistant Context in Distributed Design. In: Intelligent Computing in Engineering and Architecture. Berlin: Springer, 2006, Band 4200, S.519-528
- [POL11] Polach, Oldrich: Kontakt Rad-Schiene: Ein kleines Detail mit grossen Auswirkungen. Antrittsvorlesung, Zürich: ETH Zürich, 2011
- [POL15] Polach, Oldrich. Kontakt zwischen Rad und Schiene – das Kernelement der Dynamik der Schienenfahrzeuge [online]. 1999 [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. PDF Format. Verfügbar unter: http://polach.ch/data/object_7/ETH_Dec_1999.pdf
- [PS08] Piatkowski, Thomasz; Sempruch, Janusz: Model of the process of load unit stream sorting by means of flexible active fence. In: Mechanism and Machine Theorie. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2008, 43(5), S.549-564
- [PS09] Piatkowski, Thomasz; Sempruch, Janusz: Model of inelastic impact of unit loads. In: Packaging Technology and Science. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009, 22(1), S.39-51
- [PSO06] Pawellek, Günther; O'Shea, Miriam; Schramm, Andreas: Optimieren der Methodenanwendung mittels intranetbasiertem Methoden-Management-System. München: Carl Hanser-Verlag, 2006, 9(101), S.529-533
- [PSS05] Pawellek, Günther; O`Shea, Miriam; Schramm, Andreas: Logistikgerechte Produktentwicklung. In: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe. Sonderdruck aus Heft 3, Düsseldorf: Springer, 2005
- [PTC11] PTC: Schulungsunterlagen zu ProEngineer. 2011
- [PTC13] PTC-Product & Service Advantage. PTC Creo [Software]. 15. Mai 2011 [Zugriff am: 07. Februar 2014]. Verfügbar unter: <http://de.ptc.com/product/creo>
- [PTC14] PTC Mathcad. PTC, 2014 [Zugriff am: 23. März 2014]. Verfügbar unter: <http://de.ptc.com/product/mathcad>
- [PUC11] Puchwein, Christian: Lärmemissionsmessung an Fördertechnikkomponenten. Bachelorarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2011
- [RAC62] Rachner, Hans-Günther: Stahlgelenkketten und Kettentriebe. Berlin: Springer, 1962
- [REC08] Recurdyn. Recurdyn-Solutions4Engineers [Software]. 09. September 2008 [Zugriff am: 26. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.functionbay.org/>
- [REI10] Reichenberger, Klaus: Kompendium semantische Netze - Konzepte, Technologie, Modellierung. Berlin: Springer, 2010

- [RKL+04] Reisinger, Karl-Heinz; Kartnig, Georg; Landschützer, Christian; Oser, Jörg: Investigation of electromechanical drive properties in material handling applications. In: 8th International Material Handling Research Colloquium. Graz: IMHRC, 2004
- [ROC12] La Rocca, Gianfranco: Knowledge based engineering techniques to support aircraft design and optimization. Dissertation, TU Delft: Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, 2012
- [ROD06] Roddeck, Werner: Einführung in die Mechatronik. 3. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2006
- [ROD13] Roddeck, Werner: Grundprinzipien der Mechatronik - Modellbildung und Simulation mit Bondgraphen. Berlin: Springer, 2013
- [ROT00] Roth, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage, Berlin: Springer, 2000
- [RR03] Raub, Stefan; Romhardt, Kai: Wissen managen: wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 4. Auflage, Wiesbaden: Gabler, 2003
- [RS12] Rieg, Frank; Steinhilper, Rolf: Handbuch Konstruktion. München: Carl Hanser, 2012
- [RSS08] Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Sigrid, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin: Springer, 2008
- [SAN08] Sander, Manuela: Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen - Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage. Berlin: Springer, 2008
- [SAS06] Seltenhammer, Christian; Atzwanger, Martin; Sorger, Helfried: Die Bedeutung der Integration von angewandtem Wissensmanagement in die AVL Konstruktionsmethode zur optimalen Antriebsstrangentwicklung. Graz: Symposium Methodisches Konstruieren, 2006
- [SBH10] Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung. , Berlin: Springer, 2010
- [SC11] Schier, Klaus: Finite Elemente Modelle der Statik und Festigkeitslehre. Berlin: Springer, 2011
- [SCH00] Vom Markt zum Produkt. Scharer, Michael, 2000 [Zugriff am: 09. Oktober 2000]. Verfügbar unter: 67. [SCH00] Scharer, Michael. 2000. Vom Markt zum Produkt. [Online] 09. 10 2000. [Zitat vom: 11. 10 2013.] http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/nkano_b.html.
- [SCH05] Schumacher, Axel: Optimierung mechanischer Strukturen - Grundlagen und industrielle Anwendungen. Berlin: Springer, 2005

- [SCH06] Schuh, Günther: Produktionsplanung und Steuerung. Berlin: Springer, 2006
- [SCH11] Schulze, Sven: Logistikgerechte Produktentwicklung. Band 17, Aachen: Shaker, 2011
- [SC11] Schier, Klaus: Finite Elemente Modelle der Statik und Festigkeitslehre. Berlin: Springer, 2011
- [SCH13] Scheuchenstuhl, Mathias: Einsatz- und Optimierungsmöglichkeiten eines Roboterkommissioniersystems. Diplomarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2013
- [SCH14] Complexity Manager - Software zur Darstellung und Optimierung der Variantenvielfalt. Schuh&Co. Komplexitätsmanagement, 2014 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.complexitymanager.de/>
- [SCH16] Schilcher, Matthias: Knowledge-based Engineering zur Grobplanung und Analyse von Sortiersystemen. Diplomarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2016
- [SCH87] Scheffler, Kurth: Grundlagen der Fördertechnik. Berlin: VEB Technik Verlag, 1987
- [SCH90] Schiehlen, Werner: Multibody Systems Handbook. Berlin: Springer, 1990
- [SCH94] Scheffler, M.: Grundlagen der Fördertechnik– Elemente und Triebwerke. Wiesbaden: Vieweg 1994.
- [SCH99] Schäfer, M.: Numerik im Maschinenbau. Berlin: Springer, 1999
- [SDK65] Scheffler, M; Dresig, H; Kurth, F: Unstetigförderer 2. Berlin: VEB Verlag Technik, 1965
- [SEX02] Sextro, W.: Dynamical contact problems with friction. Berlin: Springer, 2002
- [SEB15] Sebulke, J. (in Böge: Handbuch Maschinenbau): Fördertechnik – Kap. K. 22. Auflage, Heidelberg: Springer, 2015
- [SIE05] Siemens. NX [Software]. 25. März 2005 [Zugriff am: 05. Februar 2014]. Verfügbar unter: http://www.plm.automation.siemens.com/de_at/products/nx/
- [SIM09] Simpack. Simpack - Multi-Body Simulation Software [Software]. 08. August 2009 [Zugriff am: 25. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.simpack.com/>
- [SIM14] Data extraction and processing solutions. SiMX-Advanced Software Solutions, 2014 [Zugriff am: 21. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://www.simx.com/simx/simx.stt?>
- [SIM16] SimDesigner – CAD-integrierte Simulation. MSC.Software, 2016 [Zugriff am: 21. Jänner 2016]. Verfügbar unter: <http://www.mscsoftware.com/de/product/simdesigner>

- [SLI12] KBE Design Methodology. Slidefinder, 2012 [Zugriff am: 03. Juli 2012]. Verfügbar unter:
http://www.slidefinder.net/k/kbe_design_methodology/342des-2bkbedesignmethodology/9309657
- [SOC14] MindMaps. Social Science Software, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter:
<http://www.sosciso.de/de/software/brainstorming/mindmaps/>
- [SP08] Straube, F; Pfohl, H-C: Trends und Strategien in der Logistik - Globale Netzwerke im Wandel. , Bremen: DVV Media Group GmbH, 2008
- [SSS14] Spee, Detlef; Schmidt, Michael; Schieweck, Steffen: Development of a heuristics for a criteria based planning of pallet storage systems. Charlotte: MHL, 2014
- [ST14] A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Stanford Center for Biomedical Informatics Research, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://protege.stanford.edu/>
- [STA14] Umsatz der deutschen Fördertechnik- und Intralogistikbranche im Jahr 2014 - ohne Flurförderzeuge. Statista, [Zugriff am: 28. April 2014]. Verfügbar unter: <http://de.statista.com>
- [STE04a] Steinbuch, Rolf: Simulation im konstruktiven Maschinenbau - Anwendung von FEM- und verwandten Systemen in der Konstruktion. München: Hanser, 2004
- [STE04b] Steinke, Peter: Finite-Elemente-Methode. 1. Auflage, Berlin: Springer, 2004
- [STE12] Steinkellner, Stefan: Knowledge-based Engineering in der Technischen Logistik. Diplomarbeit, Graz: Institut für Technische Logistik, 2012
- [SUR14] Umfrageplattform. SurveyMonkey, 2014 [Zugriff am: 20. Jänner 2014]. Verfügbar unter:
https://de.surveymonkey.com/mp/take-a-tour/?ut_source=header
- [SYS12] Application of axiomatic design. Systemdesign, 2012 [Zugriff am: 14. Februar 2012]. Verfügbar unter:
<http://www.sysdesign.org/msdd/axiomaticdesign>
- [TEC12] Knowledge - Based Engineering (KBE). Technosoft, 2012 [Zugriff am: 20. April 2014]. Verfügbar unter:
<http://www.technosoft.com/kbe.php>
- [TES14a] LOOME0 Highlights. Teseon - Complexity Engineers, 2014 [Zugriff am: 16. April 2014]. Verfügbar unter:
<http://www.teseon.com/loomeo-wissenstransfer>
- [TES14b] LOOME0. Teseon - Complexity Engineers, 2014 [Zugriff am: 16. April 2014]. Verfügbar unter:
<http://www.teseon.com/suche?searchword=loomeo-wissenstransfer>

- [THE15] Transportgüter - Bildersammlung. Theiss, Alexander R., [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://frachtenagentur-international.eu>
- [TÖP07] Töpfer, Armin: Betriebswirtschaftslehre. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2007
- [TRE01] Trepp, Antje: Konzeption eines integrativen Vorgehensmodells zur Unterstützung der Konstruktionsmethodik. Osnabrück: Der Andere Verlag, 2001
- [TUD12] Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen. Technische Universität Dortmund, 2012 [Zugriff am: 15. November 2012]. Verfügbar unter: <http://www.sfb-696.de/index5417.html?id=252%20%E2%80%93%20dort%20%E2%80%9EReports%E2%80%9C>
- [TUF13] Visual Understanding Environment. Tufts University, 2013 [Zugriff am: 28. Jänner 2014]. Verfügbar unter: <http://vue.tufts.edu/>
- [UNI07] Persönliches Informationsmanagement mit Social Software - Potenziale und Anwendungsgebiete. Universität Hannover, 2007 [Zugriff am: 15. April 2014]. Verfügbar unter: http://archiv.iwi.uni-hannover.de/cms/files/lv/sosem07/seminar/Wilke/HTML-Datei_Persoeliches%20Informationsmanagement%20mit%20Web%202.0%20Diens/kap_4.html
- [UNI12] Universität Stuttgart. Projekt PinLog - Planungsplattform für intralogistische Systeme [online]. , 2012 [Zugriff am: 01. November 2012]. PDF Format. Verfügbar unter: <http://www.uni-stuttgart.de/ift/forschung/pdfs/ProjektPInLog.pdf>
- [UNI99] Wissensstrukturierung. Universität St. Gallen - Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), 1999 [Zugriff am: 15. April 2014]. Verfügbar unter: [http://intranet.iwi.unisg.ch/org/iwi/iwi_pub.nsf/wwwPublAuthorGer/73EACA5E5C6E4DB1C1256BD60029A667/\\$file/AB05_Wisssenstrukturierung_10.pdf](http://intranet.iwi.unisg.ch/org/iwi/iwi_pub.nsf/wwwPublAuthorGer/73EACA5E5C6E4DB1C1256BD60029A667/$file/AB05_Wisssenstrukturierung_10.pdf)
- [VBD+12] Verhagen, Wim J.C.; Bermell-Garcia, Pablo; van Dijk, Reinier E.C.; Curran, Richard: A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. In: Advanced Engineering Informatics. Amsterdam: Elsevier, 2012, 26(1), S. 5-15
- [VDA 4961] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4961 - Kooperationsmodelle und SE-Checkliste zur Abstimmung der Datenlogistik in SE-Projekten. Frankfurt: VDA, 2011
- [VDA 4967] VDA (Hrsg.): VDA 4967 - Simulation Data Management - Integration of Simulation and Computation in a PDM - Environment (SimPDM). Frankfurt: VDA, 2007

- [VDI 2206] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2004
- [VDI 2209] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2209 - 3-D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009
- [VDI 2210] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2210 - Datenverarbeitung in der Konstruktion; Analyse des Konstruktionsprozesses im Hinblick auf den EDV-Einsatz. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1975 (zurückgezogen)
- [VDI 2211] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2211 - Blatt 2 Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Berechnungen in der Konstruktion. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [VDI 2218] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2218 - Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [VDI 2219] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2219 - Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2002
- [VDI 2220] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2220 - Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1980
- [VDI 2221] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1993
- [VDI 2222] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2222 - Blatt 1 Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien und Blatt 2 Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1997
- [VDI 2223] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2223 - Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2004
- [VDI 2225] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2225 - Blatt 3 Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1998
- [VDI 2249] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2249 - Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - CAD-Benutzungsfunktionen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [VDI 2322] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2322 - Auslegung und Errichtung von Gurtförderern für Schüttgut. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- [VDI 2328] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2328 - Übersichtsblätter Stetigförderer; Kreisförderer (hängende Lasten). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1981 (zurückgezogen)

VERZEICHNISSE

- [VDI 2340] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie VDI 2340 - Systematik der Übergabeeinrichtungen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1997
- [VDI 2341] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2341 - Gurtförderer für Schüttgut - Tragrollen und Tragrollenabstände. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 2346] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie I 23 - Übersichtsblätter Stetigförderer; Sperren. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1978
- [VDI 2385] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2385 - Leitfaden für die materialflußgerechte Planung von Industrieanlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1989
- [VDI 2411] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2411 - Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1970 (zurückgezogen)
- [VDI 2498] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2498 - Blatt 1 Vorgehen bei einer Materialflussplanung - Grundlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2011
- [VDI 2510] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2510 - Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2005
- [VDI 2513] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2513 - FTS-Checkliste - Eine Planungshilfe für Betreiber und Hersteller von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2006 (zurückgezogen)
- [VDI 2710] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2710 - Blatt 2 FTS-Checkliste - Planungshilfe für Betreiber und Hersteller von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2008
- [VDI 2803] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2803 - Blatt 1 Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1996
- [VDI 2860] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2860 - Montage- und Handhabungstechnik. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1990
- [VDI 3312] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3312 - Sortieren im logistischen Prozess. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003
- [VDI 3561-2] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3561a - Blatt 2 Spielzeitermittlung von regalgangunabhängigen Regalbediengeräten. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009
- [VDI 3561-4] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3561b - Blatt 4 Spielzeitermittlung von automatischen Kanallager-Systemen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009
- [VDI 3602-1] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3602 - Blatt 1 Gurtförderer für Schüttgut - Antriebe, Bauarten. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001
- [VDI 3602-2] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3602 - Blatt 2 Gurtförderer für Schüttgut - Antriebe, Betriebsweise. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2001

- [VDI 3603] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3603 - Gurtförderer für Schüttgut - Spann-, Ablenk- und Umkehrstationen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2002
- [VDI 3605] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3605 - Gurtförderer für Schüttgut - Reinigungseinrichtungen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2012
- [VDI 3606] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3606 - Gurtförderer für Schüttgut - Förderstrecke. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1999
- [VDI 3608] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3608 - Gurtförderer für Schüttgut - Fördergurt. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- [VDI 3618] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3618 - Übergabeeinrichtungen für Stückgüter, Blatt 1 und 2.. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1994
- [VDI 3619] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3619 - Sortiersysteme für Stückgut. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1983
- [VDI 3619g] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3619 - Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, Gründruck 2015
- [VDI 3633] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633 - Blatt 1 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- [VDI 3648] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 364 - Behälterförderanlagen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1988 (zurückgezogen)
- [VDI 3978] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3978 - Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1998
- [VDI 4440-1] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 1 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Bandförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4440-2] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 2 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Kettenförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4440-3] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 3 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Rollen- und Kugelbahnen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4440-4] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 4 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Plattformträger. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4440-5] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 5 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Hängeförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4440-6] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4440 Blatt 6 - Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Vertikalförderer. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007
- [VDI 4451] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4451 - Blatt 3 Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) - Fahr- und Lenkantrieb. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1998

VERZEICHNISSE

- [VDI 5610-1] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5610 - Blatt 1 Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009
- [VDI 5610-2] VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5610 - Blatt 2 - ENTWURF Wissensmanagement im Engineering - Wissensbasierte Konstruktion (KBE). Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2015
- [VDI12] VDI - Gesellschaft. Technische Logistik [online]. , 2012 [Zugriff am: 12. November 2012]. PDF Format. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_da teien/2014_Kurzdarstellung_GPL_FB3_Technische_Logistik.pdf
- [VDM12a] Forum Intralogistik. VDMA Fördertechnik und Intralogistik, 2012 [Zugriff am: 08. September 2014]. Verfügbar unter: <http://www.forum-intralogistik.org/de/ueberuns/definitionintralogistik/>
- [VDM12b] Statistikdatenbank. VDMA, 2012 [Zugriff am: 08. November 2012]. Verfügbar unter: http://www5.vdma.org/wps/portal/!ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MS SzPy8xBz9CP0os3gLdx8LQwsLIyAKcjUwCnMzdXQzdTU2cDUDy kfilrcwJ0a3s7ujh4m5j4GBhYubhYGRk6mZZ6CBi4GBpykB3eEq1-K3HSSPz3yQvAEO4Gig7-
- [VET14] lexiCan - Die Wiki-Lösung für Windows. vetafab Software GmbH, 2014 [Zugriff am: 22. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <https://lexican.de/>
- [VOL12] Exhibition Generationen Golf. Volkswagen Aktiengesellschaft, 2012 [Zugriff am: 04. Dezember 2012]. Verfügbar unter: http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2012/12/Exhibition_Generationen_Golf.html
- [VOL97] Volle, Andreas: Integration eines Rad-Schiene-Kontaktmoduls in die Simulations-Umgebung NEWSIM. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1997
- [VWB+09] Vajna, Sandor; Weber, Christian; Bley, Helmut; Zeman, Klaus: CAX für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung. 2. Auflage, Berlin: Springer, 2009
- [WEH14] Wehking, Karl-Heinz: Rechnergestützte Grobplanung von Distributionszentren. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2014
- [WIE11] Wieczorek, Dorothee: Empirische Entwicklung von Prognosemodellen für die Auslegung von Rollenfördermodulen. Dissertation, Universität Dortmund: Fakultät für Maschinenbau, 2011
- [WIE14] Wierse, Andreas: Simulationstechnologie - Chancen und Wege für KMU. In: Konstruktion. Nr. 7/8, Düsseldorf: Springer, 2014
- [WIK11a] Humankapital. Wikipedia, 2011 [Zugriff am: 16. April 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Humankapital>

- [WIK11b] Wissensmanagement. Wikipedia, 2011 [Zugriff am: 16. April 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wissensmanagement>
- [WIK12] Taxonomie. Wikipedia, 2012 [Zugriff am: 05. März 2012]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Taxonomie>
- [WIK14a] Wikimedia. Mindmap [online]. Wikimedia, 2014 [Zugriff am: 15. April 2014]. JPG Format. Verfügbar unter: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/Pinwand-Mindmap.jpg>
- [WIK14b] lexiCan. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 15. April 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/LexiCan>
- [WIK14c] Semantisches Netz. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Semantisches_Netz
- [WIK14d] Ontologie. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ontologie>
- [WIK14e] Taxonomie. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Taxonomie>
- [WIK14f] Wiki. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wiki>
- [WIK14g] Contentmanagement. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Content-Management>
- [WIK14h] Engineering (engl.). Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/engineering>
- [WIK14i] Ingenieurwissenschaften. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ingenieurwissenschaften>
- [WIK14j] Industrial Engineering. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 21. Oktober 2014]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Industrial_Engineering
- [WIK15a] Methodik. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 1. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Methodik>
- [WIK15b] Wissenschaft. Wikipedia, 2014 [Zugriff am: 2. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaft>
- [WIL98] Will, Frank: Auslegung und Gestaltung von Antriebssystemen für Stückgut-Sortieranlagen. Düsseldorf: VDI, 1998
- [WIR14] Funktionsanalyse. Wirtschaftslexikon Springer Gabler, 2014 [Zugriff am: 23. März 2014]. Verfügbar unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/255148/funktionenanalyse-v5.html>

VERZEICHNISSE

- [WS89] Waller, Heinz; Schmidt, Reinhard: Schwingungslehre für Ingenieure - Theorie, Simulation, Anwendungen. Berlin: Springer, 1989
- [ZPU15] Z_punkt GmbH. Megatrends update [online]. [Zugriff am: 16. Oktober 2015]. PDF Format. Verfügbar unter: http://www.z-punkt.de/uploads/files/234/z_punkt_megatrends_de.pdf
- [ZÜL10] Zülch, Gert; Stock, Patricia (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2008

8.2 Abbildungen und Tabellen

Bild 1.1: Von der Welt zum Netzwerk: global-Seeverkehr und national-Landverkehr, Collage nach: [NAS15], [MOD13], [BAL15]	13
Bild 1.2: Kostenverteilung eines Seecontainertransports Le Havre – New York [BAL15]	14
Bild 1.3: Beeinflussung der Logistik durch Megatrends im internationalen Vergleich [SP08]	18
Bild 1.4: Entwicklung der Intralogistik nach [KGZ12] – Zusammenschau mit den vier großen industriellen Revolutionen nach [IND13]	19
Bild 1.5: Innovationsfelder für die Logistik [GÜN15]	21
Bild 1.6: Zukünftige (informations)technische/technologische – Herausforderungen für die Intralogistik [KGZ12]	21
Bild 1.7: Umsatz der deutschen Fördertechnik- und Intralogistikbranche im Jahr 2014 [STA14]	22
Bild 1.8: Allgemeine Haupt- und Nebenziele der Arbeit und der Logistik im Allgemeinen	24
Bild 1.9: Ziele und Zielerreichung zum Engineering in der Technischen Logistik	25
Bild 1.10: Motivation der Arbeit	26
Bild 1.11: Aufbau und Gliederung der Arbeit	28
Bild 2.1: Rollenverteilung im Requirements-Engineering (oben) und Stakeholdergruppen [PAR10]	31
Bild 2.2: Fünf Bereiche der Produktentwicklung in denen Methoden zur Bearbeitung eines Produktes entstanden sind [EM13]	34
Bild 2.3: Geometrisch-stoffliche Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten auf System-/Anlagenebene und auf Geräteebe-	36
Bild 2.4: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von der System-/Anlagenebene zur Geräteebe-	37
Bild 2.5: Relationen des Engineerings zu weiteren Disziplinen für integrierte Produkte	40
Bild 2.6: Exemplarischer Überblick über die Diversität logistischer Güter (Schüttgut, formstabiles Stückgut und folierte Ware als flexibles Stückgut) [THE15], [MAT15], [GOL15]	41
Bild 2.7: Darstellung eines Systems [EM13]	43
Bild 2.8: Wandel der Logistik und ihres Verständnisses [BAU14]	47
Bild 2.9: Einstufung der Materialflusstechnik	50
Bild 2.10: Dimensionen der Technischen Logistik	51
Bild 2.11: Systematik eines Fördersystems [JOD12]	52

VERZEICHNISSE

Bild 2.12: Systemtheoretische Abstraktion Materialflusssystem und Zuordnung Materialflusssystem zur Systemtheorie.....	54
Bild 2.13: Funktionen von Materialflusstechnik (adaptiert nach [HS08])	55
Bild 2.14: Beispiel des Materialfluss' in einem Distributionszentrum [SCH13] nach [FE08].....	55
Bild 2.15: Systematik der Materialflusstechnik.....	57
Bild 2.16: Systematik der Fördermittel für die Stückguttechnik [HNS07] nach Tätigkeitsart stetig/unstetig	58
Bild 2.17: Größendimensionen von Materialflusstechnik (Komplexität) als 4-Ebenen-Modell mit Objekten der Materialflusstechnik nach Bild 2.18	58
Bild 2.18: Systematik materialflusstechnischer Gewerke für das 4-Ebenen-Modell (Förderer der Schüttguttechnik kursiv und rechtsbündig), Objekte nach [HNS07]	59
Bild 2.19: technikorientierte Systematik für Rollenförderer (keine Motorrollenantriebe, keine Staufunktion)	60
Bild 2.20: Simulationen des CAx (nach [RS12])	66
Bild 2.21: Beispiele für Workflows CAD-CAE (nach [HDG+13])	66
Bild 2.22: Die Stellung der Simulation innerhalb der Produktentwicklung [RS12].....	70
Bild 2.23: Geschwindigkeit eines KLTs auf einem Rollenförderer zum Abgleich mit einem MKS-Simulationsmodell (vgl. Kap. 4.2.3)	71
Bild 2.24: Produktkostenfestlegung und –entstehung im Kontext des Design-Wissenszuwachses nach [CP99] mit [ES05], [EKL+14]	72
Bild 2.25: Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie nach [SCH11].....	73
Bild 2.26: Ziele des methodischen Vorgehens beim Konstruieren nach [EM13]	76
Bild 2.27: Zuordnung der vier Größen technisch-logistischer Gewerke zu Konstruktionsarten	80
Bild 2.28: Definitionen zu Daten, Information und Wissen	84
Bild 2.29: KBx-Definition (erweiterter Ansatz aus [P4])	97
Bild 2.30: Einschließende Themenkreise wissen – konstruieren – berechnen.....	100
Bild 2.31: Teilprozess P-A (Methodendefinition) von der Prämisse zum Ansatz	101
Bild 2.32: TagCloud der formulierten, reduzierten Prämissen.....	103
Bild 2.33: Zuordnung der Prämissen (aus der TagCloud) zu den Themenkreisen – Schnittmengendiagramm	104
Bild 2.34: Themenkreise und Tätigkeiten für das Engineering.....	104
Bild 2.35: Phasen, Arbeitsschritte und Ergebnisse im Entwicklungsprozess (konstruieren) nach VDI 2221 [VDI 2221]	104
Bild 2.36: Abweichungen der Prämissen Technische Logistik/Trendsetter, Forschungslücke und daraus. Themenkreise und Ansätze (Zusammenfassung Prozess P-A 1..5), vgl. [P3], Anschluss mit Bild 3.4.....	106

Bild 3.1: Überblick und Einteilung von Methoden nach [EM13]	109
Bild 3.2: Fünf Thesen für den Einsatz und die Wirkung von Methoden [EM13].....	112
Bild 3.3: Teilprozess AW-M (Methodendefinition) vom Ansatz mit den Prämissen zu den Methoden	114
Bild 3.4: Themenkreise und Ansätze führen mit deren Wirkung zu den Methoden (Zusammenfassung Prozess: AW-M 1 bis AW-M 7); Anschluss an Bild 2.36.	118
Bild 3.5: Die Arten der entwickelten Methoden.....	119
Bild 3.6: Ein- und Zuordnung der finalen Methodendefinitionen zum Fortschreiten im PEP (und PLZ) und Tätigkeiten (vgl. Bild 2.35)	120
Bild 3.7: Das Methodenfactsheet - Grundstruktur	122
Bild 3.8: Grundaufbau des technisch-logistischen Methodeneinordnungsmodells	126
Bild 3.9: Mögliches Fortschreiten im PEP durch das Methodeneinordnungsmodell im Falle einer Neukonstruktion	126
Bild 3.10: Screenshot der webbasierten Visualisierung des technisch-logistischen Methodeneinordnungsmodells [MET15]	127
Bild 3.11: Arten von Anforderungen an Konstruktionsaufgaben der Logistik MeK1...	131
Bild 3.12: Abstimmungszeitpunkte zwischen Planungs- und Konstruktions/Entwicklungsprozess.....	134
Bild 3.13: Prüfprozess zum Einsatz von Konstruktionsmethodiken und -methoden nach Konstruktionsart und Stadium des Produktentwicklungsprozesses.....	139
Bild 3.14: VDI-Entwicklungsprozess (interaktiv) und Methodenvorschlag der VDI-app [GAR14] mit digitalen Vorlagen (z.B. FMEA)	141
Bild 3.15: VDI-Konstruktionsphasen für MeK2	141
Bild 3.16: SyLö-app zur Generierung prinzipieller Lösungen einer Förderstrecke mit ERM	149
Bild 3.17: Morphologischer Kasten (Phase 3: Abförderung) der Vereinzelung eines 3D-Paketstromes	150
Bild 3.18: VDI-Konstruktionsphasen für MeK3	150
Bild 3.19: Prüfprozess des Methodikeinsatzes im und für CAD.....	155
Bild 3.20: Zuordnung der CAD-Verwendung zu Prozessphasen des Entwickelns (nicht Neukonstruktion in grau) [VDI 2221] und Planens [HNS07].....	158
Bild 3.21: Top-down einer Verbrennungskraftmaschinenbaugruppe	161
Bild 3.22: Eignung des KBx für die Gewerke der Technischen Logistik [P3]	163
↓ Bild 3.23: Prüfprozess KBx in der Technischen Logistik ↓↑	163
Bild 3.24: VDI-Konstruktionsphasen für KBx	166
Bild 3.25: HRL-Tool Webinterface der serverbasierten Variante	169
Bild 3.26: Portfolio von ANSYS [ANS14]	170

VERZEICHNISSE

Bild 3.27: CAx in der Technischen Logistik – Prozess und Prüftabelle	172
Bild 3.28: VDI-Konstruktionsphasen CAE	175
Bild 3.29: Vorgehen zur Erstellung von C-Methoden (Faustformeln u. analytische Berechnungen) für die Technische Logistik (vgl. [P7])	179
Bild 3.30: VDI-Konstruktionsphasen des CAE und MeB2	180
Bild 3.31: Berechnung von Resonanzkettenlänge und Resonanzkraftmaximum an Rundstahl-Kettenzügen durch MeB2 und Bereitstellung der Berechnung in einem GUI-gesteuerten Berechnungsprogramm	182
Bild 3.32: Vorgehen zur Erstellung von template-driven Simulationslösungen	185
Bild 3.33: VDI-Konstruktionsphasen und MeB3	186
Bild 3.34: Guided-simulation eines Lastumlagerungsvorganges an Hochspannungsfreileitungen (GUI) [FL12]	188
Bild 3.35: Zuordnung von Methoden des Wissensmanagements zu den Phasen der Konstruktion	191
Bild 3.36: VDI-Konstruktionsphasen für MeW1	193
Bild 3.37: Prozess für MeW2 (mit der xKBE-app)	199
Bild 3.38: Vorgehen für MeW2 (xKBE-app)	199
Bild 3.39: VDI-Konstruktionsphasen für Unterstützung des KBx durch MeW2	201
Bild 3.40: Ontologieansicht der Einordnung des Maschinenelements „Passfeder“ mit der xKBE-app-Desktopversion [LJ12] und Client-Server-Architektur der aktuellen xKBE-app Ausbaustufe	203
Bild 4.1: Methodeneinsatz an drei ausgewählten Objekten der Technischen Logistik	204
Bild 4.2: Grundlagen des PI und Bereich der MODULUSHCA-Box [MON12]	205
Bild 4.3: Phasen der Entwicklung und Ergebnisse für die Entwicklung der MODULUSHCA-Box	207
Bild 4.4: MODULUSHCA Storybook [EL14]	207
Bild 4.5: Auszug online-survey zur Anforderungsermittlung in weltweit verteilten Teams an die MODULUSHCA-Box mit Basis Storybook [EL14]	208
Bild 4.6: Auswertung ausgewählter Fragen des online-survey zur Anforderungsermittlung [EL14]	208
Bild 4.7: Anforderungsliste an die MODULUSHCA-Box als Ergebnis des surveys mit Basis storybook	209
Bild 4.8: Taxonomie verfügbarer Ladehilfsmittel für FMCGs – Größenbereich „medium“ [EL14]	210
Bild 4.9: Materialflusstechnische Funktionen der MODULUSHCA-Box	210
Bild 4.10: Lösungsprinzipien für das Verbinden der MODULUSHCA-Boxen	211
Bild 4.11: Auswahlliste der Lösungsprinzipien für das Verbinden der MODULUSHCA-Boxen	212

Bild 4.12: Morphologie zur Berücksichtigung der Einbauposition der Prinziplösungen in die MODULUSHCA-Boxen.....	213
Bild 4.13: Bewertung der Prinziplösungen der Funktion „verbinden“ der MODULUSHCA-Boxen (Auszug einiger Varianten)	213
Bild 4.14: FMEA der Funktion „Verbinden“ der MODULUSHCA-Box.....	214
Bild 4.15: Konstruktive Realisierung „Verbinden“ der MODULUSHCA-Box [EL14].....	214
Bild 4.16: 3D-Druck Prototypen der MODULUSHCA-Box erster (links) und zweiter Generation	215
Bild 4.17: Vergleich und Bewertung der Anforderungserfüllung der MODULUSHCA-Box und kommerziell verfügbarer Boxen [EL14]	216
Bild 4.18: Morphologie des Gesamtsystems aller Funktionen der MODULUSHCA-Box	217
Bild 4.19: Hauptnormalspannungen und Gesamtverschiebungen an der MODULUSHCA-Box mittels FEM zufolge einer Deckelbelastung von 5 gestapelten vollen Boxen (max. 25 kg) [P10]	217
Bild 4.20: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Entwicklung der MODULUSHCA-Box, Einordnung Schlüsselpublikation [P10]	218
Bild 4.21: Einteilung der Rollenförderer	220
Bild 4.22: Transportfunktionen der Rollenförderer.....	220
Bild 4.23: Funktionsgruppen der Rollenförderer.....	221
Bild 4.24: Baugruppen eines Rollenförderers bzgl. ihrer Wiederverwendbarkeit [WIE11].....	222
Bild 4.25: Prinzipfunktion und Funktionsstruktur eines Rollenförderers [WIE11]	222
Bild 4.26: Detail-Spezifizierung/Parametrierung der Funktion „Transportieren“ mit der SyLö-app zu einem Rollenförderer (prinzipielle Technologieauswahl s. Bild 3.16)	224
Bild 4.27: KBE eines Rollenförderers	225
Bild 4.28: Projektion von Anforderungen an einen Rollenförderer auf dessen Eigenschaften – Zuordnungstabelle in Form einer DMM.....	228
Bild 4.29: Wissen um einen Rollenförderer in einem Wiki-System (lexi.Can® [WIK14b])	228
Bild 4.30: Ontologie eines Rollenförderer in „Protégé“	228
Bild 4.31: Ontologie einer Förderstrecke mit Rollenförderermodulen in xKBE-app mit Bezug zur Systematik von Fördertypen, VDI-Richtlinien und entwicklungstheoretischem Kontext.....	229
Bild 4.32: Parameter-DSM eines Rollenförderer mit dem „CAM“ [P3]	230
Bild 4.33: Euler-Diagramm von Parametern eines Rollenförderers mit dem SetVisualiser	230
Bild 4.34: MKS Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke; Varianten erzeugt mit Skript-Technik in MSC.ADAMS.....	231

Bild 4.35: flexMKS Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke mit Fahrt gegen Anschlag; Vergleichsspannung im Ladehilfsmittel 232

Bild 4.36: Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke, Abgleich Simulation - Messung233

Bild 4.37: Ladehilfsmittel auf Rollenfördererstrecke, Einfluss der CAD-Importgeometrie auf das Bewegungsverhalten..... 233

Bild 4.38: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Analyse und Entwicklung eines Rollenförderers, Einordnung Schlüsselpublikationen [P3], [P4], [P7] 235

Bild 4.39: MindMaps des Grundaufbaus von Kippschalen- Schuh- und Quergurtsorten 237

Bild 4.40: Auszug aus automatisiertem morphologischen Kasten (nach MeK3) und nachgeschaltete Nutzwertanalyse für die Lösungsprinzipwahl eines Sorters 238

Bild 4.41: Paarweiser Vergleich und Summe der Bewertungsergebnisse eines Aspekts (Funktionalität: Auszug) von Varianten des Fördermittels eines Sorters 239

Bild 4.42: Zuordnungstabelle in Form einer DMM der Antriebe zu Mechanismen 240

Bild 4.43: KBSD-KBL Interaktion am Beispiel Sortiersystem [P11] 241

Bild 4.44: KBL-Beispiel: Layoutvariante und Objekte des KBL..... 242

Bild 4.45: KBL-Layoutlinienzug und generierte 3D-Geoemtrie [SCH16]..... 242

Bild 4.46: KBSD-Sortierwagen zur Antriebsberechnung u. CAE-Grobgeometrieexport [SCH16] 242

Bild 4.47: KBL-/KBSD-Prozess für eine Sortieranlage [SCH16] 243

Bild 4.48: Prozess einer KBL/KBSD-Sortieranlagengestaltung 244

Bild 4.49: Mögliche Schwerpunkts-Einzel-Gutpositionen im Ladehilfsmittel Kleinladungsträger – 9 Sektoren für MKS-Simulation..... 245

Bild 4.50: Kippschalensortierfahrwerke – Auszug Produktprogramm [BEU15] oben und Führungsverhalten unterschiedlicher Fahrwagen (a U-Profil, b Rundprofil) [JH12] unten 246

Bild 4.51: Sortierfahrwagen in U-Profil-Führung – MKS-Modell in MSC.ADAMS..... 247

Bild 4.52: Sortierfahrwagen spurkranzgeführt, leer und mit Ladung – MKS-Modell in MSC.ADAMS 248

Bild 4.53: Radkontaktkräfte zu den Schienen bei Kurvenfahrt und beim Bremsen 249

Bild 4.54: Hochgeschwindigkeitseinschleusung in MKS (MSC.ADAMS) und Bewegungsergebnisse 250

Bild 4.55: Analytische Modellbildung der Winkeleinschleusung [P11] 251

Bild 4.56: GUI der template-driven simulation mit MeB3 der Winkeleinschleusung [P11] 252

Bild 4.57: MKS-Modellbildung der Winkeleinschleusung in MSC.ADAMS [P11]..... 253

Bild 4.58: Reibkräfte und Geschwindigkeitskomponenten des einzuschleusenden Pakets mit analytischem Ansatz (2D) und MKS-Modellbildung (3D) [P11] – 0,05 s zeitversetzt.	253
Bild 4.59: MKS-Modell des Abwurfs von einem Kippschalensorter in eine Endstelle in MSC.ADAMS [P11].....	257
Bild 4.60: Absolutgeschwindigkeiten des in die Endstelle ausgeschleusten Pakets bei unterschiedlichen Reibungsverhältnissen [P11]	258
Bild 4.61: Methodeneinsatz und Position derer im PEP bei der Analyse und Entwicklung von Sortiersystemen, Einordnung Schlüsselpublikationen [P3], [P4], [P11]	259
Bild 5.1: Vernetzung und Abhängigkeit der vorgestellten Methoden – Querbeziehungen.....	264
Bild 5.2: Methoden im PEP.....	265
Bild 5.3: QR-Code der Webadresse des interaktiven Methodeneinordnungsmodells [MET15].....	266
Bild 5.4: MeK1 im Einordnungsmodell	267
Bild 5.5: MeK2 im Einordnungsmodell	268
Bild 5.6: MeK3 im Einordnungsmodell	269
Bild 5.7: MeK4 im Einordnungsmodell	270
Bild 5.8: MeK5 im Einordnungsmodell	271
Bild 5.9: MeB1 im Einordnungsmodell	272
Bild 5.10: MeB2 und MeB3 im Einordnungsmodell.....	273
Bild 5.11: MeW1 im Einordnungsmodell.....	274
Bild 5.12: MeW2 im Einordnungsmodell.....	275
Bild 5.13: Schlüsselpublikationen und –projekte	277
Bild 5.14: Methodeneinsatz bei den Schlüsselpublikationen und –projekten (Publikationsmedium in Großbuchstaben nachgestellt)	278
Bild 5.15: Methodeneinsatz bei den Schlüsselpublikationen und –projekten – Zuordnung der Hauptergebnisse zum PEP	279
Bild 5.16: Schnittmengendiagramm des Methodeneinsatzes bei den Schlüsselpublikationen und –projekten (nur Gewichtung 3/4-voll und voll aus Bild 5.14 berücksichtigt).....	280
Bild 6.1: Darstellung eines Systems [EM13]	284
Bild 6.2: Wandel der Logistik und ihres Verständnisses [BAU14].....	288
Bild 6.3: Einstufung der Materialflusstechnik.....	291
Bild 6.4: Dimensionen der Technischen Logistik	292
Bild 6.5: Systematik eines Fördersystems [JOD12].....	293
Bild 6.6: Systemtheoretische Abstraktion System eines Materialflusssystem.....	295

Bild 6.7: Mögliche Entsprechung Systematik Materialfluss und Systemtheorie 295

Bild 6.8: Beispiel eines Materialfluss in einem Distributionszentrum [SCH13] nach [FE08] 297

Bild 6.9: Systematik der Fördermittel für die Stückguttechnik [HNS07] 298

Bild 6.10: Systematik der Materialflusstechnik 299

Bild 6.11: Größendimensionen von Materialflusstechnik (Komplexität) als 4-Ebenen-Modell mit Objekten der Materialflusstechnik 300

Bild 6.12: Systematik materialflusstechnischer Gewerke (Förderer der Schüttguttechnik kursiv und rechtsbündig), Objekte nach [HNS07] 301

Bild 6.13: Systematik materialflusstechnischer Gewerke für Methodenzuordnung – reduziert nach Bild 2.18 bzw. Bils 6.12 302

Bild 6.14: Technikorientierte Systematik für Rollenförderer (keine Motorrollenantriebe, keine Staufunktion) 303

Bild 6.15: Prinzipielle Wechselwirkungen und Aspekte bei der Modellbildung [D05] an Berechnungs- und Simulationsmodellen 310

Bild 6.16: Aristotelische induktiv-deduktive Methode [LOS06] 311

Bild 6.17: Zusammenhang Modell, Modellbildung, Simulation, Verifikation und Validierung [DAS06] 312

Bild 6.18: Aufbau eines Simulationssystems nach [DAS06] und darin in Anlehnung an [ROD06] 314

Bild 6.19: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI 3633 [VDI 3633] aus [RS12] 315

Bild 6.20: Systematik der Simulation [VDI 2209] 316

Bild 6.21: Reduktion der Entwicklungs-/Berechnungszeit beim Einsatz von multidomänen Simulationslösungen [MSC14] – Praxis von simultaneos engineering und frontloading 318

Bild 6.22: Simulation Content Management mit MSC.SimManager: Eingliederung ins Gesamtprojekt / Workflow eines FEM-Strukturanalyse Prozesses / paralleles Viewing von relevanten Ergebnissen verschiedener Simulationsläufe [MSC14] 319

Bild 6.23: Simulatorkopplung Hydraulik/Mehrkörperdynamik in ITI-Sim/ADAMS.View (im Nachfolgerprodukt SimulationX bereits interne 3D-Mechanik, mit allerdings geringerem Leistungsspektrum als ADAMS [SIM14]) 321

Bild 6.24 Unterschiede und Möglichkeiten durch AS und MKS an einem Rundstahlkettenzug [P7] 322

Bild 6.25 Möglichkeiten, Einflüsse, Anwendungen und Rückwirkungen von AS und MKS bei einem Rundstahlkettenzug [P7] 323

Bild 6.26: Rechnerverwendbarkeit im Konstruktionsprozess [VDI 2210] aus [LOS06] 326

Bild 6.27: Simulationen des CAx [RS12] 326

Bild 6.28: CAx-Prozessketten der Automobilindustrie, Informationsfluss [HIR11] 327

Bild 6.29: CAx im Engineering der Technischen Logistik und dessen Verbreitungstiefe	327
Bild 6.30: Historische Entwicklung des CAD, CAE und Datenmanagements im automotive-Bereich [HIR11].....	328
Bild 6.31: Beziehungen des CAD zu Disziplinen des CAx nach [EM13], [HIR11]	329
Bild 6.32: CAD im Produktlebenszyklus nach [EM13], [HIR11].....	329
Bild 6.33: Top-down und bottom-up Ansatz für eine zweistufige Produktstruktur [VDI 2209]	335
Bild 6.34: Prozess und Vergleichsspannungsergebnisse einer einfachen Topologieoptimierung mit bionischen Leichtbauprinzipien an einem Rundstahlkettenglied 9 x 27mm	344
Bild 6.35: Arbeitsschritte der FE-Software	344
Bild 6.36: Freiheitsgrade im Knoten [SC11].....	345
Bild 6.37: Diskretisierung eines Kreissegmentes [SC11].....	346
Bild 6.38: Lineare und quadratische Ansatzfunktion [SC11].....	347
Bild 6.39: Anpassung des FE-Netzes [SC11].....	347
Bild 6.40: Idealisierung eines Riementriebes [SC11]	348
Bild 6.41: Unterschiedliche Elementtypen [SC11].....	350
Bild 6.42: Balkenelement [SC11]	351
Bild 6.43: Scheibenelement [SC11]	352
Bild 6.44: Volumenelement [SC11]	353
Bild 6.45: Einseitig eingespannter Zug-/Druck-Stab [SC11].....	353
Bild 6.46: Modellierung mittels Stab-, Scheiben- und Volumenelementen [SC11]	354
Bild 6.47: Schrittweiten und Stützstellen	361
Bild 6.48: Gauß-Quadratur	362
Bild 6.49: STEP- und STEP5-Funktion und Ableitungen bei Einheitssprung.....	372
Bild 6.50: Reibung in Abhängigkeit der Rutschgeschwindigkeit	374
Bild 6.51: Größen der IMPACT-Funktion in ADAMS [ADA14]	376
Bild 6.52: Einschleusen eines starren, formstabilen Behälters von einem Bandförderer auf einen weiteren [ADA14].....	377
Bild 6.53: Entleerung von Paketen eines Wechselbehälters mit MKS [FWJ13]	378
Bild 6.54: Beispiel einer Einschleusung oben angegebener Modellierung [P11].....	380
Bild 6.55: Raupenkettenträgerwerk (Gelenkkette) und Rundstahlkettentrieb (Details) in MKS	381
Bild 6.56: Plattenkettenträgerwerk [VDI 2220] und MKS-Modell in MSC.ADAMS zur Analyse der Spurführungs- und Antriebskräfte	382

VERZEICHNISSE

Bild 6.57: Settings eines Plattenkettenförderers in MKS (MCS.ADAMS)	383
Bild 6.58: Modell der Rollreibung [JH12]	384
Bild 6.59: Netzdiagramm Rad-Schiene-Kontakttheorien	386
Bild 6.60: CAD-Modelle von Fahrwerken einzelner Verteilfördererwägen.....	386
Bild 6.61: MKS- (MSC.ADAMS) und analytisches Modell eines Einschleusvorganges [P11]	387
Bild 6.62: Die Stellung der Simulation innerhalb der Produktentwicklung [RS12].....	392
Bild 6.63: Möglichkeiten der Systemanalyse [RS12] nach [VDI 3633].....	397
Bild 6.64: Optimierungsschleife [SCH05]	399
Bild 6.65 Time to Market nach Kramer [RS12].....	408
Bild 6.66 Generationswechsel bei VW [VOL12]	409
Bild 6.67 Produktkostenfestlegung und –entstehung im Kontext des Design- Wissenszuwachses nach [CP99] mit [ES05], [EKL+14]	410
Bild 6.68 Kostenfestlegung und Änderungskosten in der Entwicklung und Konstruktion [ES09].....	413
Bild 6.69 Konzepte der Virtuellen Produktenwicklung, nach [AND10]	415
Bild 6.70 SADT-Methodik (nach Schäfer [AND10])	416
Bild 6.71 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-TPD [AND10].....	417
Bild 6.72 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-Berechnung [AND10]	418
Bild 6.73 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-FEM [AND10]	419
Bild 6.74 Merkmale und SADT-Diagramm der Prozesskette CAD-MKS [AND10]	420
Bild 6.75 Prinzipielle Systemarchitektur von PDM - Systemen ([FG08] dort in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2219[VDI 2219])	423
Bild 6.76 Integration von PDM- und SDM-Konzepten [RS12]	424
Bild 6.77 Durchlaufzeitverkürzung durch Simultaneous Engineering [VDI 2209]	425
Bild 6.78 Parallele Bearbeitungsprozesse unterschiedlicher Domänen durch verknüpfte Datenmodelle [VDI 2209]	426
Bild 6.79 Veränderungen der Produktentstehungsmethoden [ES09].....	429
Bild 6.80 Integrierte Produktentwicklung mit vier Komponenten [EM13]	431
Bild 6.81 Unterscheidung von Entwicklung und Konstruktion nach [EM13]	433
Bild 6.82 Entwicklung und Konstruktion als Knotenpunkt des Informationsumsatzes [EM13]	434
Bild 6.83 Mitarbeiterstruktur in Entwicklung und Konstruktion (VDMA) [EM13].....	435
Bild 6.84 In der Ingenieursausbildung zu erwerbende Fähigkeiten, Kenntnisse und deren Fächer (Umfrage: n=46 bzw. n=143) [ACA12]	436

Bild 6.85 Lebenszyklus eines Materialflusssystemes [GÜN10].....	437
Bild 6.86: Prägende Personen der Konstruktionswissenschaften [GAR14]	439
Bild 6.87: Herangehensweisen an das Konstruieren [FEL13b]	440
Bild 6.88: Einteilung der Prozessmodelle [LIN09].....	441
Bild 6.89: Strukturierung der Vorgehensmodelle, vergl. [LIN09] aus [GAR14].....	442
Bild 6.90: TOTE-Modell.....	443
Bild 6.91: Diskursiver Prozess nach Wulff [LIN05]	444
Bild 6.92: Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel [EM13]	445
Bild 6.93: Vorgehenszyklus aus der Denkpsychologie nach Dörner [LIN05].....	446
Bild 6.94: Vorgehenszyklus nach Rodenacker [BEN04]	447
Bild 6.95: Vorgehenszyklus nach Roth [ROT00].....	448
Bild 6.96: Prozessmodell nach Koller [KOL98]	450
Bild 6.97: Vorgehen nach VDI 2221 (vergl. [VDI 2221]).....	452
Bild 6.98: Funktionsstruktur Wagenheber [VDI2222]	454
Bild 6.99: Vorgehensmodell nach Pahl/Beitz [FEL13a].....	457
Bild 6.100: PEP und VDI-Methodik mit Berücksichtigung der Konstruktionsart und der zeitlichen Häufigkeit.....	460
Bild 6.101: Modulstruktur und Arbeitsprozess der VDI-app [GAR14]	469
Bild 6.102: VDI-Entwicklungsprozess (interaktiv) und Methodenvorschlag der VDI-app [GAR14]	470
Bild 6.103: Verteilung des Auftretens und durchschnittliche Dauer von Varianten-, Anpassungs-, und Neukonstruktion im Maschinenbau (VDMA nach [EM13])	472
Bild 6.104: Vorgehenspläne der Hauptforderung „Funktion“ von Wiederhol-, Varianten-, Anpassungs-, und Neukonstruktion (Synthese aus [EM13], [FEL13a] und [RS12])	472
Bild 6.105: Gliederung eines Produktprogrammes nach [RS12].....	477
Bild 6.106: Allgemein anwendbare Funktionen abgeleitet von den Merkmalen Art, Größe, Anzahl, Ort und Zeit in Bezug auf den Stoff-, Energie- und Informationsumsatz [FEL13a].....	483
Bild 6.107: Stoff-, Energie-, und Informationsumsatz an einem Stetigförderer	484
Bild 6.108: Morphologischer Kasten des Fahrwerkes eines zellularen Fördermittels mit beispielhafter Auswahl.....	485
Bild 6.109: Baustruktur des Fahrzeuges	486
Bild 6.110: Morphologischer Kasten Teil „Fahrzeug“ (zellulares Fördermittel)	486
Bild 6.111: Morphologischer Kasten (Phase 3: Abförderung) und Nutzwertanalyse der Vereinzlung eines 3D-Paketstromes.....	487

VERZEICHNISSE

Bild 6.112: Strukturierte Informationssammlung für eine Rollenbahn als Datenbasis für die elektronischen Form der Bereitstellung und Synthese von Lösungsprinzipien	488
Bild 6.113: Konfiguration des Rollenförderers: Auswahl Förderprinzip und Festlegung Grundparameter (Materialfluss, Geometrie) [PER14]	489
Bild 6.114: Konfiguration des Rollenförderers: Detaildimensionierungsprozess Antrieb und abschließende Zusammenstellung mit Verlinkung zu Detailinformationen	490
Bild 6.115: Berichtsgenerierung von Lösungsvarianten eines Bandförderers [PER14]	491
Bild 6.116: Wiki-System (realisiert in lexiCan®) zur Erfassung und Darstellung x-gerechter Produktmerkmale und –ansprüche mit Schwerpunkt auf Transport, Montage und Recycling	492
Bild 6.117: Wissen als Grundlage für die Erzielung von Wettbewerbsvorteilen, nach [BAU07]	496
Bild 6.118: Begriffshierarchie: Zeichen–Daten–Information–Wissen. Nach [HAR02] in Anlehnung an [KR14]	496
Bild 6.119: Grundlegende Merkmale des Wissens, nach [BAU07]	498
Bild 6.120: Kernprozesse und Bausteine des Wissensmanagement [MIL08]	498
Bild 6.121: Unterschiedliche Möglichkeiten, wo Wissen gespeichert sein kann [ALC14]	499
Bild 6.122: Allgemeine Architektur eines XPS-Systems [BOD05]	500
Bild 6.123: Aufbau Konstruktionskatalog [ROT00].....	502
Bild 6.124: Repräsentation von Wissen in verschiedenen Ausbaustufen von semantischen Netzen, nach [REI10]	504
Bild 6.125: Design Structure Matrix - DSM [DSM09]	506
Bild 6.126: Partitioning einer DSM [DSM09].....	507
Bild 6.127: Banding einer DSM [DSM09]	508
Bild 6.128: Clustering einer DSM [DSM09]	509
Bild 6.129: Domain Mapping Matrix DMM [DSM09]	509
Bild 6.130: Multiple Domain Matrix MDM in Anlehnung an [DSM09].....	510
Bild 6.131: MindMapping [WIK14a].....	511
Bild 6.132: Beispiel einer Taxonomie [UNI07]	512
Bild 6.133: Beispiel der Grundauslegung (konstruktiv und antriebsdynamisch) eines Rollenförderers in EXCEL®	513
Bild 6.134: Schnittmengendiagramm für einen Rollenförderer.....	514
Bild 6.135: Systemdarstellung für die Systemerfassung mit LOOME0 [TES14a]	516
Bild 6.136: Dematic/Fraunhofer IML Multishuttle Move [DEM13]	516
Bild 6.137: Beispielhafte Strukturkomponenten eines Shuttles	517
Bild 6.138: Konstruktionskatalog Fahrwerk eines zellularen Fördermittels	517

Bild 6.139: DSM (links autom. geclustert) und Verbindungsgraph eines Shuttle-Fahrzeuges	518
Bild 6.140: Klassen, Beziehungen und Instanzen des Shuttles in Protégé.....	519
Bild 6.141: Class hierarchy und object property des Shuttles in Protégé.....	520
Bild 6.142: Produktkosten mit Zuordnung zum Entwicklungsprozess [CP99]	522
Bild 6.143: Erreichbare Zeiteinsparung durch KBE –Einsatz, nach [VBD+12]	522
Bild 6.144: KBE-System Entwicklungszeit versus herkömmliche Konstruktionszeit, nach [EM07].....	523
Bild 6.145: Vom Wissensmanagement zum CAD Bauteil [LIE03]	524
Bild 6.146: Integration des Wissensmanagements in den Konstruktionsprozess [LIE03]	524
Bild 6.147: Historische Entwicklung von CAD und KBE [P5]	528
Bild 6.148: Spezifizierung der vier Hauptphasen (angelehnt an[ROC12])	533
Bild 6.149: Die Wissensverarbeitungskette von dem informellen zum formellen Modell, nach [MOK12d]	535
Bild 6.150: Regelklassen, Hauptfeatures und –vorteile des Einsatzes von KBE in der Technischen Logistik [P5]	542
Bild 6.151: Disziplinen der automatischen Konstruktion: KBx-Definition [P4]	543
Bild 6.152: Methodik der Variantenanalyse	546
Bild 6.153: Portal eCl@ass [ECL12].....	547
Bild 6.154: Funktion der xKBE-app [P3].....	549
Bild 6.155: Formalisierung von Daten eines Produktportfolios der Fa. SANDVIK mining and construction GmbH, Zeltweg in der xKBE-app [P3]	550
Bild 6.156: Relationen zwischen Entitäten	552
Bild 6.157: Beispiele für Entitäten und Relationen mit zugehörigen Eingabemasken der xKBE-app V1	554
Bild 6.158: Ontologie-View der xKBE-app V1 und V2	555
Bild 6.159: Facts and figures der xKBE-app V1	556
Bild 6.160: Domänen in Axiomatic Design [FL08].....	558
Bild 6.161: Ablaufdiagramm des Axiomatic Design [FL08]	559
Bild 6.162: Zuordnungs- und Dekompositionsprozess im Axiomatic Design [FL08], [SYS12]	560
Bild 6.163: Beispiel einer Hängefördereranlage in einem Lager- Kommissionierbereich [OCS12]	562
Bild 6.164: Produktstruktur, Designparameter und funktionale Anforderungen eines Hängeförderersystems (Auszug)	562
Bild 6.165: DMM eines Hängeförderersystems (Auszug).....	563

VERZEICHNISSE

Bild 6.166: Darstellung der Verknüpfungen der Designparameter und funktionalen Anforderungen zum Antriebs-Kettenrad eines Hängeförderers (traceability-view abgeleitet aus der zugehörigen DMM)	564
---	-----

Tabelle 1: MKS-Modellbibliothek „Engineering for logistics“ CAD-CAE [P7]	69
Tabelle 2: Einzelne Methoden der methodischen Konstruktion mit Beschreibung als Basis für MeK2 (Kap. 0)	77
Tabelle 3: Forschungsansätze zu „logistigerechter Konstruktion“	83
Tabelle 4: Einzelne Methoden des Wissensmanagements mit Beschreibung als Basis für MeW1 und MeW2 im Themenkreis „wissen“	87
Tabelle 5: Überblick zur Differenzierung des KBE	92
Tabelle 6: Definition des KBx	95
Tabelle 7: Besonderheiten im Engineering in der Technischen Logistik - Prämissen ..	102
Tabelle 8: Begriffe im Umfeld „Methode“	108
Tabelle 9: Einteilung und Kategorisierung von Methoden	110
Tabelle 10: Ansätze zur Methodenbereitstellung	113
Tabelle 11: 10 Methoden für das Engineering in der Technischen Logistik als Endergebnis des Schritts AW-M7 der Teilprozesse P-A und AW-M	117
Tabelle 12: Wirkungen und Räume des Methodeneinordnungsmodells (s. Bild 3.8) ..	124
Tabelle 13: Dimensionen des Methodeneinordnungsmodells	124
Tabelle 14: Beispiele für CAD-Modellierungsstrategien und Ansätze [VDI 2209]	156
Tabelle 15: Wissensmethoden von MeW1 am Beispiel Rollenförderer	226
Tabelle 16: Transportgüterkategorien für die MKS-Simulation an Sortieranlagen	246
Tabelle 17: MKS-Modelle (MSC.ADAMS) für Ausschleusvorgänge	255
Tabelle 18: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeK1 bis MeK5	261
Tabelle 19: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeB1 bis MeB3	262
Tabelle 20: Wirkung und Lückenschluss durch die Methoden MeW1 und MeW2	263
Tabelle 21: Modell und Modellbildung nach unterschiedlichen Definitionen [VWB+09]	308
Tabelle 22: Beispiele für CAD-Modellierungsstrategien und Ansätze [VDI 2209]	336
Tabelle 23: „FEM-Programme für spezielle Anwendungen, vgl. [BEN04]“	342
Tabelle 24: Elementtypen und deren Eigenschaften [SC11]	351
Tabelle 25: Unterschiede zwischen MKS- und FEM-Modellen [VWB+09]	364
Tabelle 26: Rad-Schiene-Kontakttheorien im Vergleich	385
Tabelle 27: MKS-Modelle (MSC.ADAMS) für Ausschleusvorgänge	388
Tabelle 28: Simulationsmethoden und deren Eigenschaften [FWJ13] dort in Anlehnung an [VWB+09]	391
Tabelle 29: Gegenüberstellung der Vorgehensmodelle	458
Tabelle 30: Bewertung der Vorgehensmodelle	459

VERZEICHNISSE

Tabelle 31: Zuordnung der Methoden zu den Hauptarbeitsschritten	465
Tabelle 32: Zuordnung der Methoden zur Konstruktionsart	466
Tabelle 33: Freiheitsgrade der Produktentwicklung zur Beeinflussung der Logistik und Methoden dazu in unterschiedlichen Phasen des PEP, nach [PSS05].....	493
Tabelle 34: Bewertungsmatrix der KBE-Methodiken [STE12].....	539

9 Anhang Habilitationsunterlagen

9.1 Darstellung des Fachs „Fördertechnik“

Die **Logistik** im Allgemeinen und die Technische Logistik mit der Fördertechnik als spezielle Teildisziplinen sind teilweise sehr junge und noch nicht vollends etablierte Wissenschaften des Ingenieurfaches. Das Anliegen der in diesen Fächern tätigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist neben der fachbegründeten Suche nach Lösungen von Problemen auch eines der Festigung und Anerkennung der Wissenschaftlichkeit des Faches.

„... Logistik baut als wissenschaftliche Disziplin nicht nur auf Grundlagenwissenschaften auf, wie andere anwendungsorientierte Disziplinen auch, sondern Logistik verbindet darüber hinaus auch anwendungsorientierte Wissenschaften wie z.B. Betriebs- und Volkswirtschaftslehre, Ingenieurwissenschaften, (Wirtschafts-)Informatik, Wirtschaftsgeographie oder Jura, um auf diese Weise neue, spezifisch logistische Erkenntnisse zu generieren. Insofern ist die Logistik als wissenschaftliche Disziplin auch kein (echtes) Teilgebiet nur einer dieser Wissenschaften, sondern sie zielt gerade auf die Verbindung der Wissensbestände verschiedener Disziplinen und damit auf die Überwindung etablierter Disziplingrenzen ab. Insofern besitzt die Interdisziplinarität für die Logistik eine zentrale und über die für jede anwendungsorientierte Wissenschaft hinausgehende Bedeutung. Sie ist zentrales Element des logistischen Paradigmas. Selbstverständlich schließt diese Interdisziplinarität nicht aus, dass einzelne logistische Analysen oder Forschungsfelder sich auf spezifische Fragestellungen innerhalb der einzelnen etablierten Wissenschaftsdisziplinen konzentrieren und insofern nur begrenzt interdisziplinär sind. Dies ergibt sich ganz einfach aus wissenschaftsökonomischen Gründen. Hieraus folgt unmittelbar, dass es in den etablierten anwendungsorientierten Wissenschaftsdisziplinen spezialisierte Logistik-orientierte Fachgebiete gibt, z.B. die betriebswirtschaftliche Logistik oder die ingenieurwissenschaftliche Logistik.“ [GW11]

Die **Technische Logistik** ist hiermit eine solche anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin. Die Methoden und Werkzeuge des Fachgebiets sind jene der Ingenieurwissenschaften, die Erkenntnisobjekte jene der Logistik. Die Definitionen zur Technischen Logistik sind mannigfaltig unterschiedlich und bei weitem nicht einheitlich; im Folgenden wird die Definition von [VDI12] verwendet, die aufgrund ihres gremialen Hintergrundes die breiteste akzeptierte ist.

„Unter Technischer Logistik (auch Intralogistik) versteht man die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschs in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen. Dabei beinhaltet die Technische Logistik die Prozesse von der Rampe bis zur Rampe wie zum Beispiel:

- Wareneingang
- Verpackung
- Warenidentifikation
- Lagerung
- Kommissionierung
- Sortierung
- Warenausgang
- Verladung
- Warenumsschlag

Thematisch werden im Fachbereich Technische Logistik auch alle Arten der Fördertechnik, d.h. Gabelstapler, FTS, Krane, Rollenförderer usw. betreut. Ein weiteres spezielles Feld in der Logistik ist das Schüttgut, d. h. der Transport von grob- und feinkörnigen Materialien aus Bergbau, Chemie und Nahrungsmittelindustrie über teilweise sehr weite Strecken.“ [VDI12]

Im Fachbereich "Technische Logistik" (FB3) der VDI befassen sich folgende Fachausschüsse in ihren Richtlinienausschüssen mit Intralogistik-Themen, daraus kann man auch auf den Inhalt der Technischen Logistik schließen:

- Logistiksysteme und -management
- Logistikprozess und IT
- Zuverlässigkeit in der Intralogistik
- Krane
- Flurförderzeuge
- Lager- und Materialflusstechnik
- Schüttgut-Fördertechnik
- Verpackungslogistik, Ladungssicherung
- Fahrerlose Transportsysteme (FTS)
- Auto ID-Technologie“

Obigen Ausführungen zufolge ist die **Fördertechnik**³¹⁶ nun ein Teilbereich der Technischen Logistik zum (Be)Fördern logistischer Objekte, was aufnehmen/abgeben, tragen und bewegen mit verzweigen/zusammenführen umfasst (oder auch etwas weiter gefasst als TUL-Prozesse bezeichnet: transportieren, umschlagen, lagern). Historisch gesehen stellt sich das Fachgebiet Fördertechnik anders dar, als den verbreiteten Systematisierungen zufolge. Einerseits kann man eine aktuelle Umstrukturierung der im deutschen Sprachraum maßgebenden und mit klassischer Fördertechnik seit jeher befassten Institute wahrnehmen, die sich allesamt zu Instituten der Technischen Logistik,... fachlich durchaus erweitert haben (dies betrifft bspw. die Lehrstühle der Technischen Universitäten Dresden, Duisburg-Essen, Wien, Graz).

Dies zieht sich aber nicht bis in die klassische Systematisierung von Sachgebieten der Wissenschaften (ÖSTAT) durch, wo nur die Gebiete „Fördertechnik“ und „Logistik“ genannt sind. Andererseits muss aber differenziert erörtert werden, inwiefern man losgelöst überhaupt noch von Fördertechnik sprechen kann, ohne

³¹⁶ Auf eine im v.a. industriellen Umfeld der Logistik vereinfachende und oftmals umgangssprachliche einschränkende Eingrenzung des Begriffs Fördertechnik auf klassische Stückgutstetigförderer oder schlimmer lediglich Rollenförderer sei hier den vielen persönlichen Erfahrungen geschuldet hingewiesen.

die Prozesse der Logistik mit einzubeziehen. Da Fördertechnik stets Erfüllungsorgan logistischer Aufgaben ist, ist sie in das logistische Gesamtsystem mit eingebunden und erhält ihre (Be)Förderungs-Aufträge daraus.

Die **Aufgabe der Fördertechnik**³¹⁷ ist nun nach [DUB05] das Fortbewegen (Fördern) von Gütern und Personen über begrenzte Entfernung innerhalb einer örtlich begrenzten und zusammenhängenden Betriebseinheit unter Einsatz von technischen Mitteln, den Fördermitteln. Zu ihnen gehören die Fördermaschinen.

Das **Fachgebiet Fördertechnik**³¹⁸:

- Befasst sich nach [SCH94] aus [DUB05] mit der Projektierung und Konstruktion der Fördermittel sowie mit der Planung und Projektierung von Materialflusssystemen.
- Befasst sich nach [GR15] mit der Konstruktion und Berechnung von Transport-, Umschlag- und Lagermitteln, deren Ausführungsformen und den Materialflussfunktionen Transportieren, Umschlagen und Lagern mit Schwerpunkt auf den Transportmitteln³¹⁹.
- Ist mit [SEB15] und seiner Definition einer Sicht des Konstrukteurs auf Fördertechnik am umfassendsten, indem es die Fördertechnik in Komponenten-, Anlagen- und Systemtechnik gliedert und der Systemtechnik viele logistische Aufgaben aus Planung, Automatisierung und IT zuordnet. Die Materialflusstechnik ist hier eine Verkettung von Fördermitteln zu komplexen Systemen mit zusätzlichen Aufgaben wie Montage, Prüfung und Bearbeitung.
- Über die Zugehörigkeit der Lagertechnik und der Gewinnungsmaschinen zur Fördertechnik besteht Uneinigkeit über die Quellen hinweg.

Fördermaschinen – auch als **Fördermittel** bezeichnet – sind Arbeitsmaschinen, die mittels Gutaufnahmemittel oder anderer Zwischenmittel die Ortsveränderung von Gütern – das Transportieren und auch Umschlagen – ausführen (Hebe- und Transportmaschinen) oder die mittels Schneidwerkzeugs und Aufnahmemittels der Gewinnung von Schüttgütern dienen (Gewinnungsmaschinen). Nach der Hauptarbeitsbewegung des Gutaufnahmemittels unterscheidet man zwei Hauptgruppen von

³¹⁷ Der Transport von Gütern und Personen über große Entfernungen ist ein Aufgabengebiet der Verkehrstechnik. Verkehrsmittel sind Lkw, Bahn, Schiff, Flugzeug. Der Transport von Flüssigkeiten und Gasen durch Rohrleitungen ist ein Aufgabengebiet der Verfahrenstechnik.

³¹⁸ Die Materialflusstechnik ist ein vorwiegend intralogistischer Begriff und grenzt die Personenbeförderung und implizit auch die Schüttgutfördertechnik aus. Hinweis auf begriffliche Unschärfe in den Fachgebietsdefinitionen ist auch die späte Umbenennung einer renommierten Monographie von „Materialflusstechnik“ [MRW08] zu „Fördertechnik“ [GR15], die sich über zehn Auflagen mit Fördertechnik unter dem Buchtitel Materialflusstechnik befasste. Weitere Überlegungen zu begrifflichen Unschärfen s. Kap. 2.2.2* f.7.

³¹⁹ Quelle [GR15] nimmt nicht die klassische Unterscheidung der Fördermittel in Stetig-/Unstetigförderer vor, sondern listet nur Stetigförderer und die Maschinen der Unstetigförderer nicht gruppiert eigens als Serienhebezeuge, Krane und Flurfördermittel.

Fördermaschinen [DUB05]: die Unstetigförderer mit aussetzenden und die Stetigförderer mit dauernden Arbeitsbewegungen. Die dritte Hauptgruppe bilden die Gewinnungsmaschinen. Sie haben funktionell immer zwei Aufgaben zu erfüllen: das Lösen und Aufnehmen des Guts und dessen Transport. Fördermaschinen erfüllen also die TUL-Prozesse der Logistik. Die „statischen Maschinen“ der Lagertechnik sind eher als Gewerke zu bezeichnen und der Lagertechnik zuzurechnen.

Bild 2.18 stellt einen kleinsten gemeinsamen Nenner für die o.a. Sichtweisen der Fördertechnik dar (inkl. [HKD05], [MRW08], [HSN07], [MAR11]) indem es die Fördermittel der Größe nach kategorisiert. Sie dient in der Habilitationsschrift als Referenz. Die ingenieurlichen und wissenschaftlichen Tätigkeiten mit der Fördertechnik sind Projektierung, Konstruktion mit Auslegung/Dimensionierung und deren Betrieb.

In einer **Transportkette** können Fördermittel allein (innerbetriebliche Transportkette) oder Verkehrsmittel allein (außerbetriebliche Transportkette und in Sonderfällen wie Stapler, autonome Fahrzeuge, ... auch innerbetriebliche) oder Förder- und Verkehrsmittel gemeinsam arbeiten. Die Transportkette ist als System aufzufassen, bei dem die Verknüpfungen systemverträglich sein müssen. Der Überbegriff Transporttechnik umfasst die Fördertechnik (innerbetrieblich) und die Verkehrstechnik (außerbetrieblich). Die Transportaufträge der Transporttechnik stellen die Anforderungen der Logistik dar. Hauptoperationen in der Transportkette sind: Transportieren, Umschlagen, Lagern. Als Umschlag wird die Gesamtheit aller Vorgänge bezeichnet, die beim Übergang der Güter auf ein Transportmittel, beim Abgang von einem Transportmittel und beim Wechseln des Transportmittels notwendig sind. Abgeleitet sind die Begriffe Umschlagtechnik und Umschlagmittel. Handhaben oder Manipulieren ist die positionsgerechte Übergabe von Gütern in eng begrenzten Arbeitsräumen. Fördermaschinen können auch zur positionsgerechten Übergabe eingesetzt werden. Sie bedienen jedoch wesentlich größere Arbeitsräume als Manipulatoren. Die ganzheitliche Betrachtung des Materialflusses³²⁰ und des begleitenden Informationsflusses einschließlich der Gestaltung der zu lösenden dispositiven und administrativen Aufgaben ist Gegenstand der Logistik. Daraus stellt sich die (Transport)Aufgabe, das richtige Objekt (Material, Gut, Information, Dienstleistung, Energie) zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Qualität und Quantität, versehen mit den notwendigen Informationen, am rechten Ort mit minimalen Kosten bereitzustellen.

Fördergüter lassen sich einteilen nach ihrer Beschaffenheit in Schüttgüter (lose Güter in schüttbarer Form, z.B. Kohle, Erz, Getreide) und Stückgüter (individualisierte Güter, die stückweise gehandhabt werden, z.B. Kiste, Container, Pkw). Eine Transporteinheit kann ein Einzelstück sein oder aus mehreren Einzelstücken bestehen, die auf bzw. mit einem Transporthilfsmittel (z.B. Palette, Container) zusammengefasst sind.

Engineering in der Technischen Logistik ist, im Rahmen der interdisziplinären Anwendungsorientiertheit der Logistik, eine maschinenbaulich-gestalterische Ingenieurstätigkeit in der Logistik. Es bezeichnet nun durch die Kombination des Tätigkeitsbegriffs Engineering³²⁰ mit dem Betätigungsfeld Technische Logistik all jene maschinenbaulich konstruktive geometrisch-

³²⁰ Eine umfassende Begriffsklärung des Terminus „Engineering“ findet sich in Kap. 2.1*

stoffliche Gestaltung, die in der Aufgabenklärung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung von Fördermaschinen in Neu- Anpassungs- und Variantenkonstruktion stattfindet. Dabei ist abzugrenzen zu den Entwicklungsaufgaben in den Domänen der IT, Automatisierung, Identifikation und logistischer Planung, die über das konstruktive geometrisch-stoffliche Gestalten hinausgehen und Felder³²¹ der Technischen Logistik darstellen. Somit ist die Technische Logistik mehr als ein Oberbegriff über die Fördertechnik sondern stellt vielmehr den Rahmen dar, ohne den die konstruktiven Engineering-Aufgaben für die Fördertechnik und deren Fördermaschinen nicht erledigbar wären. Dies betrifft das Zusammenwirken materialflusstechnischer Grundgrößen, die mit Durchsatz und Kapazität stets Objekt logistischer Untersuchungen sind, und die die Grundanforderungen an die Fördertechnik spezifizieren mit den Anforderungsdefinitionen der Konstruktionsaufgaben. Natürlich sind ebenso auch alle betrieblichen, automatisierungs-, IT- und sensorgebundenen Rahmen- und Randbedingungen der Technischen Logistik konstruktionsrelevant für die Fördertechnik. Insofern würde eine reines Engineering der Fördertechnik vorwiegend allen logistischen, planerischen, betrieblichen und domänenübergreifenden Kontext vernachlässigen und eine Entwicklung übergreifender Ansätze wie bspw. mit der entwickelten Methode MeK1 (simultaneous engineering und frontloading in der Technischen Logistik, s. Kap. 3.4.1*³²²) wäre nicht möglich. Weiters wäre die Beschränkung auf die Fördertechnik, die Verpackungs- und Lagertechnik definitionsgemäß ausschließt, zu eingrenzend und der bidirektionale Informations- und Aufgabentransfer Technische Logistik \leftrightarrow Engineering von vornherein ausgeschlossen. Darüberhinaus wäre jede Bearbeitung des gesamten³²³ Fachgebietes Technische Logistik in der hier dargelegten Breite aufgrund der Interdisziplinarität unmöglich!

³²¹ Eine umfassende Abgrenzung dazu findet sich in Kap. 2.1.2*

³²² Der Asteriskus an einer Kapitelnummer verweist auf das zugehörige Kapitel der Habilitationsschrift

³²³ Der Fördertechnik angeschlossene Bereiche wie Lager-, Verpackungs-, Umschlag-, bis hin zur Transporttechnik sind ebenfalls durch die hier erarbeiteten Methoden gestalt- und optimierbar, da es auch dafür oft um konstruktive, geometrisch-stoffliche Aufgaben handelt.

Das **Fachgebiet der Fördertechnik**, ist eine **im deutschen Sprachraum verwurzelte Disziplin**, die hier prominentest vertreten ist. Organisiert ist die wissenschaftliche Community hier in der WGTL („Wissenschaftliche Gesellschaft Technische Logistik“), die die Technische Logistik als Impulsgeber für technische Innovationen wissenschaftlich begleitet. Durch die bessere Vernetzung von Hochschulinstituten erhält die Logistikbranche einen Ansprechpartner auf wissenschaftlicher Seite, der in der Lage ist, die außerordentlich dynamische Branche durch anwendungsnahe Forschung im technologischen Bereich zu unterstützen [WGT15]. In der VDMA findet sich ebenfalls eine Interessensvertretung, die, entgegen der obigen Systematisierungen, vier Fachbereiche aufweist: Krane und Hebezeuge, Flurförderzeuge, Lagertechnik und Stetigförderer [VDM15]. Viele Branchennetzwerke und Interessensvereinigungen wie vnl und BVL bringen die Technik mit der Logistik zusammen, allerdings nicht in allen Fällen auf wissenschaftlichem Niveau. International gesehen ist nirgends eine derart konzentrierte Befassung mit den technischen Themen der Logistik auszumachen als im deutschsprachigen Raum. Erwähnt sei jedoch die Schnittstelle Technik/Logistik in den Agenden der amerikanischen Material Handling Industry (MHI), die übergeordnet wissenschaftlich und ausbildnerisch tätig ist [MHI15] (ähnlich der deutschen Bundesvereinigung Logistik, BVL). Hier kommen die im angelsächsischen Raum etablierten Fachgebiete („industrial engineering“ und „operations research“) mit den technischen Belangen der Logistik in Berührung.

In der akademischen Ausbildung kommt der Fördertechnik eine zentrale Rolle in der didaktischen Vermittlung der Ingenieursgrundlagen zu. Da die Fördertechnikinstitute vieler technischer Universitäten mit zu den ältesten Lehrstühlen zählen, ist das Fach in den meisten maschinenbaulichen Studiengängen prominent verwurzelt. Vielmehr stellen aber die Maschinen der Fördertechnik didaktisch, aufgrund ihrer in vielen Fällen überschaubaren Komplexität (Bandförderer, Krane, ...) aber technischen Breite, hervorragend geeignete Objekte dar, um die Grundlagen aus Mechanik, Statik, Antriebstechnik und Maschinenelementen an einem Objekt in aller Breite zu betrachten. Dies ist traditionell in vielen sekundären und tertiären Bildungseinrichtungen verwurzelt und so haben die Maschinen der Fördertechnik Generationen von Ingenieuren geprägt und ihnen dabei geholfen, das Grundlagenwissen an realen Objekten einzusetzen und es somit zu festigen. Mit dem Erstarken der Logistik ist die Vermittlung von Kenntnissen der Fördertechnik heutzutage vermehrt bedeutend, die Rolle von Technik in komplex-vernetzten, globalen Logistik-Netzwerken aufzuzeigen und die Wichtigkeit der wissenschaftlichen Befassung damit gegen rein organisatorische Betrachtungsweisen zu behaupten.

Folgende **wissenschaftliche Veranstaltungen und Fachmedien** dienen der Technischen Logistik zum Austausch (ohne Quellen; können mit Suchmaschinen aufgefunden werden):

Kongresse:

- International Material Handling Research Colloquium (IMHRC), zweijährig in Europa und USA °
- Triennial International Conference (MHCL) Material Handling, Constructions and Logistics, Belgrad und Wien °
- Physical Internet Conference, jährlich international °
- International Scientific Symposium on Logistics der BVL (ISSL), jährlich in D °
- WGTL-Kolloquium, jährlich in D °
- Kranfachtagung, jährlich in D °
- Schüttguttagung, jährlich in D °
- Materialflusskongress VDI, jährlich in D ° (viele Firmenpräsentationen)

Journale:

- Logistics Research (Springer, online und print) °,°°
- Logistics Journal (Organ der WGTL, nur online) °,°°
- Hebezeuge und Fördermittel (monatlich, print)
- fördern und heben (monatlich, print)
- Deutsche Hebe- und Fördertechnik (monatlich, print)
- Jahrbuch Logistik (jährlich, print) °
- Übergeordnete Zeitschriften mit regelmäßigen Beiträgen zur Technischen Logistik:
 - KONSTRUKTION (monatlich, print) °,°°
 - Proceedings in Manufacturing Systems (4 Ausgaben jährlich, Bukarest, online und print) °,°°
- ... Tagungsbände der o.a. Kongresse

° peer reviewed,

°° gerankt bei div. Wissenschaftsdiensten

Die **Vertretung und Förderung des Faches „Fördertechnik“ an der TU Graz** erfolgt durch das Wirken des Instituts für Technische Logistik, vormalis Fördertechnik und Logistiksysteme mit seiner langen Tradition in Forschung und Lehre. Im Rahmen der Ausbildung von Maschinenbau- und Maschinenbau-Wirtschaftsingenieurinnen und -ingenieuren werden Grundlagen in Bachelorstudien und weiterführende Kurse in den Masterstudien zur Fördertechnik und Technischen Logistik gelehrt und in den Abschlussarbeiten der Studierenden mit reger Beteiligung lokaler, branchenführender Logistiktechnikproduzenten perfektioniert. Diese Firmen sind es neben den öffentlichen Fördergebern auch vorwiegend, die die wissenschaftliche

Grundlagenforschung des Fachbereichs und die Weiterentwicklung der Technischen Logistik in Projekten unterstützen.

Unzählige Forschungs- und Industrieprojekte mit Gesamtumsätzen von einigen Mio. € sowie die permanente Nachfrage nach Spezialisierung im Fach in v.a. den Masterstudiengängen, sowie ein steter Bedarf nach akademisch gebildeten Fachkräften in den führenden Industrien sprechen eine deutliche Sprache zugunsten des Fachs. Auch die aktuelle Nachbesetzung zweier renommierter Institute des Fachbereichs (TU München und TU Chemnitz mit 50 bzw. 90 wiss. Mitarbeitern) zeigt von der Notwendigkeit des Vorhandenseins einer akademischen Lehre und einer wissenschaftlichen Befassung mit dem Fachbereich für Industrie, Wissenschaft und die Gesellschaft im Allgemeinen.

Viele nationale und internationale **Forschungsförderungsprogramme** nehmen sich der Logistik und der damit verbundenen technischen Themenstellungen an und fördern so auf direktem Wege deren Weiterentwicklung des Faches (Horizon 2020 mit Logistikschwerpunkten 5.1, 5.4 und FFG Mobilität der Zukunft sowie SFG). Eine vielversprechende internationale Forschungsrichtung, das „Physical Internet“, revolutioniert die Logistik nach dem Vorbild des Internets und ist an der TU Graz in Person des Autors vernetzt und etabliert vertreten.

Ein kontinuierliches jährliches Umsatzwachstum von 7%³²⁴ spricht ebenso für die Bedeutung der Technik der Logistik wie die steigende Nachfrage von Ausbildungsplätzen und die Entwicklung neuartiger Ausbildungsprogramme der Logistik. Die Konzentration der Logistiktechnikproduzenten mit 70% im europäischen Raum widerspiegelt die o.a. lokale Konzentration der Forschungseinrichtungen im deutschen Sprachraum. Ein Jahresumsatz der deutschen Fördertechnik- und Intralogistikbranche mit 19,4 Mrd. Euro unterstreicht die Relevanz des Themenbereiches in harten Zahlen. Eine stetig steigende F&E – Quote der führenden Technologiehersteller befeuert dazu die universitäre Forschung von Industrieseite parallel zur öffentlichen Forschungsförderung hin zu den übergeordneten Hauptzielen: Leistungssteigerung, Ressourceneffizienz, Energieeffizienz, Zuverlässigkeit/Sicherheit/Verfügbarkeit fördertechnischer Maschinen zur Erfüllung der Aufgaben der Logistik.

³²⁴ Zahlen folgend von [STA14]