

---

Dissertation

Strategien zur Weiterentwicklung der wissensbasierten  
Konstruktion

Von der Bauteilkonstruktion zur effizienten Systemgestaltung am Beispiel der automobilen  
Strukturentwicklung

Dipl.-Ing. Johannes Mayr

---

Vorgelegte Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen  
Wissenschaften (Dr.techn.)

An der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften,  
Technische Universität Graz,  
Institut für Fahrzeugtechnik



Erstbegutachter: Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mario Hirz

Zweitbegutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner

Graz, im Jänner 2015

---

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mayr Jh.', with a stylized flourish at the end.

Mayr Johannes  
Graz, am 05.01.2015

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner beruflichen Tätigkeit in der Vorentwicklung der MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG. Der wissenschaftliche Anteil der Arbeit entstand hierbei auf Basis eines privaten Engagements, welches über die zu bearbeitenden Fragestellungen des Tagesgeschäftes in der Fahrzeugentwicklung und dessen Produktmodellierung hinaus ging. Ermöglicht wurde die wissenschaftliche Bearbeitung durch die enge und konstruktive Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich der Virtuellen Produktentwicklung am Institut für Fahrzeugtechnik, als Teil des Frank Stronach Instituts der TU Graz.

Hier gilt mein ganz besonderer Dank meinem wissenschaftlichen Betreuer Ass. Prof. Univ.-Doz. Dr.techn. Mario Hirz für seine engagierte Förderung und Betreuung dieser Arbeit. Die fachlich fundierten Analysen und der darauf aufsetzende Diskurs haben wesentlich zur Qualität der vorliegenden Arbeit beigetragen. Ich möchte mich ausdrücklich für das positive und wissenschaftlich orientierte Arbeitsklima und das entgegengebrachte Vertrauen mir gegenüber bedanken. Weiters bedanken möchte ich mich beim Zweitbegutachter dieser Arbeit Prof. Dr.-Ing. Martin Eigener. Ebenso bedanken möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Fischer für den finalen Feinschliff der Arbeit. Des weiteren gilt mein Dank Severin Stadler, ebenfalls Doktorand am Institut für Fahrzeugtechnik, für die geführten inhaltlich Diskussionen.

Von Seiten der Industrie gilt mein initialer Dank Dipl.-Ing. Christoph Fankhauser, welcher als interner Vorgesetzter diese Arbeit von Beginn an unterstützt hat und mir in der Startphase der Arbeit den erforderlichen Freiraum schaffen konnte. Bei MAGNA STEYR möchte ich im Rahmen einer sehr konstruktiven Zusammenarbeit mit den Fachbereichen in der Konstruktion und Gesamtfahrzeugsimulation besonders Dr. Anton Falkner hervorheben, welcher hinsichtlich der interdisziplinären Sichtweise wesentlich beigetragen hat.

Ein besonderes Dankeschön gilt meinen Eltern, welche es mir trotz sechs Geschwister ermöglicht haben ein Studium zu absolvieren, welches die Grundlage für diese Arbeit ist. Des weiteren gilt mein Dank meiner Verlobten für die entgegengebrachte Geduld während der Umsetzung. Zum Abschluss möchte ich noch betonen, dass ich es als Privileg sehe, diese Arbeit in einem so schönen und sicheren Land wie Österreich, machen zu können.

## **Kurzfassung**

Ziel des Forschungsprojektes ist die Unterstützung der Fahrzeugentwicklung durch neue Ansätze, Methoden und Strategien. Eine besondere Herausforderung stellt die Integration der vielfältigen und teilweise gegenläufigen Anforderungen dar, z.B. durch neue Technologien, eine steigende Varianten- und Ausstattungsvielfalt, gesetzliche Rahmenbedingungen, sowie die Einhaltung von Termin-, Qualitäts- und Kostenzielen. Der automotiv Entwicklungprozess ist eng an die Produktmodellierung in CAD-Umgebungen gebunden. In diesem Zusammenhang behandelt die Dissertation eine detaillierte Analyse von gängigen Konstruktionsmethoden und deren Weiterentwicklung mit Hilfe von wissensbasierten und automatisierbaren Ansätzen und dessen Kombination. Besonderen Wert wird dabei auf das agile Zusammenspiel von Entwurf, erforderlicher Detaillierung und funktionaler Absicherung gelegt, wobei im Sinne des Simultaneous Engineering Aspekte der funktionalen Gesamtfahrzeugsimulation und Produktion berücksichtigt werden. Der Einsatz der entwickelten Methoden und Werkzeuge führt zu optimierten Entwicklungsprozessen, wobei eine disziplinübergreifende Effizienzsteigerung angestrebt wird. Die Anzahl und Dauer von nicht wertschöpfender Tätigkeiten werden durch die implementierten Ansätze reduziert und der Anteil der technischen Lösungsgestaltung erhöht.

## **Abstract**

The main focus of the scientific work is the advancement of automotive engineering processes through new approaches, methods and strategies. Major challenges in this field are the integration of altering and partially contrary requirements. The integration of new technologies, increased number of variants and configuration lines, as well as legislative conditions are just some prime examples which trigger these challenges. All of these must be considered within a defined time, quality and cost target. Automotive engineering processes are strongly related to initial product design in CAD-systems. Based on these constraints, the thesis discusses currently used design methods and possible advancements by knowledge-based methods, automation and a complementary combination. A central aspect of this being an agile interaction between the initial product design, required rate of detail and its functional validation. A functional, complete vehicle simulation and production-related issues that could occur are mainly considered regarding different disciplines in simultaneous engineering processes. The implementation and use of the methods specified should lead to an optimized development process, whereby a multi-discipline increase in efficiency is the key point of interest. The amount and duration of work tasks that do not add any functional benefit are reduced, leading to a raised opportunity for functional optimization.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Trends in der Fahrzeugentwicklung . . . . .	1
1.1.1	Ökologisierung des Individualverkehrs . . . . .	2
1.1.2	Steigerung der Fahrzeugsicherheit . . . . .	5
1.1.3	Individualisierung des Automobils . . . . .	6
1.1.4	Verkürzung der Entwicklungszeit . . . . .	7
1.1.5	Erhöhung der Produktqualität . . . . .	8
1.2	Relevanz der Trends für die vorliegende Arbeit . . . . .	9
1.3	Ziele der vorliegenden Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Produktentwicklung</b>	<b>11</b>
2.1	Der Produktentwicklungsprozess . . . . .	11
2.1.1	Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung . . . . .	12
2.1.2	Beeinflussungsmöglichkeiten des Entwicklungsprozesses . . . . .	16
2.2	Der automobiler Produktentstehungsprozess . . . . .	21
2.2.1	Charakteristika des automobilen Entwicklungsprozesses . . . . .	21
2.2.2	Die Evolution zur rechnergestützten Produktauslegung . . . . .	26
2.3	Die Strukturentwicklung im Rahmen der Gesamtfahrzeugentwicklung . . . . .	30
2.3.1	Anforderungen in der Strukturentwicklung . . . . .	30
2.3.2	Die konzeptionelle Strukturentwicklung als Anwendungsbeispiel der vorliegenden Methodenentwicklung . . . . .	37
2.3.3	Herausforderungen der konzeptionellen Strukturentwicklung . . . . .	38
2.4	Die Bauteilgestaltung in der Produktentstehung . . . . .	48
2.4.1	Tätigkeiten im Rahmen der Produktmodellierung . . . . .	48
2.4.2	Angewandte Konstruktionsmethoden . . . . .	53
2.4.3	Modellierungsmethoden in der Konzeptauslegung . . . . .	59

<b>3 Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden in der Produktentwicklung</b>	<b>69</b>
3.1 Konstruktionsmethodik . . . . .	71
3.1.1 Konstruktionsfunktionen und Parametrik . . . . .	71
3.1.2 Wissensbasierte Erstellung von Konstruktionsmodellen . . . . .	94
3.2 Automatisiertes CAD - Programmgestützte Methoden . . . . .	111
3.2.1 Deskriptive skriptbasierte Methoden . . . . .	114
3.2.2 Ablaufgesteuerte generative Methoden . . . . .	121
3.2.3 Kriteriengesteuerte generative Methoden . . . . .	127
3.2.4 Fortführender Ansatz einer Multi-CAD-Automation . . . . .	139
3.3 Rahmenkonzept zur Gestaltung von wissensbasierten CAD-Methoden . . .	140
3.3.1 Spezifikation von wissensbasierten Methoden . . . . .	141
3.3.2 Methodenentwicklung und Auswahl geeigneter Ansätze . . . . .	143
3.3.3 Implementierung von wissensbasierten Lösungen . . . . .	151
3.3.4 Anwendungsbeispiel einer Automationsplattform . . . . .	153
3.3.5 Fortführender Ansatz einer skalierbaren Automationsinfrastruktur .	156
<b>4 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
4.1 Zusammenfassung . . . . .	157
4.2 Ausblick zur Weiterentwicklung der wissensbasierten Konzeption . . . . .	159
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Szenario zukünftiger Antriebskonzepte unter der Annahme der spezifischen Kosten von 300 Dollar/KWh für Batteriesysteme [105, S. 220] . . . . .	2
1.2	Die Entwicklung künftiger Strukturkonzepte mit dem Schwerpunkt der Multimaterialbauweise [117, S. 262] . . . . .	4
2.1	Zeitverkürzung des Entwicklungsprozesses durch Parallelisieren im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen [184, S. 34] . . . . .	13
2.2	Validierung und Verifikation in der Produktentwicklung anhand des V-Modells 1997 [14, S. 101] . . . . .	14
2.3	Zusammenhang der Kostenbeeinflussung und -entstehung über dem Entwicklungsprozess [187] . . . . .	16
2.4	Zeitverkürzung des Entwicklungsprozesses durch Vorverlagerung von Entwicklungsumfängen [139] . . . . .	19
2.5	Strukturierter Ablauf eines Reverse-Engineerings aus der Softwareentwicklung [33][S. 226-235] . . . . .	20
2.6	Spannungsfeld der automobilen Produktentwicklung hinsichtlich Anforderungen, verfügbarer Ressourcen, zu erfüllende Fahrzeugfunktionen, Strukturierung in verantwortliche Bereich durch Baugruppen und der Fertigung	21
2.7	Allgemeiner Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie [191] . .	22
2.8	Gegenüberstellung verschiedener OEM-Produktentstehungsprozesse [175, S. 101] . . . . .	25
2.9	Historische Entwicklung von CAD, CAE und Datenmanagement in der Automobilentwicklung [98, S. 30] . . . . .	26
2.10	Anhand simulationsbasierter Methoden kann ein erhöhter Reifegrad in der Funktionsauslegung zu reduzierter Entwicklungszeit beitragen. [159] . . . .	27
2.11	Multidisziplinäres Spannungsfeld in der automobilen Strukturentwicklung .	30
2.12	Schwerpunkte der automobilen Strukturentwicklung im Gesamtfahrzeugentwicklungsprozess und vereinfachte Darstellung von Wechselwirkungen . . .	31
2.13	Zusammenfassung der Arbeitsschritte in der Strukturentwicklung je nach Strukturentwicklungsdisziplin über die Entwicklungsphasen . . . . .	32



2.14	Entwicklungstätigkeiten in der Konzeptphase der Gesamtfahrzeugentwicklung . . . . .	37
2.15	Vergleich des Erstellungsaufwandes der CAD Konstruktionsprogramme CATIA V4 und V5 [91, S. 1081] . . . . .	46
2.16	Aspekte der zielgerechten Konstruktion [130] . . . . .	48
2.17	Erweiterung der Generellen Vorgangsweise beim Entwickeln und Konstruieren nach [183, S. 10] in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [186, S. 9] . . . . .	49
2.18	Methoden in der Konstruktion nach VDI-2209 [184, S. 13] . . . . .	53
2.19	Strukturierung von geometrischen Objekten nach Dimension und Informationsgehalt [7] . . . . .	54
2.20	Erforderliche geometrische Flexibilität und Detaillierungsgrades über dem Zeitfortschritt des Entwicklungsprozesses . . . . .	59
2.21	Vereinfachte Aggregierung von unterschiedlichen Einflussfaktoren im Rahmen nativer Konstruktionsprozesse . . . . .	60
2.22	Nicht assoziative Referenzflächen und -konturen eines detaillierten Modelles einer B-Säule in CATIA V5 . . . . .	61
2.23	Darstellung der hierarchischen Vorgehensweise in der Geometrieerstellung anhand des 'Fast Concept Modeler' (FCM) [155, S. 7] . . . . .	62
2.24	Darstellung des durchgängigen Optimierungsprozesses anhand des 'Fast Concept Modeler' (FCM) [156, S. 18] . . . . .	63
2.25	Geometrieerstellungsprozess anhand SFE CONCEPT [122, S. 16] . . . . .	64
2.26	Prozess der kombinierten Form- und Topologieoptimierung anhand SFE CONCEPT [50, S. 31] . . . . .	65
2.27	Bausteine der integrierten Optimierung anhand des SFE CONCEPT Modelles, FE-Solvers und eines Optimierungswerkzeuges [50, S. 29] . . . . .	66
3.1	Weiterentwicklung der Methoden in der Konstruktion auf Basis der VDI 2209 [184] durch Umfänge des automatisierten CAD und eines gesamtheitlichen Konzeptes für die Gestaltung von wissensbasierten Lösungen im CAD	70
3.2	Einbettung des Anwendungsbeispiels des konzeptionellen Rohbaus in die Konzeptentwicklung . . . . .	76
3.3	Strukturierung des Konzeptmodelles anhand von Steuerungsklassen und der Überführung von Eingabefaktoren und Produktbeschreibung in ein CAD-basiertes Produktmodell . . . . .	77
3.4	Hierarchischer Modellansatz in der Theorie (links) und in Form einer Baumstruktur im 3D-Modell . . . . .	78

3.5	Adaption eines Strukturmodelles anhand eines Referenzskelettes an ein neues Fahrzeugstyling durch Verschiebung von Knotenpunkten. . . . .	79
3.6	Aufbau der Bauteilprinzipschnitte auf Basis des Exterieurskeletts . . . . .	80
3.7	Konzeptstruktur bestehende aus Exteriorskelett, Lastpfaddefinition, Prinzipschnitten und funktionalen Geometrieobjekten . . . . .	83
3.8	Ableitung von funktionalen geometrischen Objekten auf Basis der Prinzipschnitte . . . . .	84
3.9	Finaler Aufbau der Konzeptflächen basierend auf skalierbaren Prinzipschnitten . . . . .	85
3.10	Definition der Flanschkurve anhand von Prinzipschnitten und der Applikation von Schweißpunkten als Verbindungstechnik . . . . .	86
3.11	Variation des Radstandes des parametrisch Konzeptmodelles [126] . . . . .	86
3.12	Skalierung von Querschnitten zur Optimierung von Struktureigenschaften (Skalierung um 10 Prozent) . . . . .	87
3.13	Ablauf zur Verwendung des Konzeptmodelles im Entwicklungsfortschritt .	88
3.14	Visualisierung der Mittelflächen durch einen DMU-Schnitt im Fahrzeugunterboden . . . . .	90
3.15	Vergleich der automatisierter Vernetzung von Strukturkomponenten in Form von Konzeptgeometrie (links) und nativer Geometrie (rechts) . . . . .	91
3.16	Analyse eines Entwicklungsschrittes in Bezug auf Prozessintegration, Eingabe- und Ausgabegrößen sowie der durchzuführenden Arbeitsschritte als Grundlage für die Umsetzung wissensbasierter Modelle . . . . .	94
3.17	Simulationsmodell zur Analyse der Beschleunigung beim Kopfaufprall auf eine Frontklappe in Y0-Ansicht (Quelle: MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG) . . . . .	100
3.18	Grenzkurven abgeleitet von der Abrollung der Körpergröße von Fußgängern an den Fahrzeugaußenflächen . . . . .	101
3.19	Definition von Kopfaufprallpunkten auf einer Frontklappe zur Bewertung des Fußgängerschutzes . . . . .	102
3.20	Vorgeschlagene Steifigkeitsverteilung nach einer numerischen Optimierung mit gegenläufigen Anforderungen zu lokaler und globaler Steifigkeit der Frontklappe (Quelle: MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG) . . . .	102
3.21	Stylingorientiertes Referenzskelett des parametrischen Vorderwagenstrukturmodelles . . . . .	103
3.22	Adaption der Strukturkomponenten im 3D und Ausprägung des Innenblechs durch Änderung von Winkel und Länge eines Profilsegmentes . . . .	103

3.23	Varianten eines Frontklappeninnenblechs, welche aus der wissensbasierten Vorlage abgeleitet wurden . . . . .	104
3.24	Visualisierung der parametrisch assoziativen Strukturbauteilflächen und der Verbindungstechnik . . . . .	104
3.25	Varianten von Vorderwagenstrukturen, welche aus der wissensbasierten Vorlage abgeleitet wurden . . . . .	105
3.26	Vergleich eines detaillierten Strukturmodelles links (rund 800 Flächenoperationen) und vereinfachten Konzeptmodell rechts (95 Flächenoperationen)	106
3.27	Simulationsresultate des vereinfachten Konzeptmodelles (rot, bzw. erhöhte Beschleunigungswert) und des detaillierten Modelles (blau) bezüglich der Kopfbeschleunigung und des HIC-Wertes (links), der Intrusion des Kopfimpaktors (rechts oben) und der Energieaufnahme (rechts unten)[127] . . .	107
3.28	Durchgängige Schleife zur Entwicklung des Fußgängerschutzes . . . . .	108
3.29	Automationsmöglichkeiten am Beispiel des Konstruktionsprogrammes CATIA V5 anhand interner (CAA-CATIA Automation Architecture, CAT-Skript, VBA-Visual Basic for Applications) anhand externer Lösungen (VB-Visual Basic des .NET Frameworks, C++) . . . . .	112
3.30	Beispielhafte Darstellung der Übermittlung von Verbindungstechnik zwischen den verschiedenen CAx-Systeme, beispielsweise CAD und CAE, im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen . . . . .	116
3.31	Prozess der Verbindungstechnikallokation anhand eines deskriptiven prozedurbasierten Programmes . . . . .	117
3.32	Visualisierung von nicht eindeutig zugeordneter Verbindungstechnik . . . .	118
3.33	Flächenaufbau eines Faserverbundbauteils und Randkurven von Lagen in 0° Faserrichtung (durchgängige Linien) und in 90° Faserrichtung (strichlierte Linien) . . . . .	122
3.34	DMU-Schnitt zur Visualisierung einer lokalen Verstärkung im Lagenaufbaus eines Faserverbundbauteils . . . . .	122
3.35	Ableitung eines Lagenzuschnittes einer einzelnen Faserlage . . . . .	123
3.36	Drapierung einer Faserlage anhand von geometrischen Abwicklungsalgorithmen zur Definition der Faserrichtung . . . . .	123
3.37	Vergleich des Vernetzungsergebnisses von lagenunabhängiger Vernetzung (links) und lagenspezifischer Vernetzung (rechts) . . . . .	125
3.38	Messpunkte zur Detektion der Dichtungsdeformation einer allgemeinen Scheibenfläche . . . . .	130
3.39	Zweidimensionale Darstellung der Kräfte- und Momentensituation an der Seitenscheibe . . . . .	131

3.40	Geometrische Eingabegrößen der Seitenscheibenabsenkung und Ableitung der diskreten Positionen der Scheibenfläche $P_i$ und der verschiedenen Randkurven . . . . .	132
3.41	Ableitung der Schraubachse von einer gewählten Achsenrichtung und der Kurve an der B-Säule . . . . .	134
3.42	Erzeugung einer Schraubfläche $S$ anhand der extrapolierten Brüstungskurve $eBR$ und der Schraublinie $SL$ . . . . .	135
3.43	Systematische Variation der Richtung der Schraubachse unter Einbeziehung des ermittelten Bewertungskriteriums $D$ (Visualisierung der Farben: hoher Wert $D$ : rot, geringer Wert: grün) . . . . .	135
3.44	Darstellung der Eingabefläche (Strak) und der ermittelten Geometrien des Algorithmus . . . . .	136
3.45	Automationsschnittstellen unterschiedlicher CAD-Systeme innerhalb einer einheitlichen CAD-Automationsinfrastruktur . . . . .	139
3.46	Exemplarischer Ablauf zur Erstellung von wissensbasierten Lösungen . . .	140
3.47	Einflussgrößen und Wechselwirkungen in der Konzeption von Methoden . .	143
3.48	Interaktion von Automationsmethoden mit der nativen CAD-Umgebung und beispielhaften weiteren Systemen . . . . .	149
3.49	Automatisierte Ableitung von Bauteildatenblättern aus dem CAD-Modell .	150
3.50	Funktionsmodule der Automationsplattform und der Prozess zur Aufbereitung, Verwaltung und Verteilung von wissensbasierten Softwarelösungen und Bibliotheksmodellen . . . . .	154
A.1	Aufbau des FCM Strukturmodelles anhand eines Skeletts, 2D-Schnitte und vereinfachten Flächen . . . . .	A-1
A.2	Vergleich eines Konzeptmodelles in FCM (740 Flächensegmente) zur nativen CATIA V5 Konstruktion (1276 Flächensegmente) . . . . .	A-2
A.3	Darstellung einer nicht absenkbaaren Eingabefläche . . . . .	A-9
A.4	Visualisierung der Flächendifferenz der optimierten Trägerfläche (violett) und Absenkungspositionen (gelb) sowie der nicht absenkbaaren Eingabefläche (türkis) im Raum . . . . .	A-9
A.5	Darstellung des Auslegungsmodelles der Scheibenabsenkung im CAD und der in CATIA V5 integrierte Benutzeroberfläche und Algorithmus für eine Auslegung in der Entwicklungsumgebung . . . . .	A-10
A.6	Programmerweiterung für den konzeptionellen Rohbau . . . . .	A-11
A.7	Werkzeug zur vereinfachten Erstellung von Verbindungstechnik . . . . .	A-13
A.8	Benutzeroberfläche der Flächenzerlegung für Faserverbundbauteile . . . . .	A-14

# Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von nativem CAD und speziellen Konzeptentwicklungswerkzeugen (Anmerkung: SE: Systemebene, BT: Bauteilebene) . . . . .	68
3.1	Verbesserung von nativen CAD-Methoden anhand der entwickelten Methodik im Vergleich zu speziellen Konzeptentwicklungswerkzeugen (Anmerkung: SE: Systemebene, BT: Bauteilebene) in Anlehnung an Tabelle 2.1 . . .	93
3.2	Funktionsniveaus und Klassifikation von Automationsmethoden . . . . .	111
3.3	Vergleich von Zugangspunkten zur Automation im CAD . . . . .	113
3.4	Vergleich von konstruktiven und skriptbasierten Methoden . . . . .	147
A.1	Vor- und Nachteile des Konzeptmodellierungsprogrammes FCM im Vergleich zur nativen Konstruktion in CATIA V5 . . . . .	A-4

# Abkürzungsverzeichnis

Name	Bezeichnung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
3Dxml	3D Extensible Markup Language
AEV	All Electric Vehicle
BIW	Body in White
BOM	Bill of Material
BREP	Boundary Representation
$c_0$	Bedingung eines punktstetigen Geometrieübergangs
$c_1$	Bedingung eines tangenzenstetigen Geometrieübergangs
$c_2$	Bedingung eines krümmungsstetigen Geometrieübergangs
CAA	CATIA Application Architecture
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAQ	Computer Aided Quality
CAS	Computer Aided Styling
CASE	Computer Aided Software Engineering
CATVBA	Visual Basic for Applications for CATIA V5
CAVA	CATIA V5 Automotive Extensions Vehicle Architecture
CAX	Computer Aided Systems
CFD	Continuous Fluid Dynamics
CGR	CATIA Graphic Representation
CNG	Compressed Natural Gas
COP	Carry Over Parts
CSG	Constructive Solide Geometry
CTL	Coal To Liquide
DMU	Digital Mock-Up
DOE	Design of Experiments

FCM	Fast Concept Modeler
FCV	Fuel Cell Vehicle
FEM	Finite Elemente Methode
GCIE	Global Car manufacturer's Information Exchange
GUI	Graphical User Interface
GTL	Gas To Liquide
H2	Molekülbezeichnung Wasserstoff
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
IGES	Initial Graphic Exchange Specification
ISO	International Organization for Standardization
JT	Jupiter Tessellation
KBE	Knowledge Based Engineering
MKS	Mehrkörpersimulation
NRC	Non-Recurring Costs
NVH	Noise Vibration Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PID	Property Identification
PLM	Product Lifecycle Management
PTO	Production Try Out
RTM	Resign Transfer Moulding
SE	Simultaneous Engineering
SFE	Gesellschaft für Strukturanalyse in Forschung und Entwicklung
SOP	Start of Production
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Surface Tessellation Language
TDM	Team Data Management
VB	Visual Basic
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VRML	Virtual Reality Modeling Language
XML	Extensible Markup Language

# Formelverzeichnis

	Seite
Formel 1.1	Berechnung des spezifischen Verbrauches . . . . . 3
Formel 2.1	Berechnung der statischen Torsionssteifigkeit einer Karosserie . . . . . 35
Formel 2.2	Berechnung der statischen Biegesteifigkeit einer Karosserie . . . . . 35
Formel 2.3	Berechnung der Leichtbaugüte einer Karosserie . . . . . 35
Formel 3.1	Berechnung des Head Injury Criteria (HIC) . . . . . 99
Formel 3.2	Gewichteter Summenabstandswert von Eingabefläche und Iterationsfläche 133
Formel 3.3	Gewichteter Summenabstandswert von Kurven und Iterationsfläche . . . . 133
Formel 3.4	Gewichteter Abstandswert einer Radiendifferenz . . . . . 133
Formel 3.5	Gewichteter Abstandswert eines Punktes zur einer Iterationsfläche . . . . . 133
Formel 3.6	Summe aller gewichteten Abstandswerte . . . . . 134



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Trends in der Fahrzeugentwicklung

Die Entwicklung von Automobilen ist ein Prozess, welcher seit über einem Jahrhundert umgesetzt wird [20]. Bei der Einführung des integrierten Antriebes in nicht schienengebundene Fahrzeuge wurde auf Erfahrungen, Werkzeuge und Teile aus dem Wagenbau zurückgegriffen [19]. Die Anforderungen an das Automobil änderten sich Anfang des 20. Jahrhunderts beispielsweise durch die Verwendung in höheren Geschwindigkeitsbereichen, geforderte Fahrzeugsicherheit und durch verbesserten Bedienkomfort sowie Transportfunktionalität.

Aktuelle Herausforderungen an die automobilen Produktentwicklung werden durch globale Trends und die veränderte Erwartungshaltung der Kunden an die Produktfunktionalität bestimmt. Gesetzliche Rahmenbedingungen bezüglich verminderter Emission im Betrieb [86, S. 82] erfordern eine gesteigerte Energieeffizienz des Fahrzeuges als Gesamtsystem. Ein gesteigerter Komfort und Kundennutzen sollen durch Funktionen der Konnektivität des Fahrzeuges mit dem Fahrer als auch der Umwelt [76, S. 124] und durch teil- und hochautomatisiertes Fahren [153] erreicht werden. Durch die Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme [199, S.24] wird zukünftig verstärkt ein Beitrag zu gesteigerter Fahrzeugsicherheit geleistet.

Die für die neue Funktionalitäten erforderlichen Technologien sind im Rahmen des Entwicklungsprozesses einzubeziehen und stehen in Wechselwirkung zur bestehenden Fahrzeuginfrastruktur. Geänderte Produkteigenschaften erfordern oftmals eine Anpassung der eingesetzten Entwicklungsmethoden und Prozesse in den einzelnen Auslegungdisziplinen der Produktentwicklung. Aus diesem Grund wird in der Einleitung kurz auf generelle Aspekte im Spannungsfeld der Gesamtfahrzeugentwicklung eingegangen und nachfolgend die Relevanz für die vorliegende Arbeit im Bereich der Strukturentwicklung diskutiert.

### 1.1.1 Ökologisierung des Individualverkehrs

Der Entwicklungsprozess kann auf ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit ausgerichtet werden [148, S. 18]. Das Ziel besteht in einem reduzierten Einsatz von endlichen Ressourcen im Rahmen des Produktlebenszyklus. Zu betrachten sind hierbei der erforderliche Energieaufwand zur Gewinnung von Rohstoffen, zur Herstellung von Halbzeugen und Bauteilen sowie deren Zusammenbau, im Betrieb bis zum Recycling des Produktes. Zur Erfassung des Energieaufwandes während der Nutzungsdauer ist die Versorgungskette für die Energiebereitstellung, bis zum Energieeinsatz für die Darstellung individueller Mobilität zu erfassen vgl. [11, S. 234]. Diese Aspekte sind in der Produktkonzeption zu berücksichtigen, um den erforderlichen Ressourceneinsatz gesamtheitlich über den Lebenszyklus zu reduzieren. Eine gesamtheitliche Konzeption unter diesen Aspekten wird unter dem Begriff 'Life Cycle Design' zusammengefasst [1, 95].

#### Integration alternativer Antriebskonzepte

Ein initialer Ansatz zur Reduktion von erforderlichen Ressourcen im Gebrauch besteht in der Effizienzsteigerung des Antriebskonzeptes vgl. [193, S. 2]. Eine Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann auch durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe (CNG/GTL) erreicht werden [23, S. L97]. Parallel hierzu kann eine Hybridisierung von Verbrennungskraftmaschinen (ICEV) anhand von Elektromotoren

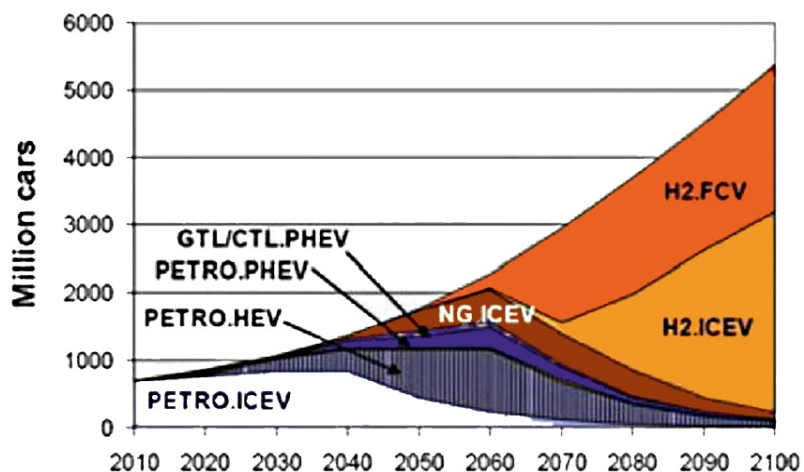


Abbildung 1.1: Szenario zukünftiger Antriebskonzepte unter der Annahme der spezifischen Kosten von 300 Dollar/KWh für Batteriesysteme [105, S. 220]

umgesetzt werden [181, S. 347]. Mittelfristig ist eine Substitution bestehender Antriebskonzepte durch aktuell nicht breitenwirksam eingesetzte Technologien wie Elektroantriebe, gespeist durch Batterien oder Brennstoffzellen, ein Szenario um die Emissionen im Fahrzeugbetrieb zu reduzieren vgl. [105, S. 220]. Für einen Vergleich von konventionellen ICEV-Konzepten und neuen Antriebsarchitekturen (Elektrofahrzeuge, Plug-In Hybridfahrzeuge) ist der Ort der Ressourcengewinnung, Fertigung und Nutzung sowie des Nutzungsverhalten zu betrachten, um die reale CO<sub>2</sub>-Reduktion umzusetzen [27, S. 220].

Die Einbeziehung der Region der Herstellung, Nutzung und Verwertung ist erforderlich um länderspezifische Gegebenheiten zu erfassen, beispielsweise Emissionen für die Stromerzeugung, welche relevant für die Fertig und Verwertung sowie die Nutzung von elektrischen Fahrzeugen sind. Im Rahmen der Strukturentwicklung bedeuten alternative Antriebskonzepte geänderte Anforderungen bezüglich der Integration des Antriebs- und Speicherkonzeptes. Dies betrifft die geometrische Integration und den erforderlichen Bau- raumbedarf, Massenverteilung als auch Aspekte der Fahrzeugsicherheit, wobei die Struktur eine Schutzfunktion erfüllt. Eine gesteigerte Komplexität ergibt sich hierbei bei einer Integration von unterschiedlichen Antriebskonzepten im Rahmen einer Plattformentwick- lung. Im Kontext der vorliegenden Arbeit stellt diese Komplexität und Variantensteuerung einen Aspekt für den Einsatz effizienter Auslegungsmethoden in der Strukturentwicklung dar.

### Leichtbaukonzepte

Die Reduktion der Fahrzeugmasse stellt einen weiteren Beitrag zu Zielen der Ökologisie- rung als auch verbesserter Fahrdynamik dar. Bei instationären Fahrverhalten, wie dem Abfahren eines urbanen Fahrzyklus, ist die Reduktion der Trägheit ein Faktor, welcher translatorisch im Fahrzeuggesamtgewicht (Schwungmassenklasse) und rotatorisch im An- trieb beeinflusst werden kann. In der Betrachtung des spezifischen Streckenverbrauchs  $B_e$  in Formel (1.1) [133] über eine Fahrstrecke  $\int v \cdot dt$  ist erkenntlich, dass der Einfluss der Masse  $m$  mehrfach Eingang findet und von den Fahrbedingungen anhängig ist [149, S. 584ff].

$$B_e = \frac{\int b_e \cdot \frac{1}{\eta_u} (m \cdot f \cdot g \cdot \cos\alpha + \frac{\rho}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 + m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin\alpha + B_r)}{\int v \cdot dt} \quad (1.1)$$

Von der Masse beeinflusste Fahrwiderstände sind hierbei der Rollwiderstand  $m \cdot f \cdot g \cdot \cos\alpha$  der Beschleunigungswiderstand  $m \cdot a$  sowie der Steigungswiderstand  $m \cdot g \cdot \sin\alpha$ . Der Luft- widerstand  $\frac{\rho}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2$  als auch der Bremswiderstand  $B_r$  weisen in dieser Darstellung keine Abhängigkeit zur Fahrzeugmasse auf. Der spezifische Verbrauch des Motors  $b_e$  als auch der Wirkungsgrad des Antriebsstranges  $\frac{1}{\eta_u}$  werden vereinfacht ohne Masseneinfluss ange- nommen. Die Fahrzeugstruktur macht im Allgemeinen einen wesentlichen Gewichtsanteil im Fahrzeug aus und bietet somit erhöhtes Potential zur Reduktion des Fahrzeuggewich- tes vlg. [71, S. 770]. Zur Hebung dieses Potentials kommen verschiedene Strukturkonzepte in Frage, siehe Abbildung 1.2. Herausforderungen für die Integration neuer Materialkon- zepte ergeben sich in der Beherrschung der Struktureigenschaften im Verbund und der angepassten Fertigungsressourcen [82, S. 809ff].

Der Einsatz von Leichtbaukonzepten erfordert angepasste Fügeverfahren, Bauraumverhältnisse und Berechnungsverfahren in der Gesamtfahrzeugentwicklung und kann mit einer Zunahme der Systemkosten einhergehen [136, S. 549]. Verschiedene Multimaterialkonzepte [55, S. 257ff], [154, S. 340ff] zeigen, dass der geeignete Einsatz von Materialsubstitution im Gesamtkontext der Fahrzeugeigenschaften, der Herstellungsprozesse und des Gesamtenergieaufwandes zu bewerten ist. Durch konsequenten Einsatz von Leichtbaulösungen kann eine negative Gewichtsspirale [71, S. 41] ausgelöst werden, welche sich in einer sekundären Gewichtsreduktion von weiteren Bauteilen manifestiert [73, S. 702ff].

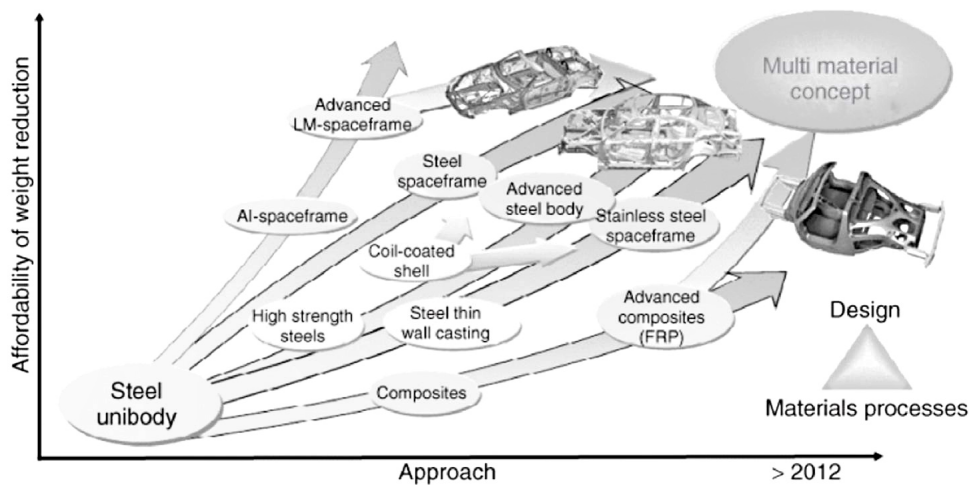


Abbildung 1.2: Die Entwicklung künftiger Strukturkonzepte mit dem Schwerpunkt der Multimaterialbauweise [117, S. 262]

### Aerodynamische Maßnahmen

Bezüglich Überlandfahrt in höheren Geschwindigkeitsbereichen steht die Optimierung der aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges im Fokus. Die notwendige Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes ist proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit [102] auch abzuleiten aus Gleichung 1.1. In vielen Zyklen (NEDC  $\varnothing$ 33,6km/h, FTP75  $\varnothing$ 34,2km/h [15, S. 8]) zur normierten Verbrauchsermittlung spielen höhere Fahrzeuggeschwindigkeiten, und damit verbunden die aerodynamische Effizienz, eine untergeordnete Rolle. Dieser Aspekt wird im Sinne der verbesserten Erfassung des Realbetriebs erst durch zusätzlichen Zyklen (HWFET  $\varnothing$ 77,7km/h, Artemis Highway 150  $\varnothing$ 99,6km/h [15, S. 8] und WLTP  $\varnothing$ 45,3km/h [31, S. 35]) berücksichtigt. Die Maßnahmen zur Optimierung der Exterieurform in der Aerodynamikentwicklung stellen eine Tätigkeit im Spannungsfeld zwischen Design, Kosten, Ergonomie, Thermalmanagement und notwendigem Bauraum in der Strukturentwicklung [25, S. 57] dar. In der vorliegenden Arbeit wird die Stylingfindung, welche sowohl von Strukturentwicklung als auch Optimierung der Aerodynamik beeinflusst wird, als Eingangsparameter einbezogen.

### 1.1.2 Steigerung der Fahrzeugsicherheit

Zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit unterliegen angewendete Prüfroutinen, beispielsweise von Verbraucherorganisationen [67, 34, 104], einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Unter dem Begriff 'Integrale Sicherheit' wird die gesamtheitliche Betrachtung des aktiven und passiven Sicherheitskonzeptes eines Fahrzeuges vor, während und nach einer Kollision verstanden [54, S. 101].

#### Passive Sicherheit

Aktuelle Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit bestehen in der Weiterentwicklung von Testverfahren, wie beispielsweise Kollisionen mit geringer Überdeckung ('Small Overlap' [161]), neue Menschmodelle wie sechs und zehnjährige Kinder [132, S. 14], der Betrachtung der Kompatibilität von Kollisionen unterschiedlicher Fahrzeugklassen [132, S. 14], und die Einbeziehung weiterer Verkehrsteilnehmer, wie einspurige Fahrzeuge [132, S. 15]. Weitere Fragestellungen in der passiven Sicherheit beinhalten die erweiterte Schutzfunktion der Sicherheitszelle aufgrund der Integration neuer Antriebskonzepte und deren Speichersysteme, wie beispielsweise Batteriemodule oder Hochdruckspeicher, welche unter den gegebenen Randbedingungen des Fahrzeugkonzeptes und des verfügbaren Bauraums abzusichern sind. Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies die Einbeziehung neuer Anforderungen, besonders hinsichtlich wissensbasierter Auslegungsmethoden in der Konstruktion.

#### Aktive Sicherheit

Die präventive Verhinderung von Unfällen oder die Verminderung der Auswirkungen eines Unfalls kann durch Systeme der aktiven Sicherheit erreicht werden [58, S. 594ff]. Die Aufnahme von Fahrassistenzsystemen in die Beurteilung der Fahrzeugsicherheit [39], [132, S. 16, 17] spiegelt die Relevanz und den Mehrwert dieser Systeme wider. Aktuell steigt die Durchdringung dieser Systeme in unterschiedlichen Fahrzeugklassen [16, S. 184]. Die zukünftige Herausforderung besteht in der Metrik zur Absicherung des Zusammenspiels unterschiedlicher Systeme in verschiedenen Szenarien [200]. Die Integration von Assistenzsystemen und die Steigerung der passiven Sicherheit führen zu einem erhöhten Fahrzeuggewicht, welches im Widerspruch zu gewünschter Agilität und der Reduktion des Fahrzeugverbrauches steht und eine steigende Gewichtsspirale in Gang setzt. Diese gilt es in anderen Fahrzeugbereichen, beispielsweise durch Leichtbauansätze in der Strukturentwicklung zu kompensieren. Eine Fragestellung stellt auch das mögliche Potential zur Reduktion von Maßnahmen der passiven Sicherheit durch aktive Systeme dar [199, S. 33ff].

### 1.1.3 Individualisierung des Automobils

Neben der Darstellung der Mobilität kann die Wahl des Fortbewegungsmittels eine gesellschaftliche Repräsentationsfunktion erfüllen. Fahrzeughersteller können durch eine für den Kunden transparente Differenzierung das Image und die Geschichte der Marke als Unterscheidungsmerkmal transportieren [151, S. 160].

#### **Interaktive Benutzerschnittstellen**

Die Personalisierung des Fortbewegungsmittels kann anhand von digitalisierten interaktiven Schnittstellen von Fahrzeug und Passagier 'Human-Machine-Interface' (HMI) unterstützt werden [25, S. 591], [94]. Konfigurierbare Fahrzeugeigenschaften als Teil der Individualisierung sind beispielsweise einstellbare Kennlinien von Lenkung, Dämpfer oder des elektronischen Gaspedals [124]. Sicherheitsrelevant sind die Auswirkungen auf das Reaktionsverhalten des Fahrers durch die Beeinflussung des Konzentrationsniveaus bei der Bedienung der Schnittstellen [69]. Die sichere Interaktion von Fahrer und Fahrzeug ist für zukünftige Fahrzeugfunktionen zu erfüllen [68, S. 18], beispielsweise für Fahrerassistenzsysteme, die Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug (Car-to-Car), sowie zu Einrichtungen der Infrastruktur und Informationsnetzwerken (Car-to-X) [76, S.119ff].

#### **Erweiterte Konfigurationsmöglichkeiten der Ausstattung**

Eine Möglichkeit zur Individualisierung bei der Konfiguration eines Fahrzeuges ist die Auswahl verschiedener Ausstattungsmöglichkeiten von Antrieb, Interieur und Exterieur [144]. Unterschiedliche Fahrzeughersteller zeigen, dass der Einsatz dieser Möglichkeiten, abgestimmt auf die Zielkundenschicht, am Markt erfolgreich sein kann [80]. Die Herausforderung für den OEM liegt in der Beherrschung und der Berücksichtigung der Varianten in Entwicklung, Erprobung und Logistik.

#### **Steigende Anzahl von Derivaten auf einer Plattform**

Eine Möglichkeit zur Verbreiterung des Angebotsspektrums ist das verstärkte Anbieten von Derivaten, um Marktnischen abdecken zu können [159]. Es ergibt sich dadurch ein steigender Anteil von unterschiedlichen Fahrzeugen, welche auf Plattformen basieren, wobei die absolute Stückzahl eines Fahrzeugtyps sinken kann. Wirtschaftlich betrachtet wird versucht, existierende Fahrzeugteile anderer Baureihen auf Komponenten-, Modul- und Plattformbasis weiterzuverwenden, um ein konkurrenzfähiges Portfolio am Markt realisieren zu können [2]. Dies betrifft auch die Umfänge der Strukturentwicklung.

### 1.1.4 Verkürzung der Entwicklungszeit

Eine kurz Zeitspanne zwischen Marktbedürfnis und Produktrealisierung, und damit verbunden die Fähigkeit Innovationen zeitnahe am Markt platzieren zu können, gewinnt in einem anspruchsvollen Wettbewerbsumfeld fortlaufend an Bedeutung. Die Zeitspanne, welche für die Produktentwicklung bis zur Vermarktung zur Verfügung steht ('Time to Market'), muss trotz steigender Anzahl an Derivaten, der Produktkomplexität und Varianten stetig geringer werden, um diesen Anspruch zu erfüllen [159, S. 29].

Die Entwicklungszyklen eines Fahrzeuges reduzierten sich von rund 60 Monaten in den 80iger und 90iger-Jahren [90], [157, S. 36] auf 35 Monate nach der Jahrtausend-wende [90]. Der zeitliche Rahmen beinhaltet hierbei Strategieableitung, Zieldefinition, Vorentwicklung, Konzeption, Serienentwicklung, Prototypenerprobung und Produktionsstart. Durch rein virtuelle Serienentwicklung von Derivaten können aktuell Entwicklungszeiten von rund 24 Monaten erreicht werden [10].

Eine verkürzte Entwicklungszeit trägt zur Steigerung der Flexibilität bei, um auf geänderte Marktnachfrage und Rahmenbedingungen, beispielsweise die Emissionsbewertung im Rahmen der Fahrzeugzulassung, reagieren zu können. Lösungsansätze zur Erreichung dieser Ziele sind eine verstärkte funktionale Bewertung und Absicherung ab der Machbarkeitsabschätzung und der Konzeptphase, sowie ein kontinuierliches Risikomanagement. Im Serienprozess tragen verkürzte Modellierungs- und Absicherungsschleifen, sowie verbesserte Methoden und Prozesse zur funktionalen Optimierung von Produkteigenschaften zur Verkürzung der Entwicklungszeit bei.

Ein Ansatz zur Erreichung von kürzeren Entwicklungszeiten stellt die rein virtuelle Fahrzeugentwicklung dar. Durch den Verzicht auf Prototypen können Kosten für prototypische Werkzeuge, den Aufbau von Prototypen und für physische Versuche, sowie der dafür erforderliche Zeitaufwand eingespart werden. Ziel des virtuellen Entwicklungsprozesses ist eine funktionale Beurteilung und Absicherung der wesentlichen Fahrzeugeigenschaften anhand rechnerbasierter Methoden. Detailoptimierungen können nachgelagert mit Versuchsfahrzeugen, welche bereits mit Serienwerkzeugen gefertigt werden, durchgeführt werden. Anhand belastbarer virtueller Absicherungsmethoden in der Produktentwicklung wird eine Verminderung des Änderungsaufwands während der Produktionsanlaufphase ('PTO') angestrebt. Dies trägt zu verringerten Entwicklungszeiten bei, da das Produkt bereits ab früher Phase einen höheren Reifegrad aufweist. Die Beschleunigung bestehender Prozesse zur Absicherungen und eine verbesserte Prognosefähigkeit von Simulationsmodellen sind Möglichkeiten, um den virtuellen Entwicklungsansatz weiter zu verbessern.

### 1.1.5 Erhöhung der Produktqualität

Die Erwartungshaltung des Kunden beinhaltet eine steigende Produktqualität, einhergehend mit einer Weiterentwicklung der Modellgenerationen in Bezug auf Qualitätsanmutung und Funktionserfüllung über die Lebensdauer. Verschärfend bezüglich einer Verbesserung der Produktqualität wirken Erweiterungen des Integrationsumfanges und erhöhte Komplexität durch innovative Technologien [168, S. 404]. Die Durchführung von Testprozeduren von Bauteilen, Modulen und des Gesamtverbundes in allen rechnerisch möglichen Varianten ist kostenintensiv, weshalb in der Praxis auf Prinzipversuche und ausgesuchte Berichtsfahrzeuge zurückgegriffen wird. Die Analyse von Wechselwirkungen und die Absicherung wird in steigendem Maße anhand von computergestützten Maßnahmen bewerkstelligt. Besonders in frühen Phasen der Entwicklung wird versucht den Reifegrad des Konzeptes zu erhöhen, wobei grundlegende Zusammenhänge der Produkteigenschaften zu berücksichtigen sind [168, S. 414]. Aus Prozesssicht ist die Analyse der Produkteigenschaften für bestimmte Disziplinen im Entwicklungsprozess nach testbasierten Vorgehensweisen erst spät im Entwicklungsprozess möglich. Dies führt zu verringerten Möglichkeiten zur Einflussnahme des Produktkonzeptes und Optimierung der Produktfunktion vgl. [168, S. 409]. Computergestützte Methoden sind in der modernen Automobilindustrie eine wichtige Erweiterung der physischen Absicherung und unterstützen die Erreichung von verbesserter Produktqualität, da Zusammenhänge von Systemen frühzeitig erfasst und Auswirkungen von Änderungen bewertet werden können. Eine virtuelle Produktabsicherung, beginnend bei der ersten Machbarkeitsabschätzung ('Feasibility') während der Konzeptentwicklung und weiterführend in der Serienentwicklung und Produktionsplanung, bietet die Möglichkeit zur kontinuierlichen Funktions- und Qualitätsüberprüfung.

Eine vollständige Absicherung der mechanischen und chemischen Einflüsse und deren Wechselwirkungen mit dem Fahrzeug kann beim heutigen Stand der Technik nicht rein virtuell durchgeführt werden. Die Beurteilung anhand rein virtueller Methoden birgt ein Restrisiko, da die Basis der verfügbaren Simulationsprogramme auf abstrahierten Ansätzen und einer modellhaft vereinfachten Abbildung der Realität basiert. Die Weiterentwicklung des aktuellen Methodenumfanges von computergestützten Methoden muss nach wirtschaftlichen Kriterien und dem erzielbaren Mehrwert in der Produktentwicklung bewertet werden. In den Fokus der Entwicklungstätigkeit rücken aktuell die Prognosequalität sowie die Entwicklung von neuen Methoden für die virtuelle Abbildung innovativer technischer Konzepte. Weiterentwickelte Methoden zur Produktauslegung tragen wiederum zu einer verbesserten Produktqualität bei.



## 1.2 Relevanz der Trends für die vorliegende Arbeit

Aktuelle Trends in der Fahrzeugentwicklung zeigen eine stetig steigende Modellvielfalt, Komplexität und einen erhöhten Integrationsaufwand bei gleichzeitig reduzierter Entwicklungszeit und verringerten Kosten. Darüber hinaus sind neue Technologien in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Vor dem Hintergrund von gesteigerter Produktqualität und funktionalen Umfängen, bei gleichzeitig reduziertem Entwicklungsaufwand ist ersichtlich, dass neue Methoden in der Entwicklung erforderlich sind. Die stetig steigenden Anforderungen an das Fahrzeug als technologisches Produkt können nicht nur durch verstärkten Einsatz von personellen und Systemressourcen effizient bewerkstelligt werden. Die Verbesserung und Erweiterung der bestehenden Entwicklungsmethoden und Prozesse stellt eine Möglichkeit dar, um den aktuellen und zukünftigen Entwicklungsanforderungen gerecht werden zu können.

Die Entwicklung komplexer Systeme, wie es Gesamtfahrzeuge sind, bedarf interdisziplinärer Analysen und Syntheseschritte zur Erreichung einer homogenen Lösung, welche die unterschiedlichen, möglicherweise zielkonfliktbehafteten Anforderungen der einzelnen Produktfunktionen integriert. Durch eine übergreifende Sichtweise soll ein Fokus auf gesamtheitliche Verbesserungsvorschläge in der Produktfindungsphase gelegt werden. Eine Herausforderung ist die Trennung der Entwicklungssysteme von Produktmodellierung, Produktionsplanung und Funktionsbewertung, wodurch verteilte Informationsbereiche entstehen. Die Integration von multidisziplinären Modellierungs- und Absicherungsthemen in der Konzeptphase und damit verbunden eine veränderte Prozessdynamik, stellt eine Möglichkeiten zu Verbesserung dar. Eine frühzeitige Analyse, Bewertung und Optimierung kommt besonders bei Neuentwicklungen zum Tragen, welche im Gegensatz zu evolutionär entwickelten Produkten einen geringeren Reifegrad in der Konzeption besitzen.

Um die Einflüsse der Trends für die Bauteilentwicklung beherrschbar zu machen, werden in der vorliegenden Arbeit Methoden zur wissensbasierten und multidisziplinären Konzeptauslegung in der Strukturentwicklung und Stylingabsicherung erarbeitet. Anhand der erarbeiteten Modellierungsmethoden soll die geometrische Integration von neuen Systemen, wie beispielsweise innovative Antriebskonzepte, unter reduzierter Auslegungszeit unterstützt werden. Anhand der Umsetzung von wissensbasierten Methoden soll zudem ein Beitrag zu reduziertem Entwicklungsaufwand bei gesteigertem Reifegrad in der Fahrzeugkonzeption geleistet werden.

### 1.3 Ziele der vorliegenden Arbeit

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Weiterentwicklung der eingesetzten konstruktiven Methoden, besonders in der Gestaltung von initialen Produktmodellen mit erhöhtem Reifegrad. Konkret werden folgende Fragestellungen detailliert behandelt:

- Darstellung bestehender Produktentstehungsprozesse (siehe Kapitel 2)
- Analyse der Grundlagen von Modellierungsmethoden in nativen Konstruktionsumgebungen (siehe Kapitel 2.4)
- Bewertung der Leistungsfähigkeit systematischer Konstruktionsmethoden und deren erweiterter Lösungsraum (siehe Kapitel 3.1.1)
- Erarbeitung von strukturierten Vorgangsweisen zur Konzeption von wissensbasierten Produktmodellen (siehe Kapitel 3.1.2)
- Entwicklung ausgewählter Produktmodelle hinsichtlich der Ankoppelung an interdisziplinäre Auslegungsschritte im Rahmen der integrierten Produktentwicklung (siehe Kapitel 3.1.1, 3.1.2, 3.2.1, 3.2.2)
- Strukturierung von Automationsmethoden in der Konstruktion (Kapitel 3.2)
- Demonstration des funktionalen und prozessorientierten Mehrwerts von Optimierungsmethoden im CAD (siehe Kapitel 3.2.3)
- Erarbeitung von strukturierten Vorgangsweisen für die Konzeption von wissensbasierten Lösungen in der Konstruktion (siehe Kapitel 3.3.2)
- Evaluierung der Stärken und Schwächen von Konstruktions- und Automationsmethoden (siehe Kapitel 3.3.2)
- Empfehlungen zum integralen Zusammenspiel von wissensbasierten Konstruktions- und Automationsmethoden (siehe Kapitel 3.3.2)

Die Leistungsfähigkeit der erarbeiteten Methoden wird im Rahmen der Modellierung von Fahrzeugstrukturen und dem Zusammenspiel mit der Stylingentwicklung demonstriert. Das bearbeitete Spektrum bewegt sich hierbei im Spannungsfeld von funktionalen Anforderungen, der Integration in den Entwicklungsprozess, verfügbarer Entwicklungsinfrastruktur, sowie den methodischen Lösungsansätzen in der Produktmodellierung. Im Kapitel der Produktentwicklung werden Grundlagen der Strukturentwicklung erläutert. Spezifische funktionale Anforderungen werden im Rahmen der detaillierten Bearbeitung der einzelnen Anwendungsbeispiele beschrieben. Die Arbeit zielt, neben der Bewertung und Weiterentwicklung von computergestützten Konstruktions- und Entwicklungsmethoden, auf eine grundsätzliche Betrachtung von wissensbasierten Auslegungsmethoden in der Fahrzeugentwicklung ab.

# Kapitel 2

## Produktentwicklung

### 2.1 Der Produktentwicklungsprozess

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen bezüglich der Inhalte des Produktentstehungsprozesses [32, S. 35]. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition aus der VDI-2221 aufgegriffen, welche die Produktkonzeption, die Serienentwicklung, bis hin zum Produktionshochlauf und die anschließende Serienbetreuung umfasst [186]. Die allgemeine Vorgehensweise in der Produktentwicklung beginnt mit der Produktidee (Vision), welche mit den Zielen der Produktstrategie abgeglichen wird und geht über die Anforderungsdefinition, Darstellung der funktionalen Umfänge und Alleinstellungsmerkmale, die Gestalt bis zur Realisierung in der Herstellung.

In der Projektdefinitionsphase werden auf Basis der Marktpositionierung, der absetzbaren Stückzahl und des erzielbaren Produktpreises wirtschaftliche Rahmenbedingungen abgesteckt. Zur Erreichung von gewünschten Produkteigenschaften können in der Regel mehrere aktuelle und neuartige technische Lösungen und Konzepte in Betracht gezogen werden. Aus den unterschiedlichen Konzeptansätzen werden, basierend auf Untersuchungen und Bewertungen, geeignete Varianten herausgearbeitet. Dies bedeutet eine stete Reduktion der betrachteten Konzepte mit Fortlauf eines Entwicklungsprozesses, bis zur finalen Konzeptentscheidung auf Basis technischer und wirtschaftlicher, sowie ästhetischer Bewertungskriterien. In der Serienentwicklung wird das Konzept weiter detailliert und funktional, sowie in Bezug auf Produktionsprozesse optimiert. Die Serienentwicklung schließt mit dem Produktionsanlauf ab und geht in die Phase der Serienbetreuung über.

Charakteristisch für den Produktentstehungsprozess sind Meilensteine, welche erfolgreich durchlaufen werden müssen, um nachfolgende Entwicklungsschritte auszulösen. Meilensteine bilden eine systematische Synchronisierung des Entwicklungsfortschritts mit definierten Entwicklungsumfängen und zu erreichenden Entwicklungsinhalten.

### 2.1.1 Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung

Zur strukturierten Umsetzung einer Produktentwicklung existieren unterschiedliche Ansätze, welche in industrielle Entwicklungsprozesse Eingang gefunden haben [120, s. 39]. Das Verhältnis der Methoden und Prozesse besteht in einer wechselweisen Abhängigkeit zueinander, wobei verfügbare Entwicklungsmethoden die Bausteine der Prozessabläufe bilden. Auf der anderen Seite können konzipierte Entwicklungsprozesse neue Methoden erfordern. Aus diesem Grund sind im Rahmen der Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden verschiedene Ansätze in der Produktentwicklung zu betrachten.

Zur Verbesserung von Methoden und Prozessen in der Produktentwicklung bildet die Kenntnis der zugrundeliegenden systematischen Vorgehensweisen die Ausgangsbasis. Die Relevanz für die vorliegende Arbeit besteht in der übergeordneten Betrachtung bestehender Entwicklungsprozesse und der Einbettung von Methoden und Werkzeugen in die Entwicklungslandschaft.

#### Simultaneous Engineering

Unter 'Simultaneous Engineering' versteht man das parallele Abarbeiten unterschiedlicher Arbeitsaufgaben im Entwicklungsprozess. Leitsätze des 'Simultaneous Engineering' als gesamtheitlicher Entwicklungsansatz sind Standardisieren, Parallelisieren und Integrieren [30]. Der Begriff 'Concurrent Engineering' beschreibt das vertiefende Aufgliedern und Parallelisieren singulärer Arbeitsschritte. Der Vorteil besteht aus einer möglichen Zeitverkürzung in der Entwicklungsphase im Vergleich zu sequentiellen Arbeitsprozessen. Eine besondere Anforderung stellt der intensive und kontinuierliche Informationsaustausch der einzelnen Teilbereiche dar, um eine konsistente Lösung zu ermöglichen [184]. Nach Abarbeitung der unterschiedlichen SE-Arbeitsbereiche, Analyse, Validierung und spezifische Optimierung, wird eine homogenisierte Lösung der Einzelergebnisse in das zentrale Entwicklungsmodell eingebracht.

Die fünf tragenden Gestaltungsprinzipien eines 'Simultaneous Engineering' Prozesses sind nach Wildemann [198]:

- Vorverlagerung der Erkenntnisprozesse
- Erhöhung des Anteils deterministischer Prozesse
- Parallelisierung von Aktivitäten
- Integration von Aktivitäten
- Beschleunigung von Aktivitäten

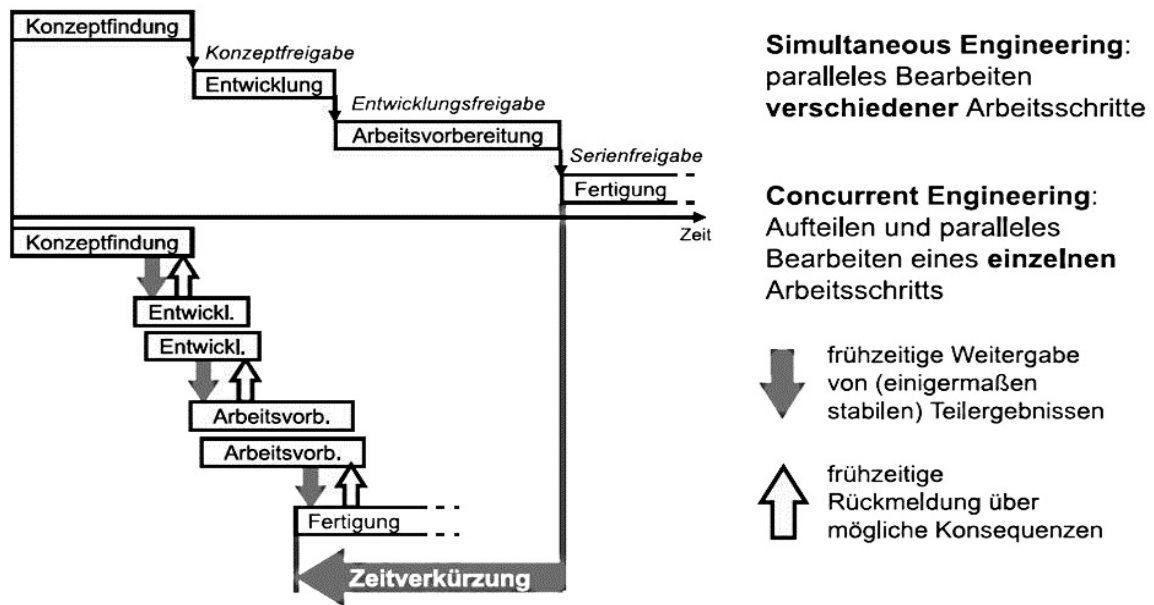


Abbildung 2.1: Zeitverkürzung des Entwicklungsprozesses durch Parallelisieren im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen [184, S. 34]

Im Rahmen eines simultanen Entwicklungsprozesses ist die Übergabe von Modellen über Systemgrenzen ein fester Bestandteil. Eine produktbezogene Verwaltung von Geometrie-, Berechnungs-, Wirtschafts- und Produktionsplanungsdaten in einem zentralen System ist in bestehenden Entwicklungsumgebungen in der Regel nicht durchgängig umgesetzt. Stand der Technik sind verschiedene Bearbeitungs- und Speichersysteme für geometrische Produktdaten, Produktionsplanungsdaten, Wirtschaftsdaten und Datensätze zur funktionalen Bewertung. Eine abgestimmte Datenübergabe im SE-Prozess stellt ein wesentliches Kriterium für durchgängige Prozesse dar [98, S. 366].

Aktuelle Vorgangsweisen in der automobilen Bauteilauslegung bestehen oft in unidirektionaler Weitergabe von Produktmodellen auf Basis der geometrischen Daten, welche in Autorensystemen erstellt werden. Nach durchgeführten Berechnungen und Analysen wird durch Kommunikation auf bilateraler Ebene oder in Projektgruppen, sowie durch Dokumentations- und Präsentationsunterlagen Information an den Bauteilentwickler (Konstrukteur) retourniert und in das Produktmodell eingearbeitet. In seltenen Fällen werden generierte oder adaptierte Produktmodelle aus weiteren Entwicklungssystemen wieder in das Autorensysteme übergeben. Dieser Umstand liegt unter anderem an der eingeschränkten Lesbarkeit von vielfältigen Datenformaten in Autorensystemen und den erforderlichen Konvertierungsprozessen begründet.

**V-Modell**

Das V-Modell stellt ein strukturiertes Vorgehensmodell in der Entwicklung von komplexen Systemen dar. Kern des Arbeitsmodelles ist eine direkte Interaktion von Konzeption und Absicherung. Die erste Darstellung des V-Modells ist in der Softwareentwicklung [21] zu finden und stellt eine Erweiterung der üblichen Wasserfallmodelle dar [152]. Abbildung 2.2 zeigt eine Form des V-Modells, welche allgemein zur Strukturierung von zu entwickelnden Produkten, Methoden und Werkzeugen eingesetzt werden kann. Im V-Modell wird unter der Verifikation und der Validierung unterschieden. Verifikation stellt die Überprüfung der Methode zur Zielerreichung in Bezug zur Spezifikation dar. Unter Validierung versteht man die Eignung des Produktes nach der festgelegten Spezifikation im Einsatzbereich [22]. Produktanforderungen und erforderliche Funktionsüberprüfung können systematisch auf zugehörigen Ebenen strukturiert werden. Beispielsweise können auf Gesamtfahrzeug-, Modul- und Bauteilebene spezifische Analysen und Einflüsse durchgeführt werden und ein direkter Bezug von Funktionsanforderung und Funktionserfüllung auf dem jeweiligen Betrachtungslevel hergestellt werden.

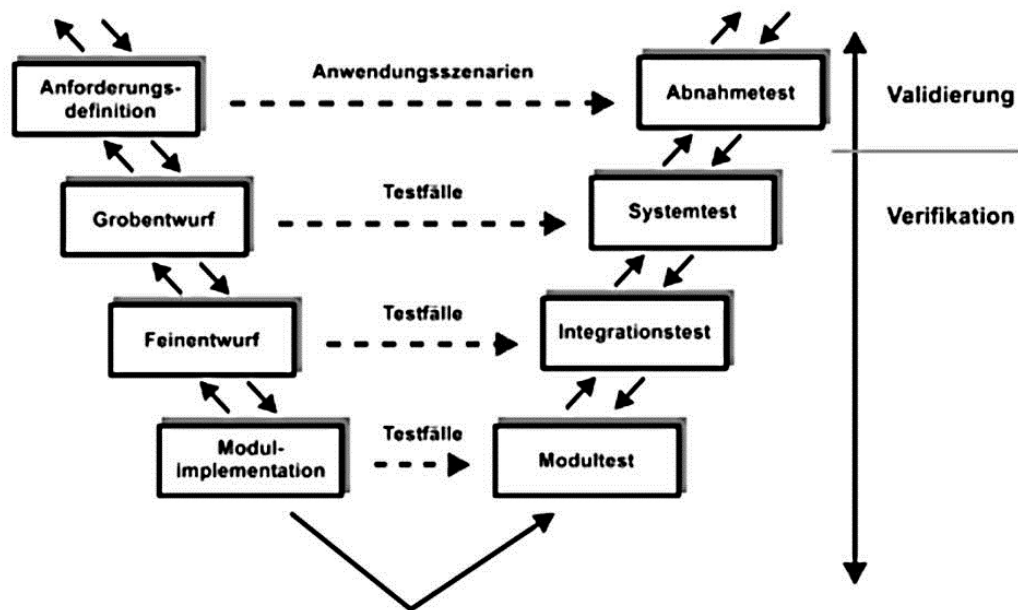


Abbildung 2.2: Validierung und Verifikation in der Produktentwicklung anhand des V-Modells 1997 [14, S. 101]

Auf den Gesamtfahrzeugentwicklungsprozess bezogen kann das V-Modell im Rahmen der Konzeption und Validierung sowohl als globale, als auch als granulare Vorgangsweise eingesetzt werden. Aufgrund steigender Virtualisierung kann der rechte Ast der Validierung als Kombination von simulationsbasierten und physischen Funktionserprobungen verstanden werden.

### **Integrierte Produktentwicklung**

Unter der integrierten Entwicklung ('Integrated Design') wird die Produktentwicklung unter Einbindung verschiedener Disziplinen und Aspekten verstanden [147]. In der integralen Produktbetrachtung ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Funktionsanforderungen und einzelnen Abschnitte des Produktlebenszyklus ein wesentlicher Bestandteil. Die Schwerpunkte der Produktentwicklung sind das Anforderungsmanagement und die Produktspezifikation, der konzeptionelle und detaillierte Entwurf, die Validierung und Analyse. Die Produktumsetzung gliedert sich in die Werkzeugentwicklung und -fertigung, die Produktionsplanung, Bauteilfertigung, Logistik, den Zusammenbau und die Qualitätsüberprüfung. Nach dem Vertrieb stehen der funktionsgerechte Gebrauch, das Service und die Instandhaltung im Fokus. Nach Ende des Gebrauchsnutzens ist die Entsorgung und Wiederverwertung des Produktes zu berücksichtigen. Die integrierte Produktentwicklung kann nach [183, S. 52] übergeordnet durch die drei Axiome der Humanzentrierung, Integration und Interdisziplinarität erweitert werden.

Die Definition der integrierten Produktentwicklung ist in der Literatur nicht eindeutig beschrieben. Unter Designintegrität werden Entwicklungsansätze zur Gestaltung von Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit verstanden [172, S. 5]. Nach Erlenspiel wird unter dem Begriff der integrierten Produktentwicklung eine besondere Zielorientierung in der Produktkonzeption und die Einbeziehung der Randbedingungen von Humanressourcen, wie Leistungsfähigkeit und Kreativität in der Lösungsfindung verstanden [57, S. 312]. Der Ansatz des 'Integrated Design' wird auf technischer Ebene im Sinn der übergreifenden Betrachtung von Modellierungsmethoden und Anforderungen unterschiedlicher Simulationsdisziplinen und Produktionsbewertung angewendet. Eine operative Umsetzung kann durch Vernetzung von Daten, Methoden und Werkzeugen unter dem Aspekt der Systembetrachtung erreicht werden. In der Umsetzung einer Fahrzeugentwicklung kann die integrierte Produktentwicklung die Einbeziehung und Absicherung von vielfältigen Produkteigenschaften, beispielsweise folgende Punkte, umfassen [147]:

- Machbarkeit der Produktion
- Zusammenbau/Zerlegung
- Modulare Konzepte
- Testprozeduren und Umfänge
- Gestaltung von Varianten
- Ökologische Nachhaltigkeit
- Produktwartung
- Ansätze zur Kostenreduktion

## 2.1.2 Beeinflussungsmöglichkeiten des Entwicklungsprozesses

### Kostenfestlegung und Kostenauslösung

Die Darstellung 2.3 der Kostenfestlegung und Kostenbeeinflussung in Abhängigkeit vom Fortschritt des Entwicklungsprozesses zeigt einen erhöhten Spielraum zur Kostenbeeinflussung in einer frühen Phase. Eine Änderung von Produkteigenschaften ist in diesem Entwicklungsstadium mit geringerem Aufwand als in

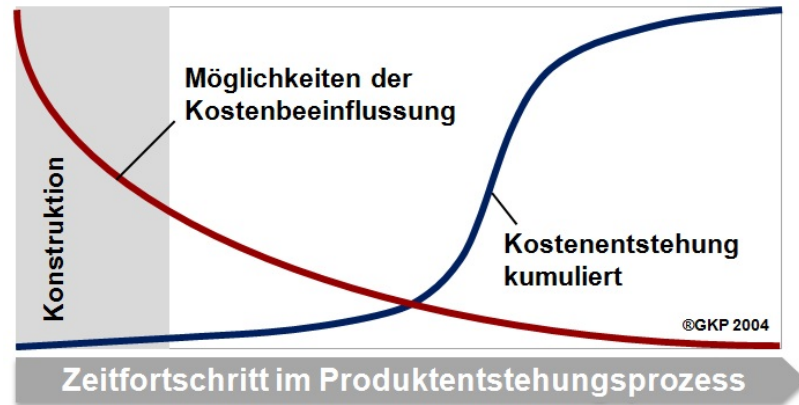


Abbildung 2.3: Zusammenhang der Kostenbeeinflussung und -entstehung über dem Entwicklungsprozess [187]

einer späteren Phase möglich und bietet die Grundlage, Einfluss auf die Produktkosten zu nehmen. Hierzu erforderlich ist die Kenntnis der Produkteigenschaften, welche auf einem schnellen Informationsgewinn in der Konzeption beruhen. Aus dem gezeigten Zusammenhang kann ein Mehrwert erzielt werden, sofern Konzeption, funktionale Bewertung sowie Kostenbewertung und Machbarkeit in einer frühen Entwicklungsphase beurteilt und optimiert werden. Dieser Zusammenhang stellt die Grundlage für das 'Front-Loading'-Konzept dar, welches einen schnellen Erkenntnisgewinn und die Ableitung von Potentialen und Maßnahmen bezüglich Kosten und Funktion in frühester Phase adressiert.

Erlenspiel zeigt die Divergenz von Kostenfestlegung und Kostenentstehung im Entwicklungsprozess in Bezug auf die involvierten Fachbereiche [57]. Neben den funktionalen Anforderungen spielen produktionstechnische Aspekte in der Konzeption eine wesentliche Rolle in der Kostenfestlegung. Der Hauptanteil der Gesamtkosten eines Produktes in der Automobilindustrie geht in der Analyse von Erlenspiel auf entstandene Kosten in der Fertigung und Zulieferung zurück. Darunter fallen Werkzeugkosten, Materialkosten und Prozesskosten, ebenso wie Logistik und Lagerung. Zur frühzeitigen Kostenbeeinflussung sind diese Aspekte im Rahmen der Entwicklung und Konstruktion, besonders in der Konzeptentwicklung zu berücksichtigen. Eine enge Interaktion der verschiedenen Bereiche im Rahmen einer Entwicklung ist von Vorteil, um das vorliegende Wissen übergreifend zu nutzen und ein Optimum in Bezug auf die geforderten Entwicklungsziele zu erreichen.



Die Darstellung der Produktidee, verschiedener Varianten, die Bewertung dessen und die Einbindung von Verbesserungen sind ein integraler Bestandteil der Entwicklungsmethodik im Entwicklungsprozess. Die Erkenntnis von Unzulänglichkeiten, kritischen Bereichen oder bereits gelösten Fragestellungen im Projektfortschritt bezüglich des dargestellten Produktes stellen einen jeweils aktuellen Informationsstand in der Entwicklung dar. Eine frühe Analyse von offenen Fragestellungen ermöglicht einen erweiterten Spielraum für Maßnahmen, um das noch 'weiche' Gesamtkonzept zu optimieren. Ein weiches Konzept bedeutet, dass viele Gesamt- und Teillösungen noch nicht fixiert ('Freeze') sind und Erkenntnisse von Untersuchungen einfacher in die Gesamtlösung eingearbeitet werden können. Die Homogenisierung des Lösungskonzeptes ab der Machbarkeitsabschätzung soll zur Verringerung von notwendigen Entwicklungsschleifen in der Serienentwicklung beitragen.

### **Systematische Gestaltung des Informationsgewinns im Entwicklungsprozess**

Aufgrund der Divergenz von Produkteigenschaften und Reifegrad in der Produktdefinitionsphase und den Zieleigenschaften des fertigen Produktes sind notwendige Entwicklungsschritte und Tätigkeiten abzuleiten. Die Statusbestimmung von Produkteigenschaften bildet die Grundlage zur Determination der notwendigen Entwicklungsschritte für eine zielorientierte Entwicklungstätigkeit. Kernpunkte zur Gestaltung von Tätigkeiten im Entwicklungsprozess bestehen in der Strukturierung der Schritte des Informationsgewinns. Darunter sind die erforderlichen Schritte im Rahmen von Produktdarstellung und -bewertung, sowie die Ableitung von erforderlichen Entwicklungstätigkeiten zu verstehen. Um Auslegungsschritte bezüglich der Notwendigkeit, Nutzen und Umfang zu bewerten, wird nachfolgend vorgeschlagen in zwei Phasen vorzugehen. Im ersten Schritt erfolgt eine Auseinandersetzung mit dem Inhalt und den Eigenschaften von Information im Entwicklungsprozess:

- Notwendiger Zeitpunkt und Reifegrad einer Information
- Änderung des Reifegrades einer Information im Fortlauf des Entwicklungsprozesses
- Auswirkung einer Information auf nachgelagerte Entwicklungstätigkeiten
- Ableitung der Priorität einer Information
- Festlegung des Zeitpunktes zur Informationsermittlung im Entwicklungsprozess

Aus der Bewertung dieser Punkte ergeben sich Schwerpunkte, welche in einem Entwicklungsprozess zu bearbeiten sind. Die konkrete Umsetzung der Arbeitsschritte wird von Produkteigenschaften, der Komplexität des Produktes sowie der verfügbaren Ressourcen zur Entwicklung beeinflusst.

Im zweiten Schritt kann eine prozedurale und methodische Beurteilung zur Ermittlung der Information betrachtet werden. Dies umfasst folgende Punkte:

- Benötigte Eingaben zur Informationsgewinnung
- Umgang mit Prämissen
- Änderungsrate von Eingabeinformation im Entwicklungsprozess
- Methoden und Arbeitsschritte zur Informationsgewinnung
- Methoden zur Speicherung und Weitergabe von Informationen und Daten
- Beurteilung des Aufwandes zur Generierung der Informationen
- Bewertung von alternativen Methoden zur Informationsgewinnung
- Abhängigkeiten zu weiteren Arbeitsschritten

Analysen und Bewertungen zur Generierung von Information sind in der Regel abhängig von zuvor festgelegten oder ermittelten Informationen. Die Änderungsrate dieser Informationen bestimmt einen wesentlichen Teil der Methoden zur Informationsgewinnung. Sofern notwendige Informationen nicht vorliegen, sind geeignete Herangehensweisen zu vereinbaren, beispielsweise durch die Annahme von Prämissen.

Danach sind die einsetzbaren Werkzeuge und Methoden zur Informationsermittlung darzustellen und zu bewerten. Dazu zählen beispielsweise physisch ermittelte Information, sowie auch analytisch und rechnerbasiert ermittelte Ergebnisse. Bei diesem Arbeitspunkt setzt die Methodenentwicklung an, welche die Anforderung der Informationsgewinnung, der vorliegenden Primärinformation und der verfügbaren Infrastruktur in die systematische Lösungskonzeption einbezieht. Die erforderlichen Arbeitsschritte in der Auslegung und verfügbare Entwicklungsmethoden sind zu analysieren und bewerten. Ergebnisse dieser Beurteilung bestehen in der Darstellung des Lösungsansatzes zur Informationsgewinnung, gegebenenfalls dem Vergleich zu alternativen Vorgangsweisen, der Beschreibung der eingesetzten Entwicklungswerkzeuge und Methoden, sowie die Darstellung des erforderlichen Aufwandes. Sofern keine adäquaten Vorgehensweisen zur Umsetzung von Entwicklungsschritten gefunden wurden, sind neue Herangehensweisen, Methoden und Werkzeuge gefragt. Die Gestaltung von neuen Wegen der Lösungsfindung kann auch im Rahmen zur Optimierung von bestehenden Entwicklungsmethoden erforderlich sein, beispielsweise durch Ansätze des 'Front-Loadings'. Die Möglichkeiten erstrecken sich hierbei von Routinen zur Plausibilisierung von Eingabeinformation und der Auslegung von Schnittstellen bezüglich fortlaufend geänderter Eingabeinformation bis zur Umsetzung schlanker Ansätze zur Konzeption. Die Datenhaltung kann bezüglich der Vollständigkeit und Durchgängigkeit in Bezug auf nachgelagerte Entwicklungsschritte geprüft und in einer für den Datenaustausch optimalen Form abgelegt werden. Hieraus ergibt sich ein geringerer Aufwand zur Datenversorgung und Informationsaufbereitung nachfolgender Auslegungsprozesse.

## Front-Loading

Das 'Front-Loading' Prinzip beschreibt eine Vorverlagerung von Aktivitäten, um eine frühzeitige Analyse, Bearbeitung und Beeinflussung von Produkteigenschaften zu erreichen. Der Einsatz des 'Front-Loading'-Ansatzes kann die Entwicklungsgeschwindigkeit erhöhen und durch die Einbindung von weiteren Entwicklungsmethoden und Disziplinen kann die funktionale Reife gesteigert werden. Eine Anforderung an Lösungsmethoden des 'Front-Loadings' besteht in der erforderlichen Auflösung des Detaillierungsgrades, abgeleitet aus der geforderten funktionalen Aussagekraft in der jeweiligen Entwicklungsphase. Ein Mehrwert entsteht, sofern die zu beurteilende Funktionalität entsprechend den Anforderungen des jeweiligen Entwicklungszeitpunktes beurteilt werden kann. Durch den frühzeitigen Informationsgewinn wird eine reduzierte Änderungsrate der nachgelagerten Tätigkeiten im Entwicklungsprozess angestrebt.

Der Nutzen von Methoden und Werkzeugen nach dem 'Front-Loading'-Prinzip wird aus dem Zusammenhang der Kostenbeeinflussung im Entwicklungsprozess abgeleitet, siehe Abbildung 2.4. Die Vorverlagerung von Aktivitäten zur Informationsgewinnung geht oftmals mit der Gestaltung von neuartigen Methoden zur Informationsgenerierung und der Festlegung von zulässigen Prämissen einher. Beispielsweise hängen Bauteileigenschaften und deren Funktionen vom Herstellungsprozess

ab, welcher zumeist erst nach Vorliegen des Bauteilkonzeptes simuliert wird. Die Integration des Prozesseinflusses in die Konzeption ist daher durch neue Auslegungsmethoden oder Gestaltungsrichtlinien zu unterstützen.

Die Anwendung von Werkzeugen nach dem 'Front-Loading'-Ansatz führt nicht zwingend zu einer Erhöhung des Aufwandes, sofern dieser Aspekt in der Konzeption der einzelnen Lösungsansätze berücksichtigt werden kann.

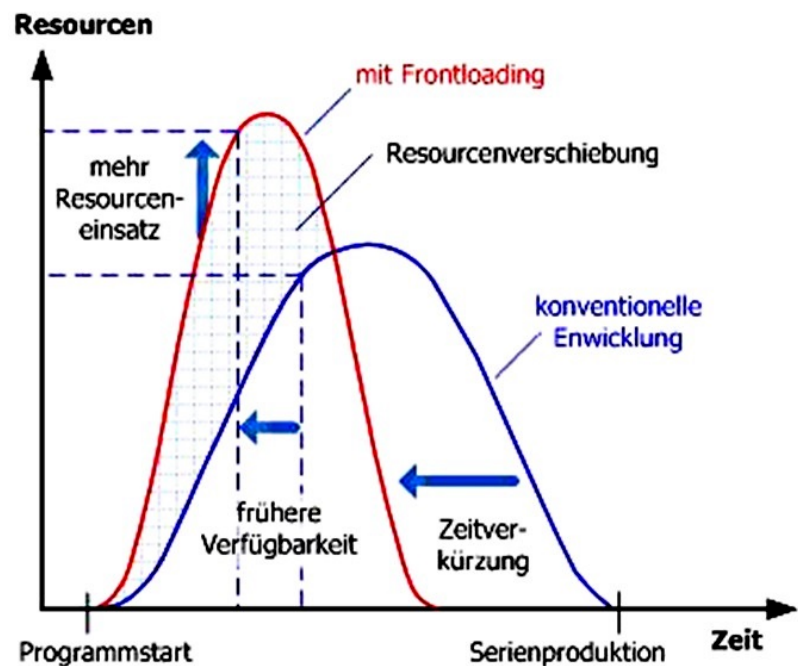


Abbildung 2.4: Zeitverkürzung des Entwicklungsprozesses durch Vorverlagerung von Entwicklungsumfängen [139]

**Reverse Engineering**

Einen Beitrag zur Lösungsfindung stellt die Einbeziehung bestehender Projekterfahrung und Lösungsprinzipien dar. Die Nutzung des impliziten Wissens in bestehenden Produkten stellt eine Möglichkeit dar, in der Entwicklung eines neuen Produktes einen höheren Reifegrad zu erreichen. Die notwendigen Schritte zur Wiederverwendung des bestehenden Wissens bestehen in Wissensakquisition, Wissensrepräsentation, Wissensaufbereitung und Informationsvisualisierung [159, S. 45]. Ein Nutzen ergibt sich, sofern Lösungskonzepte von der Recherche und Analyse technisch erfolgreich auf eine neue Fragestellung angewendet, spezifisch adaptiert oder weiterentwickelt werden können.

Ein strukturierter Ablauf des Reverse-Engineerings ist beispielsweise in der Softwareentwicklung zu finden, siehe Abbildung 2.5. Grundsätzlich ist diese Vorgangsweise auf andere Produktentwicklungsgebiete übertragbar. Kern des Konzeptes besteht in der Analyse und Überführung von Referenzlösungen auf aktuelle Fragestellungen in Bezug auf unterschiedliche Aspekte. Die Basis stellt der Vergleich der Einsatzumgebung ('Implementation') dar, wodurch grundsätzliche Randbedingungen definiert werden. Die vergleichende Tätigkeit wird im allgemeinen Fall jedoch nicht als 're-code' bezeichnet und trifft hier speziell auf die Softwareentwicklung zu. Auf der Ebene des 'Designs' wird das Referenzkonzept durch 're-design' auf die neue Fragestellung übergeführt. Um die Eignung der übernommenen und angepassten Lösung sicherzustellen, sind die initialen Anforderungen auf die adaptierte Spezifikation überzuführen ('re-specify') und die Gültigkeit der Lösung zu prüfen. Übergeordnet kann eine Analyse des Konzeptes in Bezug auf Einbettung in die Infrastruktur und gestellte Anforderungen durchgeführt ('re-think') und mit neuen Ansätzen weiterentwickelt werden.

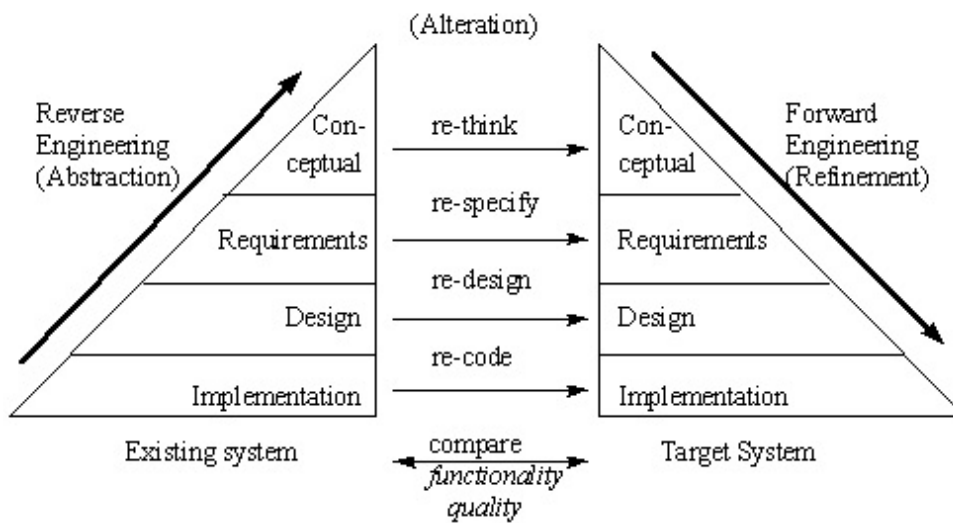


Abbildung 2.5: Strukturierter Ablauf eines Reverse-Engineerings aus der Softwareentwicklung [33][S. 226-235]

## 2.2 Der automobile Produktentstehungsprozess

### 2.2.1 Charakteristika des automobilen Entwicklungsprozesses

Der moderne PKW ist als komplexes System zu betrachten, da vielfältige Anforderungen in Bezug auf funktionale Umfänge und dessen Absicherung berücksichtigt werden müssen. Bei der Komplexität aktueller Fahrzeuge ist es de facto nicht möglich, bereits bei Entwicklungsbeginn eine allen Anforderungen entsprechende Gesamtlösung darzustellen. Die Fahrzeugfunktionen werden durch eine Vielzahl von Bauteilen dargestellt, welche in ihrer Gesamtheit zu konzipieren sind, wobei technische, ästhetische sowie wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen sind.

Ein Überblick des Spannungsfeldes der Entwicklungsdisziplinen, projektbezogenen und gesetzlichen Vorgaben und Projektsteuerung in der Gesamtfahrzeugentwicklung ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Jede der Teilentwicklungsdisziplinen wird durch spezifische Ziele getrieben, welche im übergeordneten Entwicklungsprozess eingebracht und abgestimmt werden müssen.

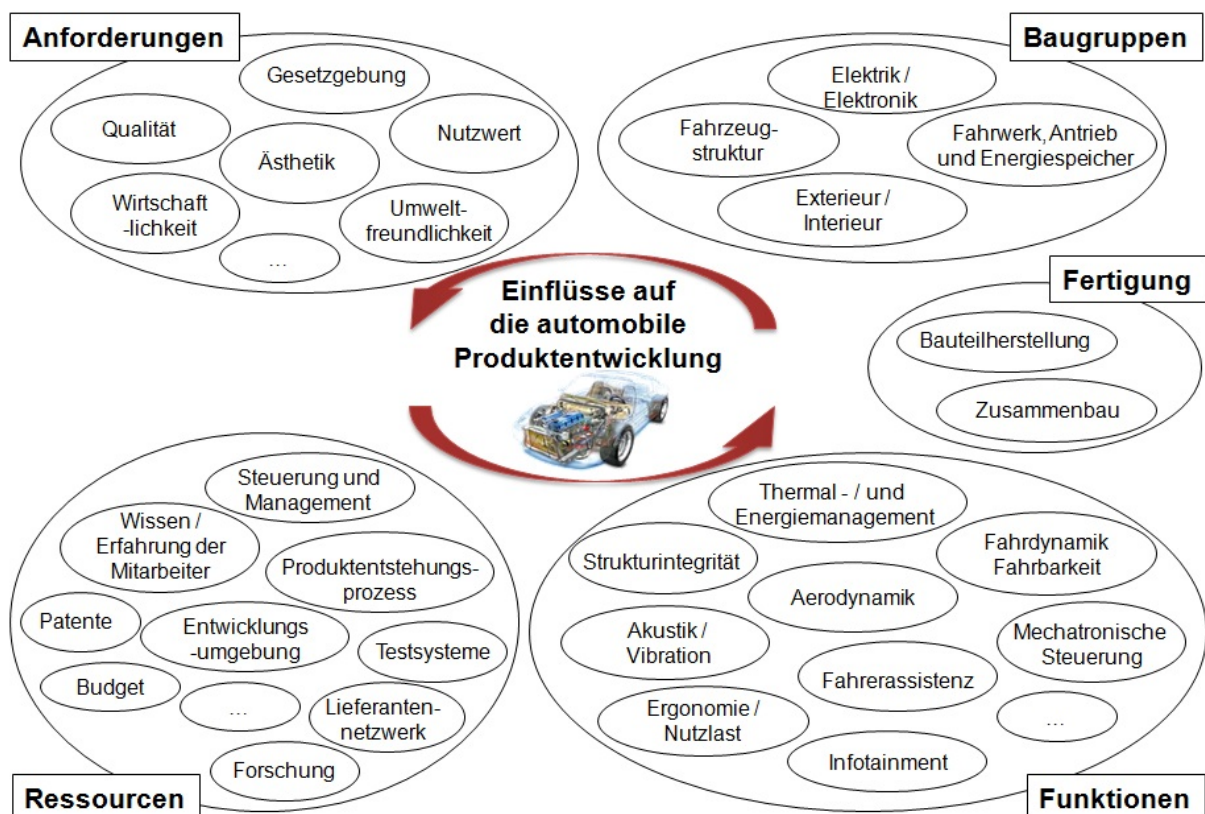


Abbildung 2.6: Spannungsfeld der automobilen Produktentwicklung hinsichtlich Anforderungen, verfügbarer Ressourcen, zu erfüllende Fahrzeugfunktionen, Strukturierung in verantwortliche Bereich durch Baugruppen und der Fertigung

Das Spannungsfeld der unterschiedlichen Funktionsanforderungen und Auslegungsschritte ist im Rahmen des Produktentstehungsprozesses in einen strukturierten Ablauf überzuführen, welcher die Spezifika einzelner Auslegungsschritte als auch Wechselwirkungen der Disziplinen berücksichtigt. Entwicklungsprozesse verknüpfen Entwicklungsziele, Ressourcen, Methoden und Produktfunktionen in einer strukturierten zeitlichen Abfolge. Bestehende Produktentstehungsprozesse implizieren Erfahrung und Wissen aus durchgeführten Projekten und unterstützen eine effiziente und zielgerichtete Arbeitsweise.

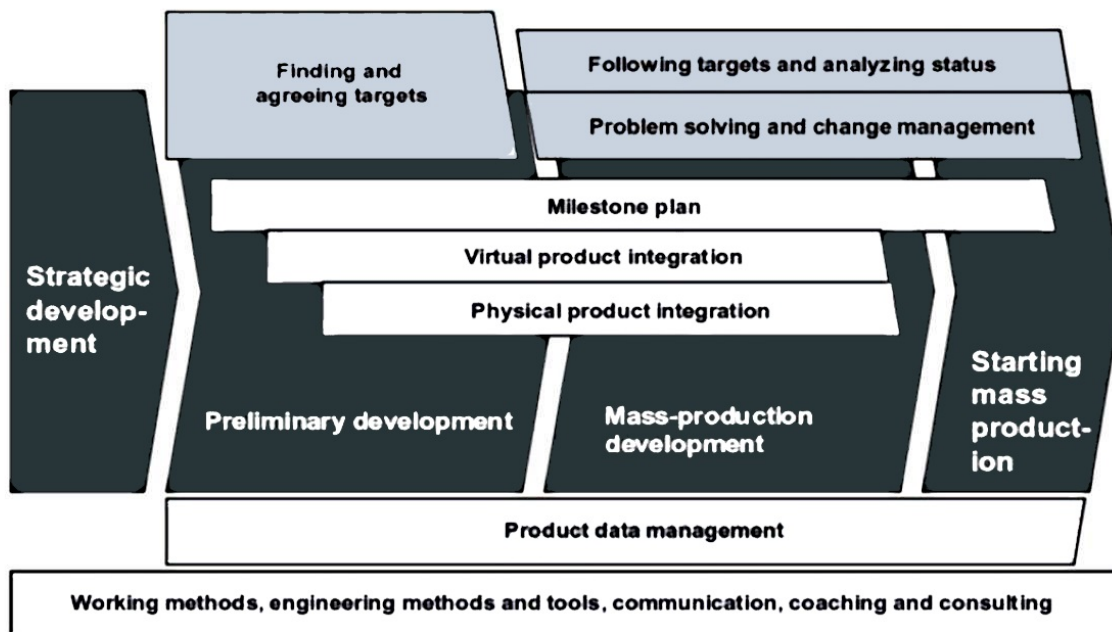


Abbildung 2.7: Allgemeiner Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie [191]

Der eigentlichen Produktentwicklungstätigkeit vorgelagert sind in der Regel Markt- und Potentialanalysen, die Strategiedefinition des Unternehmens und wirtschaftliche Abwägungen ('Strategic Development' siehe Abbildung 2.7). Einflüsse auf die Produktdefinition stellen herstellereigene Entwicklungsphilosophien und Designmerkmale, verfügbare Plattformen und Produktionskapazitäten dar. Parallel werden neue Technologien in der internen Forschung und mit externen Partnern erarbeitet und veröffentlichte Technologien evaluiert. Auf Basis von Kosten, Marktanforderungen, gesetzlichen Rahmenbedingungen, strategischer Ausrichtung des Unternehmens und Reifegrad von Technologien werden Entwicklungsziele und Technologien für die Konzept- und Vorentwicklung eines Fahrzeuges definiert.

Die Forschung stellt hierbei die technische Machbarkeit eines technologischen Konzeptes in den Vordergrund, die Fahrzeugentwicklung die Integration von konzeptionell entwickelten Lösungen in konkrete Produkte. Allgemeine Kernpunkte einer konzeptionellen Produktentwicklung ('Preliminary Development' siehe Abbildung 2.7) bestehen in der Konzipierung einer Produktidee unter Einbeziehung von funktionalen, ästhetischen und herstellungsbedingten Aspekten. Grundsätzliche Kernpunkte der Konzeptentwicklung beschäftigen sich mit den Haupteinflussfaktoren bezüglich der Machbarkeit und der Erarbeitung des funktionalen und wirtschaftlichen Handlungsspielraumes. Die Konzeptphase stellt das Bindeglied zwischen visionären Produktideen und der funktionalen Darstellung im Gesamtsystem dar. In der Konzeptphase einer Produktentwicklung sind viele Produkteigenschaften nicht bekannt, beziehungsweise nicht festgelegt.

Um Informationen zu gewinnen und Eigenschaften abzusichern, werden im Entwicklungsprozess geometrische, physikalische, elektrische und chemische Eigenschaften eines Systems virtuell modelliert, simuliert und abgesichert. Die Erarbeitung von Produkteigenschaften kann anhand konzeptioneller, mathematischer, numerischer und experimenteller Modelle erfolgen [138, S. 547].

Auf Basis von Konzeptbestätigung und Zielvereinbarung startet der Serienentwicklungsprozess zur detaillierten funktionalen und fertigungsgerechten Entwicklung ('Mass Production Development' siehe Abbildung 2.7). Diese umfasst die Integration von Lieferanten sowie den Aufbau von Logistik- und Produktionsplanung. Das Produkt wird mit einem höheren Reifegrad funktional analysiert und bestätigt, sowie in Bezug auf Kosten und Prozesssicherheit optimiert. Ein wichtiger Meilenstein in der Serienentwicklung ist die Beschaffungsfreigabe, welche durch die Bestellung der erforderlichen Werkzeuge einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten auslöst.

Anhand von prototypischen Fahrzeugen können Fahrzeugeigenschaften noch vor Aufbau der Serienfertigung überprüft werden. Die ersten Fahrzeuge von der Serienlinie werden im Rahmen von Produktionsleistungstests und durch Vorserienfahrzeuge hergestellt ('Starting Mass Production' siehe Abbildung 2.7). Der Meilenstein SOP ('Start of Production') ist Ausgangspunkt zur Terminierung des gesamten Entwicklungsprozesses und definiert den Zeitpunkt des Produktionshochlaufes unter Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen des Serienprozesses. Nach dem Serienanlauf findet in der Regel eine Produktpflege und Kostenoptimierung im Rahmen der Serienbetreuung statt.

Übergeordnete Managementprozesse in der Gesamtfahrzeugentwicklung bestehen im Zielmanagement, Konzeptproblemmanagement, Änderungs- und Freigabemanagement und im durchgängigen Qualitätsmanagement [195, S. 79ff]. Das Zielmanagement beinhaltet die Erfassung und Überwachung der Gesamtfahrzeugziele bis zur Zielübereinkunft und Unterzeichnung ('Target Agreement'). Durch das Konzeptproblemmanagement werden bestehende und entstehende ungelöste Fragestellungen systematisch bearbeitet und Lösungen geschaffen. Änderungen in der Produktentwicklung werden durchgängig im Änderungsmanagement dokumentiert und freigegeben.

Die Synchronisierung des Entwicklungsfortschritts findet anhand von definierten Projektmeilensteinen statt. Grundlegende Meilensteine in der Gesamtfahrzeugentwicklung sind die Abschlüsse folgender Phasen [143, S. 8ff]:

- Strategiephase: Produktvision ('Product Vision')
- Machbarkeitsphase: Rahmenheft ('Preliminary Program Specification')
- Konzeptphase: Zielvereinbarung ('Target Agreement')
- Evaluierungsphase Serienkonzept: Konzeptbestätigung ('Concept Confirmation')
- Entwicklungsphase: Funktionsbestätigung ('Functional Confirmation')
- Serienvorbereitung: Produktionsanlauf ('Production Try Out')
- Vorserienhochlauf: Vorserie ('Pilot Production')
- Hochlauf unter Serienbedingungen: Leistungstest ('Launch Sign-off')
- Erstes Endkundenfahrzeug: Produktionsserienanlauf ('Start of Production' SOP)
- Produktionshochlaufphase: Prozesssicherheit ('Process Sign-off')

Zwischen den Hauptmeilensteinen existieren Submeilensteine, welche nicht im Rahmen eines Steuerkreises durchlaufen werden müssen. Untergeordnete Meilensteine sind beispielsweise [143, S. 18ff]:

- Planungsfreigabe ('Planning Release')
- Bedingte Investitionsfreigabe ('Conditional Investment Release')
- Beschaffungsfreigabe ('Production Release')
- Änderungsstopp ('Preliminary Engineering Completion')

In der automobilen Produktentwicklung bestehen, abhängig vom Unternehmen, unterschiedlich ausgeprägte Entwicklungsprozesse. Abbildung 2.8 zeigt unterschiedliche Ausprägungen und Begrifflichkeiten des Gesamtfahrzeugentwicklungsprozesses, aufgegliedert nach beispielhaft ausgewählten Automobilherstellern. Die Benennung der einzelnen Phasen und der Entwicklungsprozessstruktur ist durch die jeweilige Herstellerphilosophie und oft auch historisch geprägt. Die technischen Inhalte der einzelnen Phasen zeigen unabhängig von der Benennung starke Parallelen.



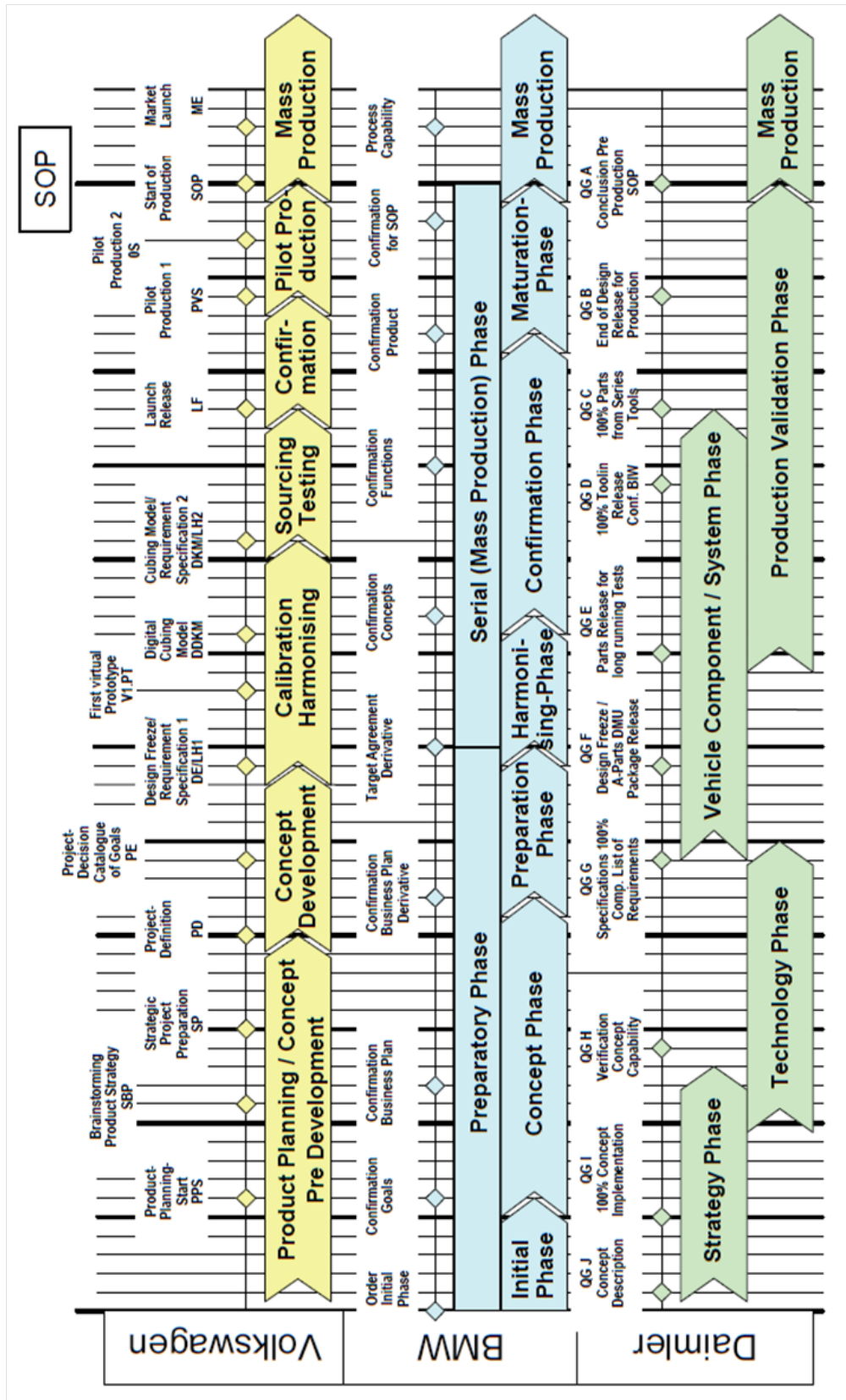


Abbildung 2.8: Gegenüberstellung verschiedener OEM-Produktentstehungsprozesse [175, S. 101]

## 2.2.2 Die Evolution zur rechnergestützten Produktauslegung

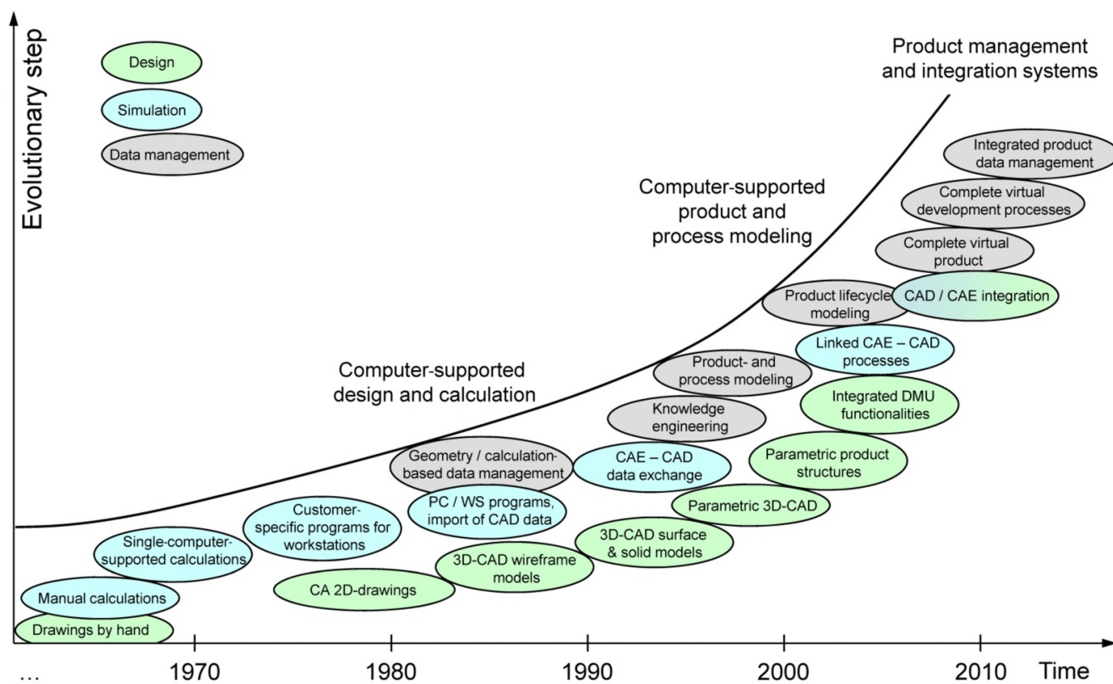


Abbildung 2.9: Historische Entwicklung von CAD, CAE und Datenmanagement in der Automobilentwicklung [98, S. 30]

Methodisch entwickelten sich Vorgangsweisen von einer werkstatorientierten Konstruktion um 1850, zu einer normenorientierten Konstruktion um 1900. Die methodische Konstruktion um 1950 bildet die Basis des heutigen rechnergestützten Produktmodells und der Methoden der virtuellen Produktentwicklung [170].

In den Anfängen der Fahrzeugentwicklung, um die Jahrhundertwende zwischen 19. und 20. Jahrhundert, wurden einfache Konzepte in der automobilen Entwicklung gestaltet. Diese orientierten sich zu Beginn an den Konzepten und der verfügbaren Infrastruktur im Wagenbau. Die Entwicklung erfolgte durch Ingenieursverstand und Berechnungen am Reißbrett [196, S. 2-4]. Die Anwendung konkreter analytischer Methoden war im Wesentlichen auf Festigkeitsberechnung einzelner Komponenten beschränkt. Prototypen wurden im Fahrversuch erprobt und Schwachstellen der Auslegung nachgebessert [145].

Die Durchführung mehrerer Entwicklungsschritte konnte damals durchaus von einzelnen Ingenieuren in Personalunion vorgenommen werden. Durch die integrale Bearbeitung von Arbeitspaketen, unter Einbeziehung verschiedener Anforderungen, ergab sich ein Systemverständnis. Seit der Entwicklung der motorisierten Kutsche steigen die Anforderungen, die Entwicklungskomplexität und die Funktionalität von autonom angetriebenen Fahrzeugen stetig an, sodass eine Entwicklung anhand weniger Experten, welche unterschiedliche Aufgaben übernehmen, nicht mehr machbar ist.

Heute hat der Entwickler eine steigende Komplexität der Gesamtfahrzeugziele, wie zum Beispiel Strukturintegrität, Komfort, Fahrdynamik, Umweltverträglichkeit, geometrischer Integration und Ergonomie [24, S. 92] zu bewältigen. Aufgrund dieser Komplexität ist es nicht möglich, unterschiedliche Anforderungen in Personalunion in Produktlösungen umzusetzen. Die Arbeit verlagerte sich von gesamtheitlicher Entwicklung zu einer teamorientierten Arbeitsweise durch Spezialisten. Vorteile einer integralen Produktbetrachtung gehen durch die Trennung verschiedener Teilbereiche verloren und das Produktdesign kann durch die Verhandlungsmacht von Bereichen beeinflusst werden. Dies erfordert Ansätze für interdisziplinäre Rahmenkonzepte und Entwicklungsarchitekturen [36, S. 6].

Der Einsatz von rechnerbasierten Entwicklungsmethoden stellt eine Möglichkeit zur Kosten- und Zeitreduktion dar und erfährt eine stetige Intensivierung im Entwicklungsprozess [106, S. 35ff]. Grundlage der CAE-basierten Entwicklung ist die computergestützte Modellierung von geometrischen und physikalischen Eigenschaften. Die Voraussetzung für eine belastbare simulationsbasierte Auslegung besteht in der korrekten Beschreibung der realen Produkt-eigenschaften. Für bekannte Entwicklungstechnologien kann anhand validierter Simulationsmethoden die Anzahl physischer Tests und der Einsatz von Prototypen reduziert werden [10]. Durch den Verzicht auf Prototypen und deren Werkzeuge entfallen Vorlaufzeiten zur Werkzeugerstellung. Im Entwicklungsprozess ist die gesteigerte Produktreife durch eine Vorverlagerung des Erkenntnisgewinnes und eine Reduktion der Entwicklungszeit bemerkbar, siehe Abbildung 2.10.

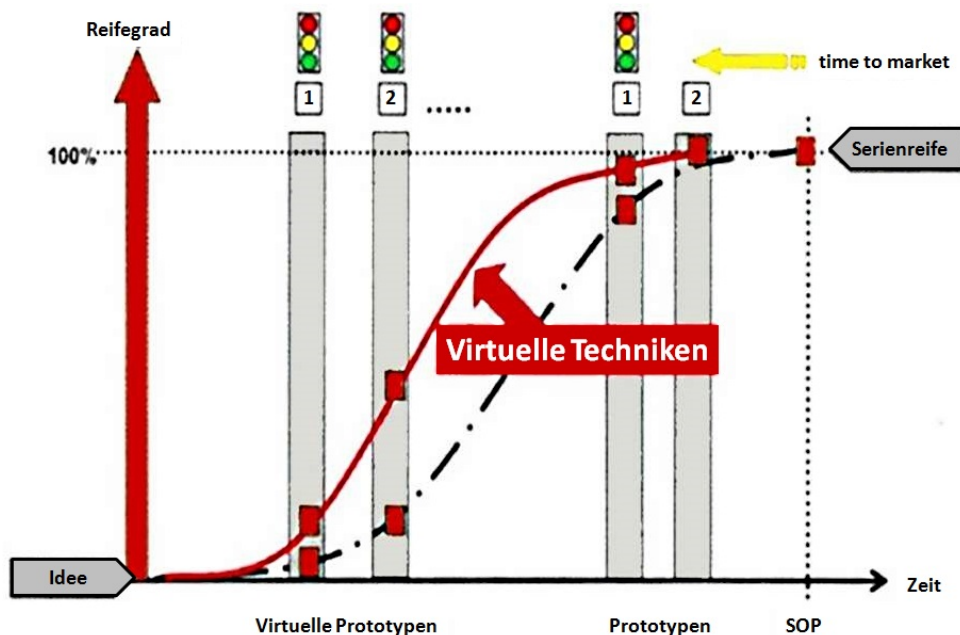


Abbildung 2.10: Anhand simulationsbasierter Methoden kann ein erhöhter Reifegrad in der Funktionsauslegung zu reduzierter Entwicklungszeit beitragen. [159]

Im Vergleich zur physischen Produktdarstellung entfallen durch virtuelle Methoden Laufzeiten zur Fertigung der Prototypenwerkzeuge und der prototypischen Bauteile. Anhand der rechnergestützten Beschreibung der Produkteigenschaften können eingebrachte Änderungen in der Entwicklung direkt bewertet werden ohne auf geänderte Bauteile warten zu müssen. Eine Reduktion von Prototypenaufbauten kann beginnend beim Gesamtfahrzeug bis hin zu System-, Modul- und Baueilebenen erfolgen. Bei Prototypen können Abweichungen in Bezug auf eingesetzte Werkstoffe und Werkzeuge im Vergleich zur Serienlösung auftreten. Diese Abweichungen entstehen aufgrund von Kosten, Qualitätsanforderungen und der geforderten Herstellungszeit. Die funktionale Bewertung von Prototypen hat diese Abweichungen, als auch den möglicherweise unterschiedlichen Entwicklungsstand bei der Auslösung der Prototypenwerkzeuge, zu berücksichtigen. Durch virtuelle Methoden können Prototypengenerationen ersetzt werden, wobei Unzulänglichkeiten in Bezug auf Bauteilverfügbarkeit, Variantensteuerung reduziert werden und eine verbesserte Vergleichbarkeit von Prototypen und Serienfahrzeugen ermöglicht wird. Die Weiterentwicklung der virtuellen Methoden umfasst eine steigende Anzahl von Modellierungstechniken und eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit von Simulationsmethoden.

Zentrale Aufgaben und Verantwortlichkeiten des Konstrukteurs bestehen heute in der dreidimensionalen virtuellen Darstellung von Bauteilen, der Überprüfung der Datenkonsistenz, der Einarbeitung unterschiedlicher funktionaler Anforderungen, zum Beispiel Gesamtfahrzeugeigenschaften, Produktionsfähigkeit, Fügefolge und Prozesskonformität, Ressourceneinsatz, Bauteilfreigaben und Dokumentation. Der Konstrukteur hat die verschiedenen Sichtweisen funktionaler Anforderungen zu verstehen, zum Teil zu überprüfen und notwendige Änderungen einzuarbeiten. Detaillierte Anforderungen und spezifische Lösungsvorschläge verschiedener Funktionen werden von den funktionsverantwortlichen Fachabteilungen erarbeitet. Eine simulationsbasierte Beurteilung einer Lösung findet in den Fachabteilungen oftmals erst nach Vorliegen eines modellierten Produktvorschlages oder eines definierten Lösungsraumes statt.

Stand der Technik ist die computergestützte dreidimensionale Modellierung eines Konzeptes, wobei die initiale Darstellung einer Idee in der Praxis nach wie vor oftmals am Papier entsteht. Die virtuelle Darstellung der Produktidee wird anhand spezialisierter Modellierungsprogramme (3D-CAD) bewerkstelligt. Im Vergleich zu zuvor eingesetzten 2D-CAD Systemen ergeben sich Vorteile durch die vollständige Produktmodellierung. Die simultane Einbindung von unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen der virtuellen Produktentwicklung auf Basis der Produktdaten in 3D-CAD-Systemen stellt einen Kernaspekt zur Nutzung von Konstruktionssystemen dar.

Die Anbieter von Entwicklungssystemen reagieren auf gesteigerte Anforderungen durch eine Vielfalt von Funktionen und Arbeitsmethoden. Analog steigen die Anforderungen an Nutzer stetig, um diese Systeme zu bedienen. Der Einsatz von 3D-CAD-Systemen in der Automobilindustrie ist integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Das CAD-System stellt die Plattform zur Visualisierung der geometrischen Ausprägung, Deskription der Bauteileigenschaften, sowie Verteilung des Modells an weitere Systeme dar. Die aktuelle Entwicklungskomplexität und die Anforderungen in der Serienentwicklung von modernen Fahrzeugen bedingen, dass keine Alternativen zu einer virtuellen Auslegung, Absicherung und Optimierung mehr bestehen, wie beispielsweise eine durchgehende physikalische Absicherung anhand von Prinzipversuchen.

Zur virtuellen Produktdarstellung existieren weitere Möglichkeiten der Modellierung in unterschiedlichen Systemen (CAD, CAS, MKS, Pre-Processing in FEM-Software), welche unter dem Begriff CAx zusammenfasst sind. CAx beschreibt IT-gestützte Modellierungsmethoden zur virtuellen Produktentwicklung und -bearbeitung [146, S. 354]. Weitere Informationen im Entwicklungsprozess werden in Listen (BOM), Diagrammen, Prozess- und Funktionsschaubildern, sowie Finanzkalkulationswerkzeugen abgelegt. Die Herausforderung liegt in der Abstimmung von spezialisierten Modellen und Dateien, um die geforderte Datenkonsistenz in verschiedenen Systemen zu erreichen, sowie eine homogene technische Lösung darzustellen.

CAD-Systeme sind für die detaillierte Darstellung von Produktmodellen konzipiert und bieten einen breiten Funktionsumfang zur Modellierung und Strukturierung, sowie standardisierte Geometrieschnittstellen. Modellierungsmethoden abseits von CAD-Systemen (z.B. FEM) entstehen aufgrund unterschiedlicher Einflüsse. Die Datenverfügbarkeit von CAD-Modellen ist erst nach Abschluss der Konstruktionsschleife gegeben, was einen späteren Einstieg weiterer Entwicklungsdisziplinen bedingt. Durch eine parallele Modellierung in weiteren Entwicklungswerkzeugen können vorab Modelle, beispielsweise in der Strukturentwicklung oder Mehrkörpersimulation, generiert werden, bevor Daten aus der CAD-Konstruktion zur Verfügung stehen. Die frühzeitige Bewertung von Verbesserungsvorschlägen im weiteren Entwicklungssystem stellt ein Argument für Modellierungsfunktionen in CAx-Anwendungen dar. Zu beachten gilt, dass sich Modelle in unterschiedlichen Systemen auseinanderentwickeln können und diese wieder in einen konsistenten Datenstand überzuführen sind. Dies erfordert eine fortlaufende Abstimmung verschiedener Entwicklungssysteme (CAD, FEM, MKS, CFD, SEA, CAM, CAS... [116, S. 437]) anhand von Schnittstellen und zentraler Datenhaltung über PDM-Systeme [98, S. 366].

## 2.3 Die Strukturentwicklung im Rahmen der Gesamt-fahrzeugentwicklung

### 2.3.1 Anforderungen in der Strukturentwicklung

Als Karosserien bezeichnet man die Aufbauten von Kraftfahrzeugen aller Art [78, S. 147]. Die Karosseriestruktur stellt einen Zusammenbau von einzelnen Komponenten dar, welcher auf Systemebene zu konzipieren ist, um die Anforderungen der Strukturentwicklung zu erfüllen. Die Anforderungen an Fahrzeugkarosserien bestehen aus einer Reihe spezi-fischer Ziele [159, 134, 56, 53], auf welche im Folgenden noch genauer eingegangen wird und die durch folgende Punkte zusammengefasst werden können [25, S. 502]:

- Aufnahme aller Kräfte und Momente
- gestaltfester Innenraum
- periphere Energieumsetzungszonen
- Aufnahme aller Antriebsaggregate und der Achsmodule

Es existieren unterschiedliche Wechselwirkungen der Strukturentwicklung mit weiteren Entwicklungsdisziplinen, welche über den gesamten Entwicklungsprozess in verschiedenen Ausprägungen zu berücksichtigen sind, siehe Abbildung 2.11.

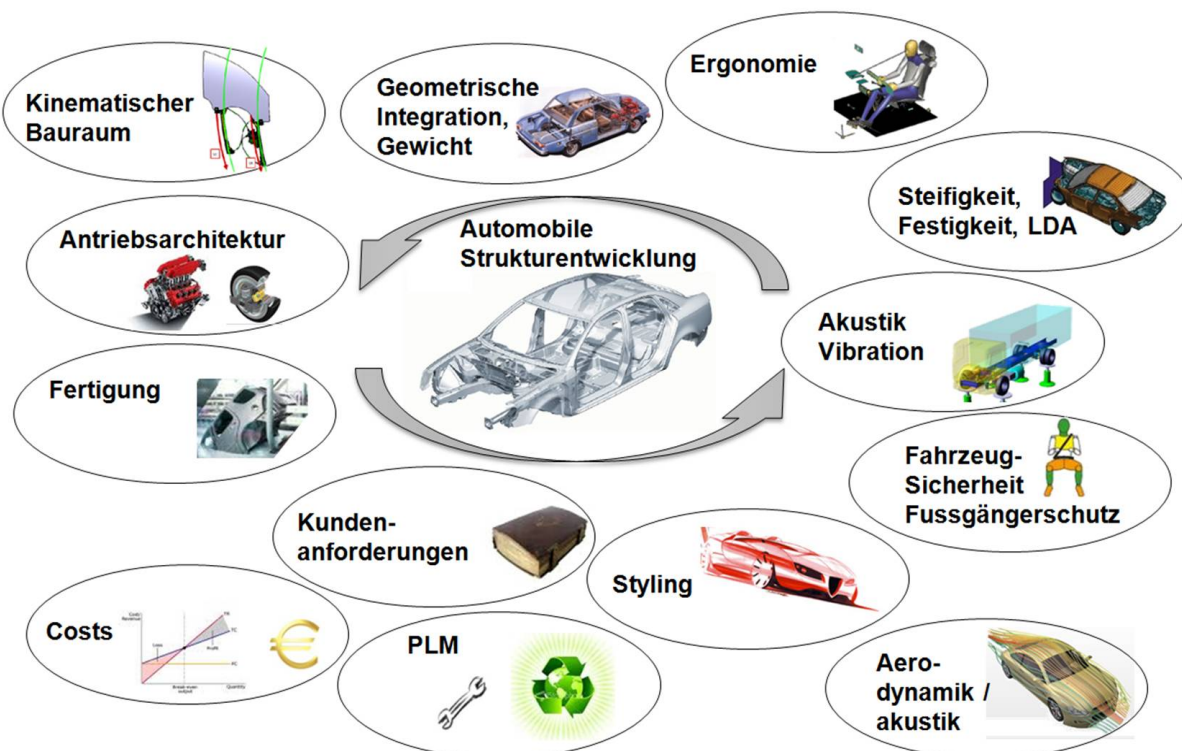


Abbildung 2.11: Multidisziplinäres Spannungsfeld in der automobilen Strukturentwicklung

Der Kernpunkt der Strukturentwicklung besteht in der funktionsbasierten strukturmechanischen Auslegung unter Berücksichtigung der Herstellungs- und Produktionstechnologien. Parallel hierzu ist eine fortlaufende Abstimmung mit der geometrischen Integration, Homologation, Gewichtsmanagement, Formgestaltung und Formoptimierung der Aerodynamik umzusetzen. Teilweise zielkonfliktbehafteten Anforderungen der unterschiedlichen Entwicklungsdisziplinen, wie beispielsweise hohe Steifigkeit bei geringer Masse, sind im Fortlauf des Entwicklungsprozesses zu homogenisieren, um eine stimmige Gesamtlösung zu gestalten.

Der Schwerpunkt der Strukturentwicklung findet von Konzeptentwicklung bis Serienhochlauf statt. Vorgelagert können Strukturkonzepte im Rahmen von Forschungs- und Vorentwicklungsaktivitäten erarbeitet und in Bezug auf Serienreife bewertet werden. Die Hauptdisziplinen in der Strukturentwicklung bestehen in der Auslegung der passiven Fahrzeugsicherheit, der Dauer- und Betriebsfestigkeit, sowie der Akustik- und Vibrationsentwicklung (NVH). Zwischen den einzelnen Entwicklungsdisziplinen zeigen sich gleichläufige Entwicklungsziele, wie beispielsweise eine hohe Steifigkeit der Fahrgastzelle bei optimiertem akustischem Verhalten, als auch gegenläufige Vorgaben wie Deformationszonen mit geringer Steifigkeit zur Energieabsorption.

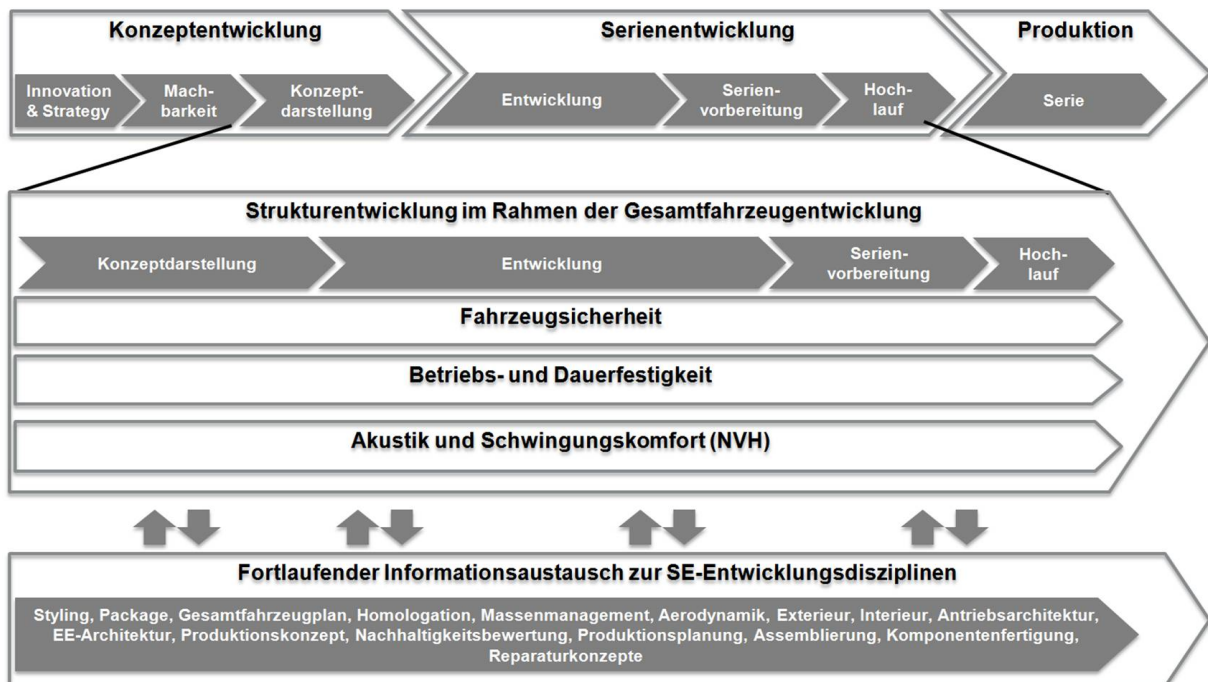


Abbildung 2.12: Schwerpunkte der automobilen Strukturentwicklung im Gesamtfahrzeugentwicklungsprozess und vereinfachte Darstellung von Wechselwirkungen

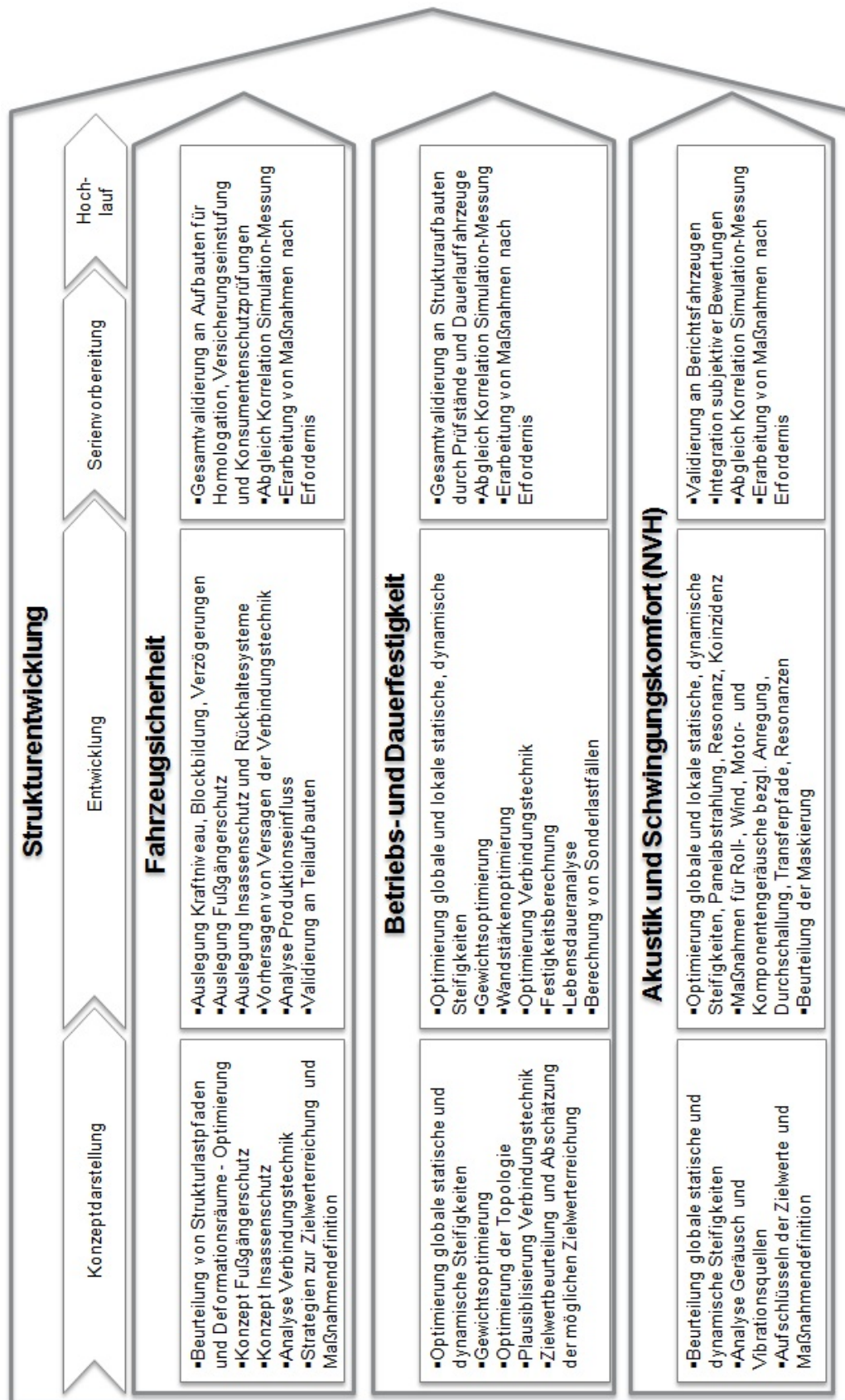


Abbildung 2.13: Zusammenfassung der Arbeitsschritte in der Strukturentwicklung je nach Strukturentwicklungsdisziplin über die Entwicklungsphasen



In der Konzeptdarstellung wird die Zielwerterreichung auf Basis von Strategien und Auslegungskonzepten bewertet. Prämissen und Voraussetzungen für funktionale Konzepte werden in das Gesamtfahrzeugkonzept eingebracht, um die Zielwerterreichung zu gewährleisten. Diese Entwicklungsphase ist für eine funktionale Optimierung durch numerische und analytische Methoden mit größeren geometrischen Änderung geeignet, da Maßnahmen vereinfacht in das weiche Gesamtkonzept eingebracht werden können. Die einzelnen Tätigkeiten der drei Entwicklungsdisziplinen in der funktionalen Strukturentwicklung sind in Abbildung 2.13 aufgeführt.

In der Serienentwicklung werden die Auslegungskonzepte detailliert modelliert und abgesichert. Durch die erforderliche Detaillierung sinkt der Variationsspielraum, wodurch von globalen auf lokale Optimierungsprobleme übergegangen wird. Funktionale Konzepte können durch Prinzipversuche und entsprechende Kalibrierung der rechnergestützten Auslegungsmethoden in dieser Phase bestätigt werden. Die konzeptionelle Modellierung der Fahrzeugstruktur erfolgt in Abstimmung mit dem Gesamtfahrzeugmaßkonzept und dem Spannungsfeld, wie Fahrzeugstyling, Ergonomie, Einstiegscomfort, Bauraumkonzept, Garagenmaße und Raumgefühl. Geometrische Abhängigkeiten betreffen in der Styling- und Aerodynamikentwicklung die Bereiche der Fahrerkabine von A- bis C-Säule und Heckabschluss. Durch das Gesamtfahrzeugmaßkonzept, Antriebsarchitektur und Aggregate, Sitzkonfiguration und gewünschte Volumina für Zuladung wird der verfügbare Bauraum zwischen Antriebs- und Speicherkomponenten, Aggregaten, Fahrwerk und dem Innenraum im Bereich des Unterbodens und der Einstiegsbereiche definiert.

In der Funktionsauslegung ist neben der geometrischen Integration die Dimensionierung der Struktur in Hinblick auf Strukturtopologie, Lastpfade, Werkstoffeinsatz und Materialverhalten für die Entwicklungsdisziplinen der Fahrzeugsicherheit, Betriebsfestigkeit und Akustikentwicklung relevant.

In der Fahrzeugsicherheit sind die Themen Strukturmechanik bei dynamischer Belastung und Biomechanik von Fußgängern und Insassen Kernpunkte der Entwicklung, siehe Entwicklungsprozess Fahrzeugsicherheit in Abbildung 2.13. In der Strukturmechanik werden ausgehend von der erforderlichen Struktursteifigkeit die einzelnen Lastpfade für dynamische Beanspruchung im Hoch- und Niedriggeschwindigkeitsbereichen von Front-, Seiten- und Heckcrash ausgelegt. Unter die Auslegung von quasistatisch geprüften Lastfällen fällt beispielsweise die Dacheindrückung. Je nach Fahrzeuggewicht sind die einzelnen Lastpfade der Struktur im Rahmen der Fahrzeugsicherheit zu dimensionieren und die Zellintegrität bei einer Kollision zu gewährleisten [25, S. 511]. Neben der Auslegung der Strukturmechanik sind Schutzkonzepte für Fußgänger und Insassen in Form von Deformationszonen,

Rückhaltesystemen und aktiven Schutzmechanismen, beispielsweise Airbags oder aktive Klappensysteme, umzusetzen. Abhängig vom Materialverhalten ergibt sich eine spezifische Versagenscharakteristik und Energieumwandlung bei einer Kollision des Fahrzeuges. Im Bereich der Betriebs- und Dauerfestigkeitsrechnung bestimmen die Themen Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdaueranalyse in Bezug auf Material- als auch Fügeverhalten die Auslegungsschritte, siehe Entwicklungsprozess Betriebs- und Dauerfestigkeit in Abbildung 2.13. Darüber hinaus sind Sonderlastfälle und Plastifizierungseffekte zu betrachten. Über die einzelnen Auslegungsschritte kann durch Optimierungsmethoden eine systematische und systemgestützte Verbesserung der Produkteigenschaften umgesetzt werden. In der NVH-Entwicklung ist das Komfortverhalten des Fahrzeuges in Bezug auf Akustik und Vibration über den gesamten spürbaren Frequenzbereich auszulegen, siehe Entwicklungsprozess Akustik und Schwingungskomfort in Abbildung 2.13. Dies betrifft Themen zur Beschreibung der Geräusch- und Vibrationsquellen, Anregung, Transferpfade, Durchschallung, Abstrahlung und der simulationsbasierten Beschreibung der finalen akustischen und Vibrationsempfindung für die Passagiere. Zu den Geräusch- und Vibrationsquellen zählen Motor-, Wind- und Rollgeräusch, sowie spezifische Geräusche von Aggregaten und Fahrwerkskomponenten. In der Akustikentwicklung der Struktur bilden die globalen Steifigkeit und die lokalen Eingangssteifigkeiten (Impedanz) an den Kräfteinleitungsstellen wesentliche Punkte in der Auslegung [25, S. 510]. Die Art der Anbindung von Komponenten und deren Materialverhalten beeinflusst den Transfer von Schall und Vibration. Auf Basis von Sensitivitäts- und Einflussanalysen, als auch DOE-Optimierungen lassen sich systematisch Verbesserungsvorschläge erarbeiten.

Die Produktionstechnologie und das Produktionskonzept stellen weitere Beeinflussungsfaktoren in der Strukturentwicklung dar. Diese manifestieren sich in Form von herstellungsbedingten Rahmenbedingungen für die Bauteilgestaltung und der Art und Positionierung der Füge-technik. Durch fertigungsbedingte Beeinflussung von Materialeigenschaften, wie Wärmeeinflusszonen, sowie durch den Einfluss von erforderlichen Konditionierungsprozessen für Fügeverfahren können Struktureigenschaften beeinflusst werden. Diese Einflüsse sind in der Strukturauslegung ebenfalls zu berücksichtigen. Zur Herstellung von Komponenten im Karosseriebau existieren unterschiedliche Fertigungsverfahren in der Ur- und Umformung, wie auszugsweise Tiefziehen [72, S. 447], Gießen [72, S. 78], Innenhochdruckumformen [72, S. 465], Kanten, Superplasticforming, Pultrusion, RTM [12, S. 376ff] für geringere Stückzahlen. Haupteinflussfaktor für die Gestaltung der Fertigungsprozesse sind unterschiedliche Materialeigenschaften.

Die im modernen Karosseriebau eingesetzten Fügeverfahren sind vielfältig und entwickeln sich stetig weiter, dazu zählen in der Großserienproduktion Widerstandspunkt- und Laserschweißen, Nieten und Kleben. Die Berücksichtigung von Fügeverfahren bedingt die geometrische Gestaltung der Verbindungstechnik, von Kontaktbereichen, Freigängen, sowie Zugänglichkeitsuntersuchung und das Toleranzkonzept zum Toleranzausgleich. Eine Unterteilung der Verbindungstechnik kann nach unterschiedlichen Kriterien wie in warme und kalte Fügeverfahren erfolgen. Eine weitere Klassifizierung der Verbindungstechnik richtet sich beispielsweise nach Einbringung von zusätzlichen Fügeelementen wie Nieten, Schrauben, Kleben [72, S. 238], Lötten [72, S. 230], Clips beziehungsweise dem Fügen ohne zusätzliche Fügeelemente (Lichtbogenschweißen [72, S. 137], Clinchen). Die geometrische Ausprägung von zusätzlichen Fügeelementen und die Zugänglichkeit während des Fügeprozesses muss in der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Fahrzeugstruktur kann nach unterschiedlichen funktionalen Kriterien bewertet werden. Die Struktursteifigkeit stellt eine grundsätzliche Struktureigenschaft dar. Hierzu zählen statische und dynamisch Steifigkeit, für welche Lastfälle von Torsion und Biegung bewertet werden. Die statische Torsionssteifigkeit  $K_t$  ist aus der Differenz der Rotationswinkel der Vorderachse  $\Theta_f$  und Hinterachse  $\Theta_r$  in *deg* bei einem eingeleiteten Moment  $M_t$  in *Nm* um die X-Achse definiert [134, S. 458].

$$K_t = \frac{M_t}{\Theta_f - \Theta_r} \quad (2.1)$$

Die statische Biegesteifigkeit  $K_f$  eines Fahrzeuges ist durch eine vertikale Verschiebung  $z_F$  in *mm* aufgrund einer vertikalen Belastung  $F$  in *N* am Sitzquerträger und einer Einspannung an den Vorder- und Hinterachsen definiert, wobei  $z$  in *m* geometrische Abmessungen des Fahrzeuges in Bezug auf Sitzquerträger und Achsen darstellen [134, S. 460].

$$K_f = \frac{F}{z_F - (z_f b + z_r a)/w_b} \quad (2.2)$$

Eine weitere Struktureigenschaft stellt das Gewicht dar. Wenn die statische Torsionssteifigkeit  $c_T$  in  $\frac{Nm}{deg}$  mit dem Strukturgewicht der Rohkarosse  $m$  in *kg* und den Strukturabmessungen der Fahrwerksanbindung  $A$  in  $m^2$  in Relation gesetzt wird, kann die Leichtbaugüte als Kennwert abgeleitet werden  $L$  in  $\frac{Nm}{kg \cdot m^2}$  [25, S. 510].

$$L = \frac{c_T \cdot A}{m} \quad (2.3)$$

Neben der Struktursteifigkeit stellt die Strukturintegrität bei lokalen Belastungen eine weitere relevante Eigenschaft dar. Diese ist besonders für dynamische Beanspruchungen, wie Lastfälle in der Fahrzeugsicherheit, von Bedeutung. In der Strukturkonzeption sind

sowohl globale Eigenschaften, als auch lokale Anforderungen zu berücksichtigen. Anhand globaler Eigenschaften wie der Leichtbaugüte kann die Erfüllung lokaler Anforderungen nicht beschrieben werden, wodurch eine Beurteilung des Strukturverhaltens im jeweiligen Belastungsfall zu prüfen ist. In der passiven Fahrzeugsicherheit zählen hierzu Lastfälle von Frontal-, Seiten-, und Heckaufprall, sowie der Dacheindrückung. Maßnahmen der passiven Sicherheit können eine Verschlechterung der Leichtbaugüte bewirken.

Wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt, können funktionale Eigenschaften anhand von simulationsbasierten Methoden beurteilt werden. In der Regel wird hierbei hierarchisch vorgegangen. Dies startet bei der korrekten Beschreibung der Werkstoffeigenschaften durch Materialcharakterisierung und Prinzipversuche anhand einfacher Probegeometrien. Eine gesteigerte Komplexität ergibt sich auf der Ebene des Zusammenbaus von Modulen, wobei spezifische Topologien und Verbindungstechniken zu berücksichtigen sind. Auf der Systemebene werden Aufbauten für bestimmte Funktionsbeurteilungen und Überprüfungen genutzt. Die finale Absicherung der Produkteigenschaften wird durch Überprüfungen auf der Gesamtfahrzeugebene erzielt.

Die soeben erläuterten Steifigkeitseigenschaften können anhand von Simulationsmodellen berechnet und später im Entwicklungsprozess durch Rohbauprototypen und Karossen aus der Vorserienproduktion auf Prüfständen physisch validiert werden. Die virtuelle Auslegung von lokalen Festigkeitseigenschaften und Vermeidung von Versagen über Lebensdauer kann ebenso durch Prüfstände im Dauerlauf und Resultate aus Flottenversuchen überprüft werden.

In der Fahrzeugsicherheit sind Validierungen im Rahmen von Prinzipversuchen (z.B. zur Materialcharakterisierung), Teilaufbauten (z.B. Schlittenversuche) und Gesamtsystemen (z.B. Gesamtfahrzeugkollision) Stand der Technik. Dies trifft für die Entwicklungsbereiche der Strukturentwicklung, als auch der Biomechanik im Rahmen von Insassen- und Fußgängerschutz zu.

In der NVH-Entwicklung werden die Simulationsmodelle auf der Materialebene und auf der Gesamtfahrzeugebene über den gesamten Frequenzbereich validiert. Eine Herausforderung stellen Effekte der Maskierung dar, wobei sich unterschiedliche Geräuschquellen überlagern und die Reduktion von einer Geräuschquelle nur teilweise Verbesserungen ergeben kann.

Sofern von physischen Prüfungen eine fehlende Eignung des Produktes festgestellt wird, können im Rahmen des Serienhochlaufes in begrenztem Umfang Maßnahmen eingebracht werden. Ein hoher Reifegrad der virtuellen Auslegung reduziert somit den erforderlichen Änderungsaufwand in späteren Phasen.

### 2.3.2 Die konzeptionelle Strukturentwicklung als Anwendungsbeispiel der vorliegenden Methodenentwicklung

Arbeitspunkte in der Konzeptentwicklung bestehen in der Erarbeitung des Fahrzeugkonzeptes und dessen Gesamtfahrzeugplanes [99, S. 3]. Verschiedene Stylingvarianten des Konzeptes und die Konzeptspezifika werden in der Konzeptentwicklung bezüglich Marktpotential analysiert. Zur Abschätzung des Produktpreises werden Struktur- und Anbauteile des Fahrzeugkonzeptes modelliert, Antriebskomponenten und

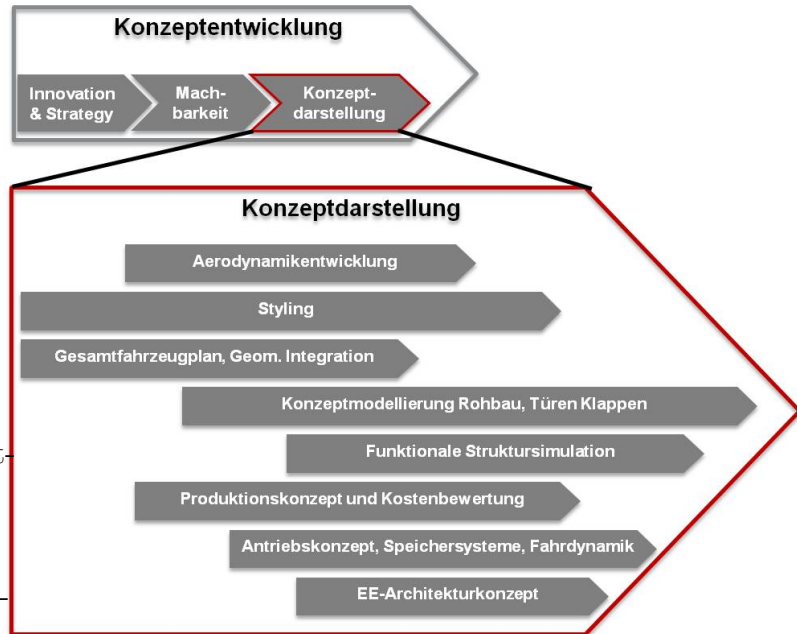


Abbildung 2.14: Entwicklungstätigkeiten in der Konzeptphase der Gesamtfahrzeugentwicklung

elektronische Komponenten integriert und Produktionsabschätzungen durchgeführt, um Bauteilkosten und Übernahmeumfänge zu bewerten. Mit Fortlauf des Entwicklungsprozesses wird die Anzahl der untersuchten Varianten reduziert bis zum finalen Konzeptentscheid. Funktionale Defizite werden auf Basis zugrundeliegender Randbedingungen durch Machbarkeitsuntersuchungen aufgezeigt und der mögliche Lösungsraum wird beschrieben. Die Produktmodellierung ist hierbei ein wichtiges Instrument zur Informationsgewinnung und Bewertung.

In der Konzeptentwicklung wird eine funktionale Machbarkeitsabschätzung des Gesamtsystems, in Bezug auf unter anderem folgende Punkte umgesetzt:

- Darstellung des Fahrzeugkonzeptes
- Aufbau des charakteristischen Maßkonzeptes
- Integration des Stylings
- Bewertung der Ergonomie
- Erfüllung von Gesetzesanforderungen
- Darstellung und Bewertung von neuen Konzepten und Technologien
- Bewertung von Varianten

### 2.3.3 Herausforderungen der konzeptionellen Strukturentwicklung

#### Gesamtheitliche Funktionsdarstellung und Validierung

Die gesamtheitliche Funktionsentwicklung im Fahrzeugbau bedeutet heute den Einsatz von multidisziplinären Entwicklungsmannschaften und spezialisierten Entwicklungssystemen (FEM, CFD, MKS, SEA) [116, S. 437]. Auch in der Strukturentwicklung kommen unterschiedliche Berechnungsmethoden für die Disziplinen Fahrzeugsicherheit (nicht-lineare FE-Methode, MKS), Betriebsfestigkeit (lineare und nichtlineare FE-Methode) und NVH (MKS, lineare FE-Methode, statistische Energieanalyse SEA, instationäre CFD für Aeroakustik) zum Einsatz. Jedes dieser Simulationsverfahren wird durch unterschiedliche Softwareprodukte abgedeckt (beispielsweise [44, 52, 135, 9, 121]). Aufgrund der Komplexität der Entwicklungsdisziplinen als auch der Spezialisierung der Werkzeuge sind abgestimmte Arbeitsweisen und Entwicklungsumgebungen erforderlich.

Die parallelen Prozesse des 'Simultaneous Engineering' führen dazu, dass sich geometrische und funktionale Modelle von der Ausgangsbasis in divergente Richtungen auseinander entwickeln können. Eine Modellierung anhand unterschiedlicher Systeme, zum Beispiel in CAD-Systemen und parallel dazu in Pre-Processoren von Finite-Elemente Software, kann zu Unterschieden in der geometrischen Gestalt führen. Auch Optimierungsvorschläge nach simulationsbasierten Untersuchungen, welche zur Verbesserung des Produktkonzeptes erforderlich sind, bedeuten eine Abweichung vom CAD-basierten Ausgangsmodell. Aus Funktionsentwicklungsdisziplinen, beispielsweise Fahrzeugsicherheit, Betriebsfestigkeit und Akustik, ergeben sich nach einer Berechnungsschleife unterschiedliche Vorgaben, welche über Methoden der multidisziplinären Optimierung balanciert werden können und dann wieder in das zentrale Produktmodell überzuführen sind.

Für den Konstrukteur ist es notwendig, disziplinübergreifende Systemanforderungen zu kennen, diese auf Bauteilebene herabzubrechen, und durch die fortlaufende Abstimmung in einem simultanen Entwicklungsprozess unterschiedliche Vorgaben einzuarbeiten. Bewertungskriterien für das Produkt sind hierzu beispielsweise Funktion, Gewicht, Kosten, Modularität, Herstellbarkeit und Qualität [159, S. 15]. Eine Darstellung von grundsätzlichen funktionalen, wirtschaftlichen und produktionsbezogenen Aspekte im automobilen Entwicklungsprozess ist in Abbildung 2.6 zu finden.

Eine vereinfachte Funktionsdarstellung und numerische Optimierung des komplexen Systems Fahrzeug könnte durch mathematische Beschreibung von Zusammenhängen in Form funktionaler Wirkketten erfolgen, wobei eine umfassende repräsentative Aussage aufgrund modellhafter Annahmen von Fahrzeugeigenschaften und Zusammenhängen mit

der erforderlichen Genauigkeit nicht getroffen werden kann [6, S. 422]. Für eine prinzipielle Vorhersage eines Systemverhaltens im Zuge einer konzeptionellen Auslegung scheint dieser Ansatz jedoch denkbar. Die Bedatung der funktionalen Wirkketten kann durch eine systematische Variation von Einflussparametern verschiedener Teilsysteme und Abhängigkeiten und durch eine simulationsbasierte Auswertung anhand von detaillierten Modellen erreicht werden. Dieser Ansatz zeigt das Potential, Teilsysteme zu einer gesamtheitlichen Sichtweise aggregieren und interdisziplinäre Aspekte miteinander in Beziehung setzen zu können.

Eine Methode zur übergreifenden Funktionsüberprüfung und Optimierung stellt die Co-Simulation dar [17, S. 58-63]. Die Herangehensweise besteht in einer übergreifend gedachten Methodik, welche modellbasiert Zusammenhänge berücksichtigt und über ein geeignetes Schnittstellenkonzept in Verbindung setzt. Herausforderungen bestehen in einer Balance zwischen Detaillierung und Abstraktion, sowie in der übergeordneten Steuerung und Einbindung von unterschiedlichen Entwicklungsmethoden. Alternativ können spezifische Entwicklungswerkzeuge modular auf einer Entwicklungsarchitektur ausgelegt und gesamtheitlich verwaltet werden. Die Lösungshomogenisierung und Verknüpfung einzelner Methoden unterliegt dem Entwicklungsexperten, welcher Einflussparameter und Prioritäten festlegt und eine übergreifende homogene Lösung gestaltet.

Die Variation von geometrischen Modellen zur funktionalen Bewertung, beispielsweise durch Morphen, kann in der Simulation anhand der Finite Elemente Methode erfolgen und ermöglicht eine simulationsgestützte Bewertung von Varianten ohne Konstruktionschleife [118, S. 180]. Die Steuerung von Geometrie anhand von Morphing erfolgt durch parametrische Werte im FE-Modell und ist aufgrund des relativ hohen Aufwandes zur Parametrierung von Gesamtfahrzeugmodellen und der erforderlichen Rechenzeit für lokale numerische Optimierung im Fahrzeug geeignet [176, S. 157ff].

Die Rückkoppelung von simulations- und produktionsgetriebenen Entwicklungsschritten kann auf unterschiedliche Arten, wie mündliche Kommunikation, Präsentationsunterlagen, oder eingeschränkt durch die Übernahme von Simulationsmodellen erfolgen. Diese Möglichkeit ist aufgrund einer nicht universellen Lesbarkeit verschiedener Datenformate in aktuellen Autorensystemen nicht Stand der Technik. Im Bereich der Finite-Elemente Modelle können Übergabeformate (z.B. VRML) generiert werden, welche es ermöglichen, rein visuelle Modelle wieder in CAD-Systeme überführen zu können. Objekte in diesen Modellen können anhand von CAD Methoden nicht automatisch weiterverwendet, separiert oder als Positionsreferenz verwendet werden. Die Weiterverwendung der konvertierten Modelle kann anhand visueller Analysen durch den Konstrukteur und durch die anschließende Überarbeitung bzw. Neugestaltung als CAD-Modelle umgesetzt werden.

Eine umfassende Absicherung eines neuen komplexen Produktes, wie eines Personenkraftwagens, ist ein aufwändiger Prozess, bei welchem Grundfunktionalitäten ab der Initialphase betrachtet werden. Der revolutionäre Aufbau von Fahrzeugkonzepten ohne bestehende Vorgängermodelle ist ein Prozess mit erhöhtem Risiko. Aktuelle Fahrzeuge bestehen aus 30–50.000 Einzelteilen, welche ihre Funktionen über die geplante Lebensdauer erfüllen müssen. Der Ausfall einzelner Teile lässt sich in diesem Umfang statistisch gesehen nur durch hohen Aufwand vermeiden. Es gilt systematische Fehler, welche bei einer hohen Anzahl von Fahrzeugen vorkommen, zu unterbinden, um kostenintensiven und imageschädigenden Rückrufaktionen vorzubeugen.

Zur funktionalen Auslegung von Bauteilen über die geplante Lebensdauer sind mögliche Formen von Bauteil- und Systemversagen aufgrund physikalischer oder chemischer Effekte zu berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in das Produktkonzept einzubringen, um Bauteilfehler zu vermeiden. Zur Evaluierung und Bewertung können Analysemethoden auf Basis von Expertenwissen und logischen Überlegungen (FMEA [197, S. 15ff] oder FTA [18, S. 160ff]), sowie systemgestützten Analysen (z.B. Lebensdauerabschätzung in der Betriebsfestigkeit [84, S. 501ff]) zur Anwendung kommen.

### **Darstellung und Bewertung neuer Strukturbaueisen und Materialkonzepte**

Für die Beurteilung funktionaler Struktureigenschaften von neuen Technologien ist 'Engineering Judgement' und Erfahrungswissen oft nicht ausreichend, um zuverlässige funktionale Aussagen im Gesamtfahrzeug treffen zu können. Zum Vergleich verschiedener Entwicklungskonzepte und Technologien ist eine systembasierte Darstellung und Analyse von Abhängigkeiten erforderlich. Die Herausforderung in der Konzeptphase besteht in einer zeitnahen konstruktiven Umsetzung von verschiedenen Lösungsvorschlägen unter Berücksichtigung funktionaler Aspekte. Produktmodelle sind erforderlich, um einen technischen und wirtschaftlichen Vergleich von Varianten durch validierte Methoden zu gewährleisten. In Bezug auf Modellierungsmethoden ist es essentiell, keiner Einschränkung zur Produktgestaltung von neuen Technologien und Konzepten zu unterliegen. Die Zeit zur Modellierung und Bewertung spielt dabei eine Rolle im Entscheidungs- und Entwicklungsprozess beim Vergleich verschiedener Varianten.

Eine Anforderung an die Konzeptentwicklung ist, verschiedene Lösungsansätze darzustellen und zu variieren. Von Vorteil in der Konzeptentwicklung ist ein reduzierter Aufwand zur Abstimmung und Variation von Lösungen. Diese gesteigerte Agilität zeigt einen Vorteil in puncto Reaktionsfähigkeit auf Änderungen des Produktes während der Konzeption. Methoden, welche in der frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden, müssen unabhängig von der dargestellten Bauteiltechnologie, diesen Anforderungen gerecht werden. Der Aufwand zur Erstellung und Adaption von Produktmodellen stellt einen wesentlichen



Baustein in der gesamten Entwicklungskette dar. Wie in der Einleitung 1.1.1 angeführt, sind aktuell zwei technologische Schwerpunkte in der Strukturentwicklung hervorzuheben, die einen Einfluss auf die durchzuführenden Entwicklungsschritte in der Strukturauslegung haben.

Der erste Schwerpunkt in der Strukturentwicklung besteht in der Ausleitung von Derivaten [176, S. 84ff] und Integration verschiedener Antriebskonzepte in Plattformen, unter einer minimalen Ausbildung von Strukturvarianten. Die Anforderungen zur Konzeption von Plattformen bestehen in einer breiten Nutzbarkeit für verschiedene Modelle, unter minimaler Einschränkung zur Adaption für einzelne Modelle [110, S. 412ff]. Dazu zählen die Integration verschiedener Antriebskonzepte, Leichtbaumaßnahmen, steigende Anforderung der passiven Sicherheit und die Integration von Systemen der passiven und aktiven Fahrzeugsicherheit.

Die einzelnen Antriebs- und Speicherkonzepte ergeben unterschiedliche Anforderungen bezüglich geometrischer Integration und Gewichtsverteilung im Gesamtfahrzeug. Die Ableitung von verschiedenen Strukturvarianten je nach Antriebskonzept bedeutet erhöhte Investitionskosten, welche sich in den Produktkosten niederschlagen. Aus diesem Grund ist anzustreben, verschiedene Antriebskonzepte in ein Strukturkonzept zu integrieren. Um diesen integralen Ansatz umzusetzen, sind die einzelnen Antriebsarchitekturen ab einer frühen Phase in der konzeptionellen Strukturentwicklung zu berücksichtigen. Dies bedeutet, neben der Einbeziehung des Platzbedarfs und der Antriebskomponenten, die Erfüllung von Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit, insbesondere der Strukturintegrität hinsichtlich dem Schutz von neuen Speichertechnologien, wie Batterien und Hochdrucktanks.

Der zweite Schwerpunkt betrifft die Entwicklung von Leichtbaustrukturkonzepten. Die Architektur der Stahl-Schalenbauweise ist im Fahrzeugbau für höhere Fertigungsvolumen Stand der Technik. Zur Erreichung von reduzierten Emissionen und erhöhter Fahrzeugdynamik geht der aktuelle Trend in Richtung Multi-Materialkonzepte in der Fahrzeugstruktur [83, 192, 174, 142], um eine steigende Gewichtsspirale zu vermindern, bzw. diese umzudrehen. Der Einsatz neuer Materialkonzepte (höchstfeste Stähle, Aluminium, Verbundwerkstoffe, oder hybride Bauteilkonzepte) und unterschiedlicher Füge-technik ergibt allerdings geänderte Strukturkonzepte. Eine angepasste Herangehensweise in der Konstruktion zeigt sich besonders in der Auslegung von Faserverbundwerkstoffen. Diese Werkstoffe ermöglichen eine gezielte strukturelle Auslegung aufgrund anisotropen bzw. orthotropen Materialverhaltens und bieten die Möglichkeit zur lokal definierten Materialverteilung.

Zur funktionalen Gestaltung von Faserverbundbauteilen besteht eine gesteigerte Anzahl von Einflussparametern in der Bauteildimensionierung; darunter fallen mögliche Herstellungsprozesse, Typ und Volumengehalte der Fasern und Harzsysteme, Art (unidirektional, Gewebe) und Anzahl der Lagen, Orientierung der Lagen und Positionen der lokalen Verstärkungen. Faserverbunde zeigen ein stark richtungsabhängiges Verhalten aufgrund von hohen übertragbaren Kräften in Faserrichtung und deutlich reduzierten mechanischen Eigenschaften quer zur Faserrichtung. Der Einfluss der Lagenausrichtung und des Beschnittes ist im Vergleich zu isotropen Werkstoffen deutlich erhöht [71, S. 421]. Zur belastbaren funktionalen Beurteilung des Bauteils ist eine Modellierung der Lagen auch in der Konzeptphase erforderlich. In der konstruktiven Darstellung erfordert die Herstellungsbewertung von Faserverbundwerkstoffen neue Verfahren. Durch eine Drapiersimulation [71, S. 422] auf Basis des maximalen Faserscherwinkels [75, S. 577] kann die Abweichung der Faserrichtung durch die Bauteiltopologie vorhergesagt und nicht herstellbare Lagen können detektiert werden. Die Topologie der Trägerfläche hat wesentlichen Einfluss auf die Herstellbarkeit des Bauteils und erfordert eine detaillierte tangentialstetige Modellierung schon ab der Konzeptphase [71, S. 442]. Aufgrund der Möglichkeiten zur lokalen Verstärkung ergibt sich ein Bauteilvolumen mit nicht konstanten Wandstärken. Eine Darstellung der lokalen Wandstärken ist zur Festlegung von Kontaktflächen über Bauteilgrenzen notwendig und kann anhand einer Schnittdarstellung des Lagenaufbaues erarbeitet werden.

Die Herausforderung im Entwicklungsprozess besteht in der übergreifenden Bauteilkonzeption und Einstellung der Parameter für Faserverbundstoffe und zusätzlicher Versagenskriterien [141, S. 7], welche die Anforderungen verschiedener Funktionen, wie Fahrzeugsicherheit, Betriebsfestigkeit, Lebensdauer, Vibration, Schalltransfer und Durchschallung, und einen verstärkten produktionspezifischen Einfluss berücksichtigen. Neben der geometrischen Ausprägung ist die funktional bedingte Orientierung der Fasern ein bedeutendes Kriterium zur Umsetzung der Bauteileigenschaften. Der Transfer des Lagenaufbaus hat zwischen Konstruktion, Produktion und Simulation zu erfolgen. Dies schließt insbesondere Anforderungen aus Betriebsfestigkeit und Fahrzeugsicherheit in die Bauteilauslegung ein. Die funktionalen Vorgaben wiederum sind auf eine produktionsgerechte Umsetzbarkeit in Bezug auf den Lagenaufbau und die Drapierbarkeit zu prüfen.

Aus Produktionssicht ist eine integrale Berücksichtigung unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften, wie Wärmeausdehnungskoeffizienten, mögliche Fügekonzepte, Möglichkeiten der Korrosionsvermeidung und Toleranzkonzepte, sowie werkstoffgerechte Konstruktion, auf Basis von Materialeigenschaften und Produktionsverfahren ab der Konzeptphase umzusetzen.

Ein Beispiel von intensivierten rechnerbasierten Untersuchungen in der Entwicklung von Multimaterialkonzepten in der Karosserieentwicklung ist die Untersuchung des temperaturabhängigen Ausdehnungsverhaltens. Abhängig von eingesetzten Prozessschritten in den Fertigungslinien, beispielsweise einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) zum Korrosionsschutz [29, S. 328], ergeben sich Temperaturänderungen, welche vom Bauteilverbund durchlaufen werden. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von verwendeten Materialien [140, S. 587] können temperaturinduzierte Spannungen im Gesamtsystem bei Durchlaufen von diesen Fertigungsschritten entstehen. Es kann sich die geometrische Form des Zusammenbaus reversibel und irreversibel ändern. Beispielsweise kann Ausbeulen oder Werkstoff- und Fugestellenversagen zu Ausschuss eines Zusammenbaus führen. Bei Langfaser verstärkten Werkstoffen kann die Wärmeausdehnung zusätzlich eine Richtungsabhängigkeit aufweisen, welche von den Faser negativ und der Matrix positiv sein kann [71, S. 367]. Dies bedeutet auf der einen Seite eine erhöhte Komplexität in der Analyse, im Vergleich zu homogenen Werkstoffen. Auf der anderen Seite ergibt sich auch ein erhöhter Spielraum zur Lösungsgestaltung, um auftretende Differenzen der temperaturinduzierten Ausdehnung kompensieren zu können. In Faserlängsrichtung wird das Bauteilverhalten hier durch die Fasereigenschaften bestimmt, quer zur Faserrichtung durch die Eigenschaften der Matrix. Die Matrix weist in der Regel einen größeren reversiblen Dehnungsbereich als Kohlefaser auf, [137, S. 26] und [137, S. 33]. Diese Eigenschaft kann besonders bei Bauteilen mit unidirektionalem Lagenaufbau genutzt werden und die Faserrichtung so zu legen, dass diese im Gesamtsystem zu keinem kritischen Verzug führen. Die Anforderungen aus dem Zusammenbau können somit zu einem geänderten Lagenaufbau und adaptierten Faserrichtungen führen, welche im Gesamtkontext der funktionalen Bauteilauslegung zu berücksichtigen ist. Zur Bewertung der Herstellbarkeit ist das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten bereits in einer frühen Phase in das Gesamtkonzept einzubeziehen. Hierzu sind die Topologie des Gesamtsystems als auch lokale Bauteileigenschaften im 3D einzubeziehen. Das geometrische Produktmodell bildet hierbei die Grundlage für Untersuchung und Bewertung des temperaturabhängigen Strukturausdehnungsverhaltens. Um unterschiedlicher Wärmeausdehnung von Bauteilen entgegenzuwirken, können abgestimmte Toleranzausgleichsysteme, geänderte geometrische Gestalt, adaptierte Anbindungskonzepte, sowie angepasste Fügefolgen zum Einsatz kommen.

Moderne Multimaterialstrukturkonzepte zeigen die Notwendigkeit einer verstärkten Einbeziehung von qualitativen Analysen der Fertigung bereits in einer frühen Entwicklungsphase, um die Auswirkungen auf Produkteigenschaften abzuschätzen und die Herstellbarkeit zu beherrschen.

### **Determinierung und Reduktion der Produktkosten ab der Konzeptphase**

Im frühen Entwicklungsprozess werden Absatzprognosen des Marktes berücksichtigt, welche von den Produkteigenschaften, dem Fahrzeugstyling und dem Produktpreis beeinflusst werden. Zur Determination von zielgenauen Werten eines Gesamtfahrzeuges bezüglich dieser Faktoren ist ein modelliertes Fahrzeugkonzept von Vorteil. Die Wirtschaftlichkeit einer Fahrzeugproduktion ergibt sich vereinfacht aus den geplanten Absatzzahlen und dem durchschnittlichen Verkaufserlös je nach Ausstattungsvariante, abzüglich der Einmalkosten und der laufenden Kosten in Herstellung, Vertrieb oder Marketing. Wirtschaftlich gesehen sind die Produktkosten, welche sich aus Einmalkosten (Investitions- und Entwicklungskosten) und laufenden Kosten (Material, Stück und Prozess- und Logistikkosten) ergeben, zu analysieren. Das Strukturkonzept und die eingesetzte Herstellungstechnologie sind abhängig von der geplanten Stückzahl, dem möglichen Fahrzeugerlös [129, S. 401] und von verfügbaren Strukturplattformen, auf welchen ein neues Fahrzeug basieren kann. Übernahmekonzepte (COP) sind oftmals Bestandteil einer Plattform- und Derivatsentwicklung, um Einmalkosten zu reduzieren und die Wirtschaftlichkeit eines Konzeptes zu verbessern. Bei der Übernahme von Bauteilen aus bestehenden Baureihen ist die Funktionserfüllung im neuen System zu bewerten. Die Herausforderung besteht darin, dass eine Wirtschaftlichkeitsrechnung des Gesamtproduktes erst nach Aufbau eines Produktmodelles und dessen funktionaler Bewertung möglich ist, um den Einsatz von Übernahmebauteilen, Modulen und Plattformen abzusichern.

In der Produktentwicklung liegt der Schwerpunkt auf der Kostenfestlegung, dessen Kostenauslösung erst in der Fertigung zum Tragen kommt. Eine produktionstechnische Kostenbewertung nach dem Bottom-Up-Prinzip ist nach Festlegung relevanter Bauteileigenschaften auf Basis der Fertigungstechnologie möglich. In der Fabrikplanung sind Produkt-, Prozess- und Ressourcenmodelle aufzubauen; dazu zählen beispielsweise im Rohbau die Stationsplanung von Füge und Lackieranlagen, Prozesse zur Konditionierung als auch des Korrosionsschutzes. In der Arbeitsplatzplanung sind prozessrelevante Bedingungen in der Fertigung, wie Temperaturkonditionierung, Reinheit und Abschirmungen zu berücksichtigen. Eine direkte Verfügbarkeit des Produktkonzeptes im Autorensystem erlaubt eine fortlaufende Beobachtung und Einsteuerung nach Prinzipien des 'Design for Manufacturing and Assembly' während der Produktkonzipierung. Kostenintensive Sonderlösungen in der Produktion können frühzeitig erkannt werden und durch Änderungsvorschläge bereits in der Konzeptphase durch kostengünstigere Alternativen ersetzt werden.

Beeinflussende Kostenfaktoren sind Bauteilanzahl, Materialien, Bauteilmaße, Herstellungstechnologie, Typ und Quantität der Füge­technologie. Die Bestimmung dieser Kosten können dreidimensionale Modelle unterstützen und einen Mehrwert im Vergleich zu zweidimensionalen Schnittkonzepten oder Stücklisten erzeugen. Anhand von modellierten Bauteilkonzepten kann der Materialeinsatz, die Anzahl der Füge­technik als auch der erforderliche Platzbedarf in der Logistik abgeleitet werden. Bei der Beurteilung neuer technologischer Konzepte ist die virtuelle Produktkonzeption ein Hilfsmittel, um Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und Kostenbewertung zu unterstützen. Untersuchungen in der Konzeptphase umfassen beispielsweise die Kostenauswirkungen von Integralbauweise oder Differentialbauweise. Die Integralbauweise strebt eine Integration mehrerer Funktionen in einem Bauteil an, um damit die Teilezahl als auch die Anzahl der Verbindungstechnik zu reduzieren. Im Gegensatz dazu strebt die Differentialbauweise die Aufteilung von Aufgaben auf mehrere fertigungstechnisch- oder kostenoptimierte Teile an [80, S. 242]. Unterschiede dieser Gestaltungsansätze zeigen sich in der Höhe der erforderlichen Investitionen (Art und Anzahl von Werkzeugen) und in den laufenden Prozesskosten, wie Logistikkosten und eingesetzte Fügeverfahren.

Durch eine proaktive Integration von bestehenden Produktionsressourcen in der Konzeptentwicklung kann die Weiterverwendung bestehender Infrastruktur erhöht und die erforderlichen Investitionsaufwände für neue Produkte reduziert werden. Die geometrische Darstellung verschiedener Fahrzeugkonzepte unterstützt eine präzisierte Kostenbewertung ab einer frühen Entwicklungsphase und ermöglicht konkrete Verbesserungsmaßnahmen zur Kostenreduktion.

### **Reduktion von Erstellungs- und Adaptionaufwand zur Produktmodellierung**

Auf Basis der Produktvision und Spezifikation werden in frühen Entwicklungsphasen Produktmodelle aufgebaut, um die Erreichung funktionaler, wirtschaftlicher sowie ästhetischer Ziele zu beurteilen. Aufgrund der Vielfältigkeit von Anforderungen werden in der automobilen Entwicklung multidisziplinäre Entwicklungsmannschaften in simultanen Entwicklungsprozessen eingesetzt, welche für die Erreichung von spezifischen Produktzielen verantwortlich sind. Die Erfüllung aller Fahrzeugziele ist in einer frühen Entwicklungsphase in der Regel nicht gegeben, wodurch fortlaufende Änderungen der initialen Produktmodelle erforderlich sind. Gründe für eine Produktadaption können beispielsweise Änderungen des Fahrzeugstyling oder Gesamtfahrzeugplanes sowie die Nichterreichung von definierten Funktions- oder Kostenzielen sein. Anforderungen in der Konzeptentwicklung bestehen in der effizienten Modellierung zur schnellen Produktbeurteilung, sowie in der Handhabung der fortlaufenden Produktänderung mit geringem Änderungsaufwand.

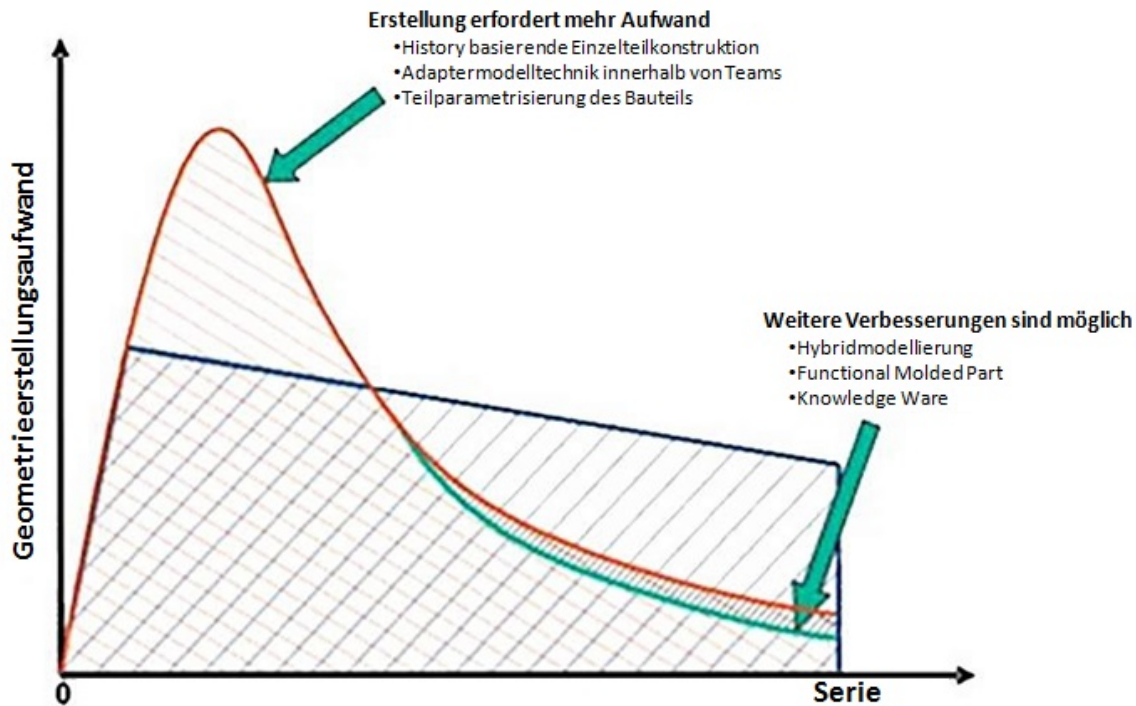


Abbildung 2.15: Vergleich des Erstellungsaufwandes der CAD Konstruktionsprogramme CATIA V4 und V5 [91, S. 1081]

Zur Erstellung der initialen Produktmodelle bestehen unterschiedliche Lösungsansätze, siehe Kapitel 2.4.3. Parametrisch assoziative Konzeptmodelle stellen eine grundsätzliche Möglichkeit in der Konstruktion dar. Bei diesen Methoden steht der Aufwand zur Definition der Parametrik in der initialen Modellierung im Widerspruch zur gewünschten effizienten Produktmodellierung, siehe Abbildung 2.15. Der Umstand des erhöhten Modellierungsaufwandes ist auch bei der Darstellung verschiedener Konzepte relevant, welche nicht von einem initialen Modell abgeleitet werden können.

Das Nutzungspotential von parametrisch assoziativen Methoden wird, wie in Abbildung 2.15 dargestellt, erst in einer späteren Phase der Produktentwicklung gehoben. Um die Nachteile in einer frühen Entwicklungsphase zu kompensieren sind geeignete Strategien in der Modellierung in nativen CAD-Systemen erforderlich. Hierzu zählen die Verwendung von vorgefertigten Produktmodellen sowie die Reduktion der Bauteildetaillierung. Anforderungen an solche vereinfachte Produktmodelle in der frühen Entwicklungsphase bestehen in der Vergleichbarkeit mit detaillierten Modellen, als auch in der funktionalen Belastbarkeit. Die Übertragbarkeit von Konzept- und Serienmodell bedingt eine Ähnlichkeit in der geometrischen Ausprägung. Sofern hier dieselben Entwicklungswerkzeuge eingesetzt werden, können zumindest Abweichungen aufgrund eingesetzter Entwicklungssystemen minimiert werden.

## Durchgänge Datenübergabe zwischen Produktmodellierung und funktionaler Bewertung

Sofern für Bauteilmodellierung und simulationsbasierter Funktionsbewertung unterschiedliche Systeme eingesetzt werden, ist eine Übergabe von Daten zwischen Systemen erforderlich, siehe Kapitel 2.3.3. Dies wird anhand von Datenschnittstellen und Konvertierungswerkzeugen, welche auf standardisierten Schnittstellen (z.B. .iges, .step, .jt) beruhen können, durchgeführt. Aufgrund von unterschiedlicher Spezialisierung von Systemen geht zumeist mit der Konvertierung ein Verlust von Informationen einher, beispielsweise wird im Rahmen einer Übergabe von CAD-Daten in die FE-Simulation Information der Parametrik entfernt. Um eine funktionsgetriebene Entwicklung umzusetzen, ist die integrierte Interaktion zwischen Bauteilmodellierung und funktionaler Bewertung im Rahmen simultaner Entwicklung anzustreben. Am Beispiel der Strukturentwicklung bedeutet dies die Bearbeitung folgender Arbeitsschritte.

- Gestaltung des Produktmodelles anhand geeigneter Modellierungsmethoden
- Aufbereitung der Konstruktionsdaten und Metadaten
- Übergabe der Daten (u.a. durch Datenkonvertierung)
- Modellaufbereitung in der Simulation (Pre-Processing)
- Numerische Berechnung
- Auswertung der Resultate (Post-Processing)
- Ableitung von Maßnahmen
- Rückgabe der Ergebnisse und Vorschläge
- Integration von Verbesserungsmaßnahmen in das Produktmodell

Durch die Experten in der funktionalen Strukturauslegung wie Fahrzeugsicherheit, Betriebsfestigkeit oder NVH werden Produktmodelle bewertet und Verbesserungen in das Produktmodell eingebracht, siehe Kapitel 2.3.3. Die Rückgabe der Information geht in der Praxis oftmals nicht systemgestützt, sondern anhand von Dokumentation und bilateralem Austausch vonstatten. Bedingt wird dies aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von leistungsfähigen Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Systemen. Standardisierte Übergabeformate existieren bezüglich geometrischer Information jedoch nicht für weitere beschreibende Daten, wie beispielsweise funktionale Bewertungen oder Metadaten. Hierzu zählen beispielsweise Materialeigenschaften und Beschichtung der Bauteile, sowie die Beschreibung von Verbindungstechnik anhand spezifischer Werte wie der Typ der Verbindungstechnik, Position und Fügepartner. Um effiziente funktionale Optimierungsschleifen im Entwicklungsprozess umzusetzen, kann anhand durchgängiger Übergabeprozesse ein Mehrwert im Rahmen eines simultanen Entwicklungsprozesses erreicht werden.

## 2.4 Die Bauteilgestaltung in der Produktentstehung

### 2.4.1 Tätigkeiten im Rahmen der Produktmodellierung

Die rechnergestützte Erstellung der geometrischen Repräsentation eines Bauteils steht am Beginn der simultanen virtuellen Produktentwicklung. Die Entwicklungsaufgabe des Konstrukteurs besteht neben der geometrischen Modellierung aus weiteren Schritten. Von Relevanz sind die Erhebung von Information und Aufbereitung von Daten, die Produktmodellierung und die disziplinübergreifende Abstimmung. Die Adressierung verschiedener Ansprüche an die Bauteilentwicklung und die davon abgeleiteten konstruktiven Ansätze zur Erreichung erforderlicher Bauteileigenschaften werden unter dem Begriff 'Design for X' zusammengefasst, siehe Abbildung 2.16. Nach VDI-Richtlinie 2221 existieren allgemeine Vorgangsweisen in der Konstruktion, welche in sieben Arbeitsschritte unterteilt werden, siehe Abbildung 2.17. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte in Bezug auf die allgemeine Sicht in der Konstruktion erläutert und die Relevanz in der Praxis anhand von einzelnen Beispielen in der Fahrzeug- und Strukturentwicklung verdeutlicht.

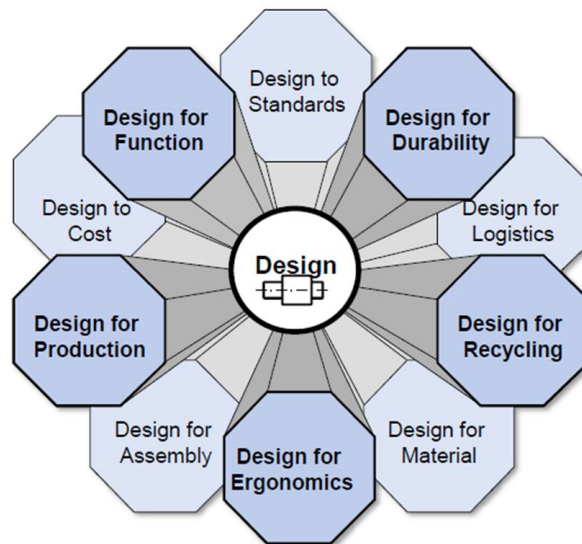


Abbildung 2.16: Aspekte der zielgerechten Konstruktion [130]

#### Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

Der erste Arbeitsschritt in der VDI-Richtlinie 2221 beinhaltet die Produkt- und Aufgabenspezifikation.

Allgemein bedeutet dies die grundsätzliche Festlegung der Entwicklungsziele und der zugrundeliegenden Prämissen. Wesentliche Randbedingungen in der automobilen Strukturentwicklung sind hierbei die geplante Stückzahl und Kosten, vorhandene Ressourcen sowie erforderliche Produkteigenschaften. Die initial definierten Ziele werden im Rahmen des Gesamtfahrzeugentwicklungsprozesses anhand der nachfolgenden Arbeitsschritte plausibilisiert, genauer spezifiziert und durch den Meilenstein der Zielvereinbarung bestätigt.



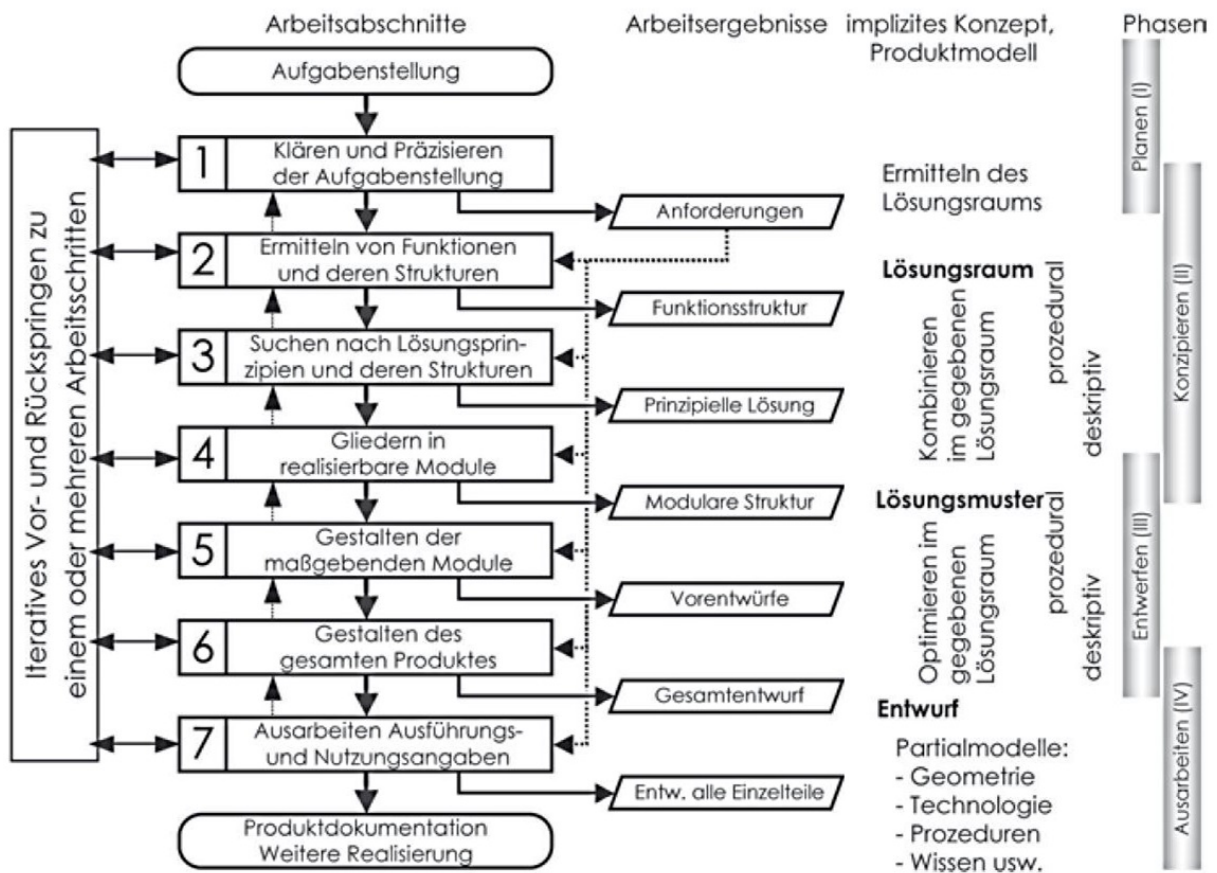


Abbildung 2.17: Erweiterung der Generellen Vorgangsweise beim Entwickeln und Konstruieren nach [183, S. 10] in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [186, S. 9]

### Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Auf Basis der Produktspezifikation werden im Schritt zwei auf Gesamtsystemebene Zusammenhänge und Funktionen analysiert und in Teilfunktionen übergeführt. Die Überführung von Gesamtfahrzeugzielen auf einzelne Systeme ist eine diffizile Angelegenheit. Die Erfassung der Relevanz von einzelnen Systemen für die Eigenschaften des Gesamtsystems sowie Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilsystemen spielen eine grundsätzliche Rolle. Das systematische Herunterbrechen von Gesamtfahrzeugzielen und die Lösungsüberprüfung der einzelnen Module und Systeme kann systematisch hierbei nach dem V-Modell abgehandelt werden, siehe Kapitel 2.1.1. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist eine Funktionsstruktur des Produktes. Diese kann neben der Gliederung auch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen beinhalten. Aus dieser Funktionsstruktur kann sich organisatorisch auch eine Verantwortungsstruktur in der Entwicklung ergeben.

### **Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen**

Im Schritt drei der VDI-Richtlinie 2221 werden Lösungsansätze für das Gesamtsystem und die Subsysteme erarbeitet. Verschiedene Lösungsprinzipien werden evaluiert und auf eine Eignung in der spezifizierten Fragestellung überprüft.

Die Analyse der Funktion und Herstellung für ein Produkt unter Verwendung von bestehenden Lösungsansätzen fällt unter die Konzeptrecherche. Neben der Bewertung bestehender Konzepte können auch neue, noch nicht industrialisierte Lösungsansätze geprüft und hinsichtlich eines Einsatzes im Produktkonzept bewertet werden. Im Rahmen der Strukturentwicklung kann bei der Bearbeitung dieses Schrittes ein Vergleich verschiedener Konzepte, beispielsweise Stahl-Schalenbau, Aluminium-Spaceframe, oder Multimaterialkonzepte durchgeführt werden.

### **Gliedern in realisierbare Module**

Im Rahmen des vierten Arbeitsschrittes werden einzelne Lösungen in eine Gesamtdarstellung übergeführt, sowie die Schnittstellen von einzelnen Systemen und Funktionen dargestellt. Dies geschieht aus der Lösungssicht und beinhaltet bereits die für die Funktionserfüllung erforderlichen einzelnen Module und Elemente.

Das Gesamtfahrzeug wird generell anhand der Funktionsgruppen Antrieb, Elektrik und Elektronik, Fahrwerk, Karosserie, Interieur sowie Türen und Klappen strukturiert. Diese Struktur wird als 'Engineering Bill of Material (EBOM)' bezeichnet und unterscheidet sich durch die Funktionssicht von der Produktionssicht der 'Manufacturing Bill of Material (MBOM)', welche nach dem Fertigungsprozess aufgebaut ist. Die vertiefende Aufteilung der einzelnen Funktionsgruppen auf Subsysteme und einzelne Bauteile wird nach Teilfunktionen, verschiedenen eingesetzten Materialien und Randbedingungen in der Fertigung vorgenommen. Zu diesen Randbedingungen zählen die geometrische Form des Systems und die Ableitung von herstellbaren Bauteilen, verfügbare Fertigungsverfahren und deren Aspekte, wie beispielsweise die maximale Werkzeuggröße und applizierbare Fügeverfahren. Durch die Modellierung der einzelnen Bauteile auf der untersten Produktmodellebene entstehen wiederum die verschiedenen Systeme und Funktionsgruppen. Die Konzeption einer Komponente, als Bestandteil eines mehrteiligen Systems, ist mit angrenzenden Bauteilen und Systemen abzustimmen, um eine den Anforderungen entsprechende Gesamtlösung umzusetzen. Ein Disziplin, welche sich hier in der Modellierung entwickelt hat, ist die geometrische Überprüfung des virtuellen Produktmodells ('Digital Mock-Up') zur baugruppenübergreifenden Abstimmung.

### Gestalten der maßgebenden Module

Bei Durchführung des fünften Arbeitsschrittes werden die zentralen Funktionseigenschaften durch eine grobe Gestaltung des Produktes abgesichert. Durch die konzeptionelle Gestaltung ist es möglich, die Lösungsgestalt systematisch zu variieren und Charakteristika des Lösungskonzeptes zu generieren.

Dieser Arbeitsschritt findet sich im Anwendungsbeispiel der Strukturentwicklung in der konzeptionellen Strukturauslegung und Optimierung wieder. Die Dimensionierung und Topologie von Bauteilen und Systemen sollte den funktionalen Ansprüchen und dem verfügbaren Bauraum entsprechen. Auf Basis spezifizierter Anforderungen an die Karosserie und verfügbarer Lösungsprinzipien werden Lösungen im Rahmen von digitalen Produktmodellen dargestellt.

Das Geometriemodell ist hierbei Träger von Information und impliziert die Resultate durchgeführter Untersuchungen, welche sich unter anderem in der geometrischen Form manifestieren. Die geometrische Modellierung beinhaltet nicht zwingend die Erfüllung von gestellten funktionalen Anforderungen, vgl. [182, S. 46]. Zur funktionalen Beurteilung der Geometriemodelle können rechnergestützte Simulationsmethoden eingesetzt werden, welche systematische Analysen und zielgerichtete Verbesserungsmaßnahmen unterstützen. Von simulationsgestützter Entwicklung wird gesprochen, sofern die Entwicklungsstufen eines Produktes direkt an die Ergebnisse aus der Berechnung und Simulation gebunden sind. Im Einzelnen geht es dabei um Teilaufgaben, wie die rechnergestützte Dimensionierung und Auslegung als Grundlage der Geometriefindung von Bauteilen, die Auswahl von Entwicklungsvarianten, sowie die berechnungsgestützte Optimierung und Absicherung der Produkteigenschaften [159, S. 35]. Die Absicherungen der funktionalen Eigenschaften werden zumeist nicht mit Werkzeugen des CAD-Systems abgeprüft. Obwohl in aktuellen Systemlandschaften Methoden zur funktionalen Beurteilung integriert sind, z.B. FE-Simulation [113], stellen spezialisierte und standardisierte Prozesse in CAE-Entwicklungssystemen die allgemeine Vorgehensweise zur virtuellen Abbildung und Beurteilung der physikalischen Eigenschaften von Bauteilen und Systemen dar, siehe Kapitel 2.2.2.

Meilensteine im Entwicklungsprozess spielen bei SE-Prozessen eine Rolle zur Synchronisierung von Simulationsergebnissen und deren Überführung in das Produktmodell. Der Konstrukteur hat Anforderungen der einzelnen Entwicklungsdisziplinen auf Bauteiltopologie und Anbindung in das geometrische Modell einzuarbeiten und in Bezug auf geometrische Integration und eine grundsätzliche fertigungstechnische Machbarkeit abzusichern. Die detaillierte Simulation des Herstellungsverfahrens und der Prozessparameter ist im Entwicklungsprozess meist erst in einer späteren Phase verfügbar.

### Gestalten des gesamten Produktes

Im Arbeitsschritt sechs der VDI-Richtlinie werden die konzipierten, funktional bestätigten Lösungen des VDI-Arbeitsschrittes fünf weiter detailliert, lokal optimiert und noch fehlenden Umfänge ergänzt. In diesem Arbeitspunkt findet die finale systemübergreifende Abstimmung statt.

In der Komponentenmodellierung ist die detaillierte Ausgestaltung des Konzeptmodelles vorzunehmen. Die durchgeführten vereinfachten Untersuchungen der prinzipiellen Machbarkeit sind durch vertiefende Analysen und konkrete Prüfungen zu erweitern. Parallel hierzu ist das Produktmodell weiter zu verfeinern und detailgetreu zu modellieren. Im Rahmen der Feinplanung ist auch die fertigungstechnische Machbarkeit zu bestätigen. Zu prüfende Randbedingungen hängen von der eingesetzten Fertigungs- und Fügetechnologie ab. In modernen CAD-Systemen sind integrierte Werkzeuge [100, S. 11ff] zur Beurteilung und Simulation der Fertigung Stand der Technik. Beispielsweise können Bauteile, welche durch ein Tiefziehverfahren hergestellt werden, bezüglich machbare Wandstärken, Entformungsrichtung, zulässiger Tiefziehweg in Bezug Bauteiltopologie, sowie auf die Analyse von Hinterschnittbereichen und erforderliche Entformungswinkel geprüft werden. Weiters können Fertigungssimulationen und Abläufe anhand integrierter Schnittstellen direkt an fertigende Maschinen, beispielsweise NC-Maschinen übergeben werden [93, S. 166].

Aufbauend auf der Bandbreite an Modellierungsfunktionen in modernen CAD-Systemen können Methoden zur strukturierten Modellgestaltung erarbeitet werden. Definierte Erstellungsmethoden können den Zeitaufwand und die Stabilität der Geometrie positiv beeinflussen. Um eine standardisierte Vorgehensweise in Bauteilmodellen zu erreichen, gibt es in der Automobilbranche Konstruktionsrichtlinien, welche sich von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden. Die Vorgaben können beispielsweise anzuwendende Startmodelle [98, S. 318], die Strukturierung geometrischer Elemente, gesetzte Einstellung des Autorensystems, die Anforderung parametrischer Modelle bei Datenübergabe, Qualitätskriterien oder Regeln zur Bemaßungs- und Zeichnungsableitung betreffen. Die Einhaltung der Vorgaben kann anhand von Werkzeugen automatisiert abgeprüft werden (z.B. Q-Checker[180]).

Konstruktionsstandards können als Leitplanken im Konstruktionsprozess verstanden werden, um das Spektrum der verfügbaren Möglichkeiten in einen strukturierten Rahmen überzuführen und um durchgängige Prozesse schaffen zu können. Anhand der spezifischen Erstellungsmethodik wird die Transparenz und Nachvollziehbarkeit von geometrischen Modellen verbessert und die Übergabe eines Modelles vom Ersteller an weitere Bearbeiter vereinfacht.

## Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsbereiche

Im abschließenden Arbeitsschritt der VDI-Richtlinie 2221 wird die Dokumentation des entwickelten Produktes umgesetzt. Dies beinhaltet die Anleitung bezüglich Fertigung, Qualitätsprüfung, Logistik und Inbetriebnahme. Die Datenhaltung des Produktmodells findet in modernen Entwicklungssystemen anhand von PDM- und TDM-Systemen statt. Anhand dieser Systeme können auch beschreibende Daten zentral und strukturiert hinterlegt werden, wie beispielsweise Konstruktionszeichnungen, Bauteildatenblätter, Metadaten, Kostenkalkulationen, sowie Stücklisten. Anhand dieser Datenmanagementsysteme können unterschiedliche Entwicklungssysteme versorgt werden, beispielsweise durch integrierte Schnittstellen für Finite Elemente Pre-Processoren [3], und somit eine Datenkonsistenz in der Entwicklung und Dokumentation erreicht werden.

### 2.4.2 Angewandte Konstruktionsmethoden

Ein Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation umfasst die Weiterentwicklung der Konstruktionsmethoden und vertieft sich in den zuvor beschriebenen Kapitel zur Gestaltung der maßgebenden Module und des gesamten Produktes nach der VDI-Richtlinie 2221. Der übergeordnete Begriff Methodik meint eine planmäßige Vorgehensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Berücksichtigung von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln vgl. [57, S. 142]. Die Analyse und Bewertung von existierenden Konstruktionsmethoden bildet die Grundlage zur Weiterentwicklung der Konstruktionsmethoden im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Methoden nach dem Stand der Technik in der Konstruktion sind in der VDI-2209 Richtlinie zusammengefasst.

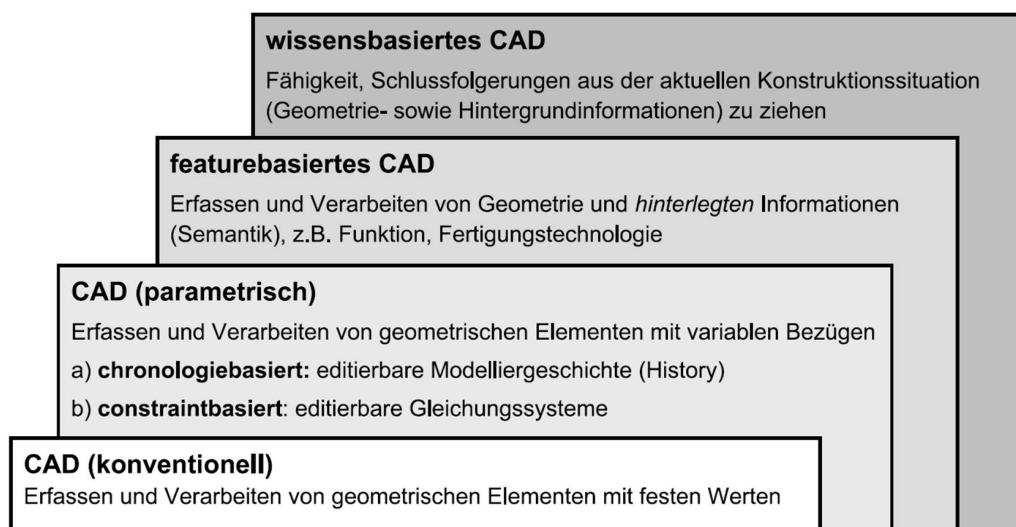


Abbildung 2.18: Methoden in der Konstruktion nach VDI-2209 [184, S. 13]

**Konventionelle Konstruktion**

Unter konventioneller Konstruktion wird die Modellierung von Objekten ohne Berücksichtigung spezieller Möglichkeiten und Methoden verstanden. Im Gegensatz zur parametrisch assoziativen Konstruktion werden geometrische Objekte nicht miteinander logisch kombiniert. Es findet ein zeitlich begrenzter Informationsübertrag von einem Objekt auf ein Neues statt, ohne eine Relation zu erzeugen.

Ältere Systeme, beispielsweise CATIA V2 bis V4 [46] erfüllten den Funktionsumfang der Parametrik nicht, oder nur teilweise. In diesen Systemen wird die Definition der Eigenschaften der geometrischen Objekte zu Erstellungsbeginn abgefragt, die geometrische Repräsentanz berechnet und ohne weitere Möglichkeit zur Modifikation abgelegt. Diese Vorgehensweise ist als direkte Modellierung bekannt [184, S. 38].

Die direkte Konstruktion bringt Vorteile in Bezug auf Stabilität, da Elemente nicht auf einer logischen Kette beruhen. Es ergibt sich hierbei keine Abhängigkeit eines initial gewählten Referenzobjektes zu nachgelagerten Objekten. Ein Beispiel ist die Erzeugung einer Linie zwischen zwei Punkten, wobei die beiden Punkte bereits als Geometrie vorliegen. Der Aufbau der Linie geschieht durch Zuweisung der beiden Punkte, Übergabe der Positionseigenschaften der Punkte und Generierung der Linie. Nach Löschen der Punkte bleibt die Linie erhalten. Ein Vorteil dieser Methode ist der reduzierte Aufwand zur Darstellung einer Lösung, da der Arbeitsaufwand zur Definition der Parametrik und Pflege der Relationen entfällt. Nachteilig ist, dass bei nachträglicher Modifikation von Geometrie Elemente neu erzeugt werden müssen.

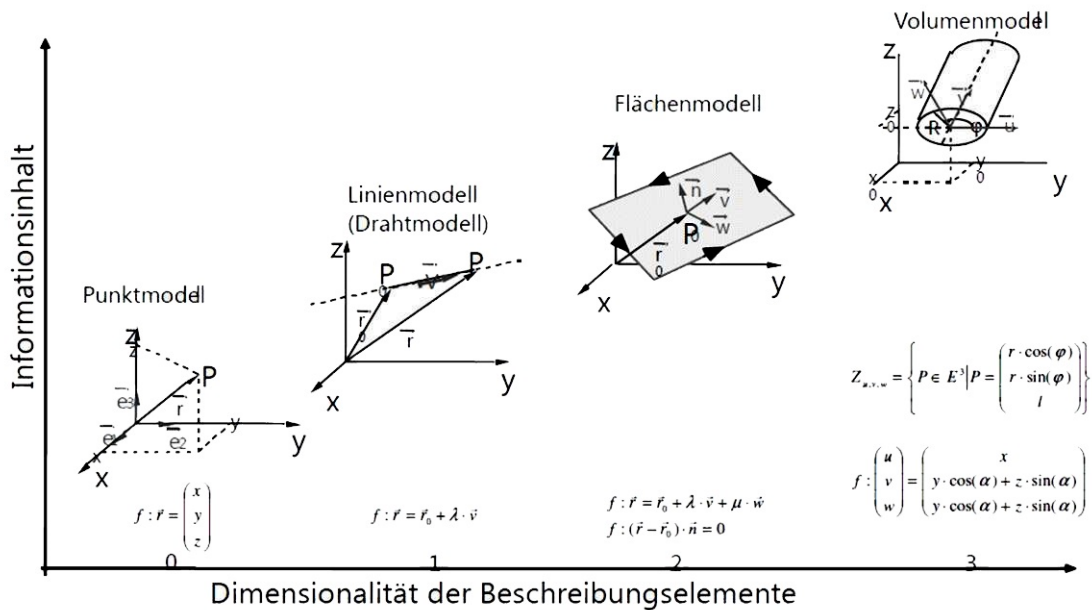


Abbildung 2.19: Strukturierung von geometrischen Objekten nach Dimension und Informationsgehalt [7]

Der Aufbau von rechnergestützter Geometrie kann hierarchisch eingeteilt werden, siehe Abbildung 2.19. Die Basis bilden punktförmige Elemente, auf welchen Drahtgitterelemente ('Wireframe') aufgebaut werden können. Drahtgitterelemente können zur Erzeugung von Flächenelementen ('Surface') genutzt werden. Die letzte Ebene bilden Volumenkörper ('Solide'), welche durch 'Primitives', Drahtgitter, oder Flächen erzeugt werden können.

Bekannte Modellarten sind Kanten- oder Linienmodelle ('Wireframes'), flächenbasierte ('Surface'/'Sheet') und volumenbasierte ('Solid') Ansätze. Eine Sonderstellung nehmen Atom- oder Zellenmodelle ('Voxelmodelle') ein. Zellenmodelle stellen eine Ansammlung von Volumenelementen dar, welche in keinem logischen Zusammenhang stehen. Diese Modelle werden als Ableitung aus den vorher aufgezählten Modellarten erzeugt und dienen zur rechenaufwandsoptimalen Darstellung von Volumenmodellen, beispielsweise als DMU-Rechenmodelle oder Fertigungsmodelle [184, S. 23]. Um eine Volumengeometrie zu generieren, können generative (prozedurale) oder kumulative (deskriptive) Geometriemodelle angewendet werden [184, S. 25].

Für parametrische Methoden korreliert die Dimension von geometrischen Objekten nach Abbildung 2.19 negativ mit der Modellstabilität. Dies zeigt sich in den zu erfüllenden Bedingungen für Volumenkörper. Beispielsweise kann ein Volumenkörper auf Basis abgeschlossener Flächenhüllen unter der Bedingung ( $A_{opt} \cdot B = c_0 - stetig$ ) oder durch Aufdicken von punkt- oder tangentialstetigen ( $c_1$ ) Basisflächen erzeugt werden. Eine verbesserte Stabilität kann durch Modellierungsrichtlinien, den Fokus auf geeignete geometrische Funktionen und den Verzicht von Volumenkörpern für bestimmte Anwendungen erreicht werden. Für die Konzeptphase bieten sich grundsätzlich Flächenmodelle an, welche auf parametrisierten Linienmodellen aufbauen, um die gewünschte Stabilität bei gleichzeitig hoher Flexibilität zu erreichen. Durch eine Verlagerung von operationalen Funktionen (Beschnitt, Verbindung...) von der Volumen- bzw. Flächenebene auf Kantenmodelle kann die Modellstabilität verbessert werden.

Der Funktionsumfang der Parametrik hielt sukzessive Einzug in die CAD-Systeme und führte teilweise zu hybriden Lösungen. Beispielsweise wurden in der Version V4 des Konstruktionsprogrammes CATIA parametrische Steuerungsmöglichkeiten zum Teil eingebettet. Bei der Nutzung von Funktionen im Solid-Strukturbaum können spezifische Werte, wie Abstandsdefinitionen, hinterlegt und das Volumenmodell kann zum Teil parametrisch adaptiert werden. Auch in modernen parametrisch assoziativen Konstruktionsprogrammen kann auf konventionelle Weise konstruiert werden, beispielsweise in der Skizzenmodellierung (CATIA V5 'Sketch') oder durch die Isolation parametrisch erzeugter Objekte.

### **Parametrisch-assoziative Konstruktion**

Parametrisch-assoziatives Arbeiten beinhaltet neben den im Modell abgespeicherten und editierbaren Parametern auch Konstruktionsbedingungen und Abhängigkeiten. Diese können in Form von modellübergreifenden Links, bauraumabhängigen Parametern oder Verknüpfungen mit Freiformflächen vorliegen [78, S. 45]. Anhand von Parametern können die formgebenden Werte für die geometrische Ausprägung auf transparente Weise gesteuert werden. Durch Verknüpfung der Parameter können unterschiedliche geometrische Objekte in Verbindung gesetzt, und die gewünschte Assoziativität systembasiert angelegt werden. Kennzeichnend für parametrische Systeme ist die Generierung und Verwaltung von logischen Beziehungen ('Constraints') zwischen Elementen [184, S. 14].

Parameter können als Objekte zur Wertdefinition nach VDI [184, S. 40] in geometrische, physikalische und Prozessparameter eingeteilt werden. Die Möglichkeit zum parametergesteuerten Aufbau von Bauteilen anhand assoziativer Konstruktion wird in gängigen CAD-Systemen angeboten. Dieser Ansatz ermöglicht die Änderung eines bestehenden Bauteils an neue Anforderungen in geometrisch definierten logischen Grenzen. Die Basis zur effektiven Nutzung dieser Möglichkeit ist die Gestaltung einer zielorientierten Konstruktionsmethodik. Die theoretischen Vorteile der Parametrik können in der Praxis bei komplexen Bauteilen und Systemen aufgrund von Geometriefehlern [173, S. 593] nur begrenzt genutzt werden. Darunter fällt auch die Administration von Parametern und die Kontrolle der logischen Operationen. Die Erzeugungsstruktur eines Bauteils ist ein logischer Prozess, bei welchem Objekte sequentiell miteinander kombiniert werden. Die Sicherstellung des geometrischen Resultats auf Basis der logischen Kombination unter Veränderung von Parametern bedarf eines nicht unbeträchtlichen Aufwandes, welcher bei der Bauteilerstellung berücksichtigt werden muss.

Bei der Parametrierung von Geometrie spielt die Kenntnis des Lösungsraumes von Funktionen eine wesentliche Rolle. Jede einzelne Funktion trägt zur Bestimmung des gültigen Parameterraum zur Variation bei, welcher den Mehrwert von parametrischer Konstruktion kennzeichnet. Zu den weniger stabilen Funktionen zählen beispielsweise operationale Funktionen, wie Verschneidungen ('Intersection'), Beschnittfunktionen ('Split'), kombinierte Beschnitt- und Verbindungsfunktionen ('Trim'), flächenkantenbasierende Operationen ('Edgefillet') und nicht objektbasierte Referenzierung ('Vertex', 'BRep'). Die Kenntnis der einzelnen Spezifika parametrisch assoziativer Funktionen und der Substitution von weniger stabilen Funktionen kann zu stabilen parametrischen Modelle beitragen.

Zwei Ansätze der stabilen Modellierung und Adaption stellen die übergeordnete Referenzierung des Bauteils im Koordinatensystem und der Fokus zur Parametrisierung im Rahmen der Konstruktionsabsicht dar [108, S. 53]. Anhand der übergeordneten Referenzierung auf ein zentrales verschiebbares Objekt, beispielsweise ein weiteres Koordina-



tensystem, kann die Lage des Bauteils im Raum vereinfacht adaptiert werden. Anhand inhärenter Parametrisierung im Bauteil kann eine Adaption des Bauteils in sich erfolgen. Benötigt wird diese Methode unter folgenden Aspekten: Die einzelnen Bauteile werden auf Basis eines raumfesten Koordinatensystems modelliert. Dieses Ausgangskordinatensystem liegt in der Fahrzeugentwicklung in der Regel im Bereich der Vorderachse. Sofern eine Verschiebung eines Bauteils erforderlich ist, kann die Geometrie des Bauteils relativ zum global fixierten Koordinatensystems im Produkt verschoben werden.

### **Featurebasierte Konstruktion**

Der Begriff der featurebasierten Konstruktion entwickelte sich von einer fertigungsbezogenen Bedeutung in Richtung einer universellen Verwendung in der Konstruktion [185, S. 5]. Heute sind 'Features' im allgemeinen Fall folgendermaßen definiert: *Features sind informationstechnologische Objekte, die Bereiche von (besonderem) technischen Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen* [194, S. 109/116]. Der Begriff 'Feature' findet vielfältige Anwendungen, beispielsweise als Berechnungs-, Mess-, Konstruktions-, Fertigungs- oder Kostenkalkulationsfeature. Die Gemeinsamkeiten der jeweiligen Anwendungen können folgend zusammengefasst werden: *Ein Feature wird durch eine Aggregation von Eigenschaften eines Produkts beschrieben. Die Beschreibung beinhaltet die relevanten Eigenschaften selbst, deren Werte sowie deren Relationen und Zwangsbedingungen ('Constraints')* [185, S. 11].

In der geometrischen Modellierung kann ein Feature nach dieser Definition als ein Baustein verstanden werden, welcher Geometrie, Parameter, Relationen, Funktionen, Funktionsketten und Regeln beinhalten kann. Der Nutzen ergibt sich aus der beschleunigten Wiederverwendung von einzelnen Bausteinen in der Entwicklung, welche in Konstruktionsmodelle eingebettet werden können. In diesem Zusammenhang kann ein Feature als Funktionsobjekt in der wissenbasierten Konstruktion betrachtet werden.

In CAD-Systemen existieren eigene Funktionsumfänge zur wiederkehrenden Handhabung von geometrisch abgeschlossenen Modulen; diese sind beispielsweise unter der Bezeichnung 'Powercopies' [114, S. 48] oder 'User-Defined-Features', [183, S. 423] bekannt. Es gibt unterschiedliche Zustände der 'Features' für die Übertragung. Die aggregierten Objekte können offen und modifizierbar weitergeben werden und erlauben so eine Flexibilität in der Entwicklung. Von gekapselten Features kann gesprochen werden, falls diese in sich geschlossene Objekte sind, bei welchen nur Referenzen ausgetauscht werden. Diese können in einer Zieldatei nicht adaptiert werden. Durch die Nutzung unveränderlicher Funktionselemente kann die Gestaltung von standardisierten Funktionsumfängen umgesetzt werden.

### **Wissensbasierte Konstruktion**

In der wissensbasierten Konstruktion werden Berechnungen physikalischer und funktionaler Zusammenhänge oder Systemanforderungen in die Bauteilauslegung eingebettet. Nach VDI wird die Anwendung von geometrischen sowie nicht-geometrischen Regeln und Prüfungen in der wissensbasierten Parametrik verstanden [184, S. 43]. Die Integration von Wissen in geometrische Modelle kann anhand von definierten Auslegungsschritten, Berechnungsformeln, Richtlinien oder Reaktionen umgesetzt werden.

Das Ziel von wissensbasierten Modellen besteht in einem erhöhten Reifegrad der funktionalen Auslegung und reduziertem Aufwand zur Recherche und Lösungsgestaltung. Darüber hinaus besteht das Potential, dass generierte Lösungen früher in den Entwicklungsprozess eingebracht werden können. Anhand von Methoden des Wissensmanagements können bestehende und neue Auslegungsroutinen und Abläufe dokumentiert und standardisiert werden. Generelle Schritte des Wissensmanagements sind Wissensidentifikation, Wissenserwerb, Wissensentwicklung, Wissensverteilung, Wissensnutzung und Wissensbewahrung [190, S. 74].

Wissensbasierte Auslegungswerkzeuge werden in der Automobilbranche oftmals durch firmeninterne Forschungsprojekte, Arbeitskreise oder wissenschaftliche Projekte erarbeitet. Falls erarbeitete Lösungsmethoden von allgemeinem Interesse sind, finden diese Werkzeuge (z.B. CAVA [179], RAMSIS [103]) Eingang in kommerzielle Softwarevertriebe oder werden als Richtlinien publiziert (z.B. GCIE [77]).

Eine Herausforderung in der Gestaltung wissensbasierter Methoden und Modelle stellt die Verwendbarkeit im Rahmen geänderter Fragestellungen dar. Die Definition von grundlegenden Zusammenhängen und Steuerungsmöglichkeiten ist bei der Realisierung von wissensbasierten Lösungen umzusetzen. In der vorliegenden Arbeit wird vorgeschlagen die Implementierung von Wissen in Produktmodelle in drei Schwerpunkte zu unterteilen:

- Technisches Wissen zur funktionalen Auslegung
- Prozedurbasiertes Wissen, sowie dessen Einfluss und Steuerung
- Kenntnis von verfügbaren Methoden in bestehenden Entwicklungsumgebungen und Wissen bezüglich der spezifischen Eignung

In der methodischen Konzeption von wissensbasierten Produktmodellen ist die passende Methode für die technische Fragestellung zu erarbeiten und anhand von verfügbaren Ressourcen umzusetzen. Die Einbeziehung von prozeduralen Effekten bedeutet die Implementierung von Steuerungsmöglichkeiten und systematische Betrachtung von Eingabe- und Ausgabeinformation. Verfügbare Ansätze zur Umsetzung von wissensbasierten Produktmodellen sind beispielsweise Makros, Skripte, Regeln, User-Defined-Features, Tabellen und Tabellenkalkulationen [79, S. Y21].

### 2.4.3 Modellierungsmethoden in der Konzeptauslegung

#### Anforderungen an das Produktmodell im Entwicklungsprozess

Eine Herausforderung in der Konstruktion besteht in sich ändernden Anforderungen während des Entwicklungsprozesses. Zwei gegenläufige Anforderungen bestehen im erforderlichen Detaillierungsgrad und in der Flexibilität der geometrischen Adaption, siehe Abbildung 2.20.

In der initialen Projektphase ist eine hohe geometrische Flexibilität und eine geringere Detaillierung erforderlich. In dieser Phase vereinfacht eine Parametrierung der Produktmodelle auf Systemebene die Konzeptdarstellung und Variation der Systemparameter. Re-

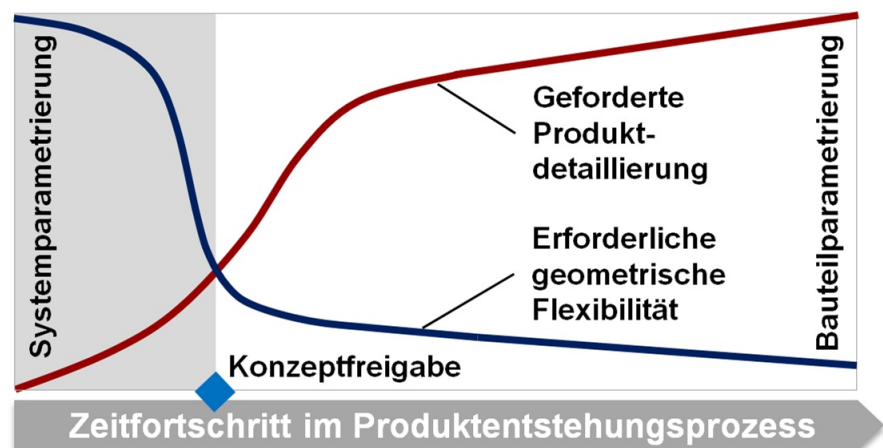


Abbildung 2.20: Erforderliche geometrische Flexibilität und Detaillierungsgrades über dem Zeitfortschritt des Entwicklungsprozesses

levante Einflussparameter und deren Varianz können anhand der Produktmodelle bewertet und das Lösungskonzept bis Konzeptfreigabe optimiert und bestätigt werden. Eine hohe Detaillierung würde in dieser Phase die machbare Änderung des Bauteiles vermindern. Daher spielt die spezifische Bauteilparametrierung in dieser Phase nur eine untergeordnete Rolle. Hier zeigen spezielle Konzeptentwicklungswerkzeuge Vorteile gegenüber der regulären Handhabung von Modellen in nativen CAD-Systemen. Mit fortlaufendem Projektfortschritt ist eine erhöhte Detaillierung und eine geringere geometrische Flexibilität erforderlich. Die Parametrierung der Produktmodelle findet hierbei zunehmend auf Bauteilebene statt. Hier bieten native CAD-Systeme durch einen hohen Funktionsumfang zur finalen Detaillierung Vorteile. Der Übergang von der Systemparametrierung zur Bauteilparametrierung muss nicht durch einen speziellen Meilenstein festgelegt sein und kann fließend dargestellt werden. Die Zielvereinbarung stellt die Fixierung des Gesamtkonzeptes als Ergebnis der Konzeptphase dar, auf welchem die detaillierte Serienkonstruktion aufsetzt, welche mit der Konzeptbestätigung abschließt.

Modellierung anhand nativer CAD-Systeme - CATIA V5

Anhand nativer CAD-Methoden lassen sich Geometriemodelle in unterschiedlichem Detaillierungsgrad gestalten, wobei der Funktionsumfang primär für die vollständige Ausgestaltung von Produktmodellen konzipiert ist. Detaillierte Konstruktionsmodelle zeigen, trotz Parametrisierung, in der Handhabung einen eingeschränkten Spielraum zur Variation. Die Gestaltung von detaillierten CAD-Modellen erfolgt nicht standardisiert und unterliegt dem individuellen Einsatz der vielfältigen Funktionen zur Erzeugung von geometrischen Elementen. Dies betrifft auch die Parametrierung des Modelles und damit verbunden die Modellflexibilität. Grundsätzlich ist eine vollständige stabile Parametrierung bei detaillierten geometrischen Modellen mit zusätzlichem Erstellungsaufwand verbunden. In der nativen Konstruktion werden unterschiedliche Einflussfaktoren in der Regel getrennt bearbeitet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass jeder Einflussfaktor auf unterschiedliche Weise zu abstrahieren ist. Die einzelnen Aspekte werden im Bauteilmodell als geometrische Objekte verarbeitet und über eine hierarchische Struktur miteinander kombiniert, siehe Abbildung 2.21.

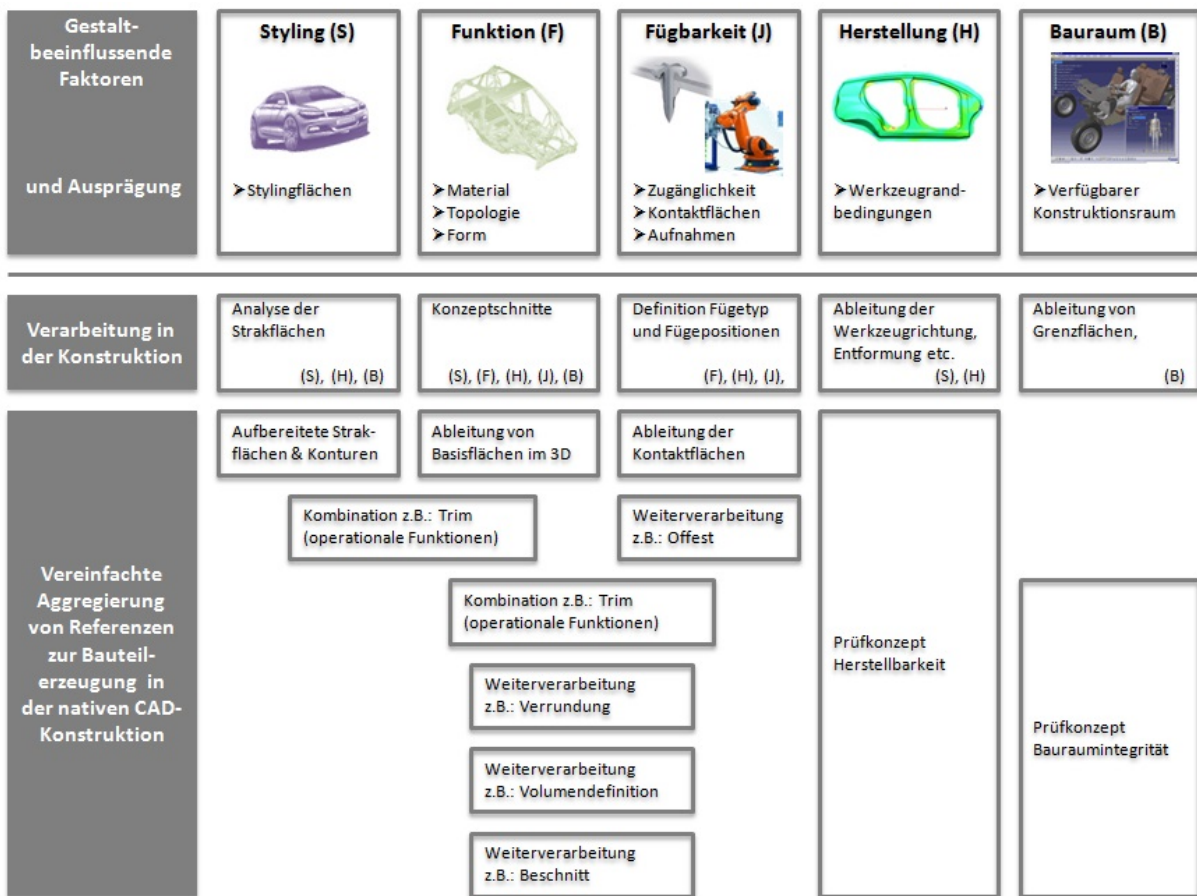


Abbildung 2.21: Vereinfachte Aggregation von unterschiedlichen Einflussfaktoren im Rahmen nativer Konstruktionsprozesse

Durch keine hierarchische Definition von Abhängigkeiten zwischen geometrischen Objekten in nativen CAD-Systemen ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten zur Kombination einzelner Elemente. Dies führt auf der einen Seite zu keiner definierten Methode und Abfolge in der Konstruktion, auf der anderen Seite ermöglicht es eine hohe Flexibilität in der Modellierung. Die Gestaltung von neuen Produktkonzepten in der Strukturentwicklung wird, ergänzt durch den umfangreichen Modellierungsumfang, daher nur in geringem Maße eingeschränkt.

Aufgrund der getrennten Bearbeitung von unterschiedlichen Referenzen müssen Änderungen die definierte logische Struktur durchlaufen, um das Resultat einer Änderung prüfen zu können. Änderungen können aufgrund einzelner Faktoren eingeschränkt sein, beispielsweise werden in der detaillierten Konstruktion Komponenten auf nicht parametrisierte Referenzflächen, wie Stylingkonturen oder Anlageflächen, siehe Abbildung 2.22, aufgebaut. Die eingeschränkte geometrische Flexibilität von detaillierten CAD-Produktmodellen kann alternativ in nachgelagerten Entwicklungsschritten, beispielsweise durch Morphing in der Finite-Elemente Modellaufbereitung, teilweise kompensiert werden. Dies bedeutet zusätzliche Arbeitsschritte zur Präparation der FE-Modelle, da die zu steuernden Parameter im CAE-Modell zu definieren und Grenzen in der Adaption von FE-Netzen zu beachten sind.

Die Anwendung von systematischen Vorgangsweisen in der nativen Konzeptkonstruktion ist erforderlich, um komplexe Produktmodelle, wie gesamte Fahrzeugstrukturen, anhand nativer Systeme darzustellen. Hierbei sind die Anforderungen von reduziertem Erstellungsaufwand und hoher Modellflexibilität zu berücksichtigen. In Kapitel 3.1.1 wird auf ein solches Konzept im nativen Autorensystem eingegangen.

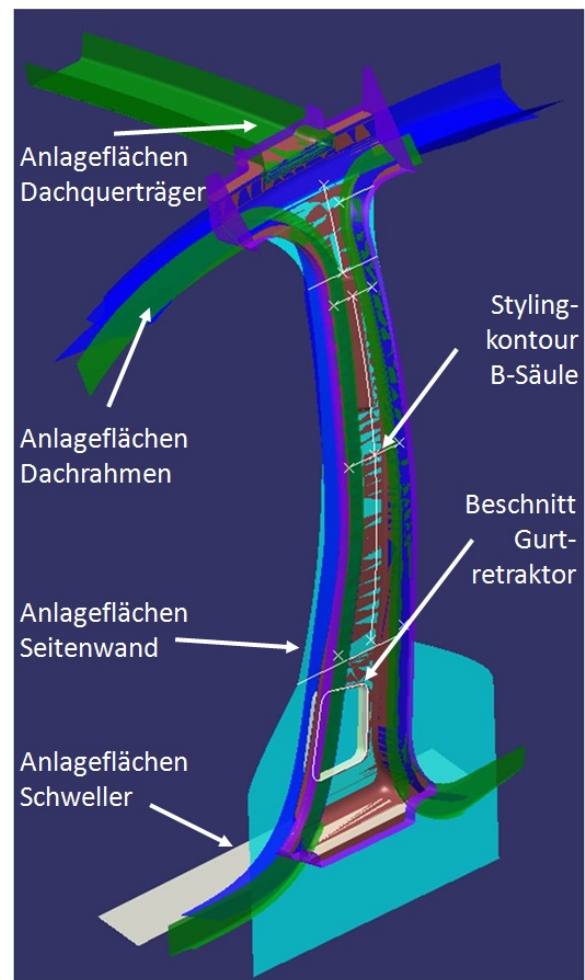


Abbildung 2.22: Nicht assoziative Referenzflächen und -konturen eines detaillierten Modells einer B-Säule in CATIA V5

### Modellierung anhand spezialisierter Werkzeuge - Fast Concept Modeler (FCM)

Das Werkzeug 'Fast Concept Modeler' (FCM) [37] ist eine Erweiterung des Autoren-systems CATIA V5 und stellt vereinfachte Geometriefunktionen für eine parametrische Modellierung in der Konzeptphase zur Verfügung. Die Flächenoperationen, welche durch den 'Fast Concept Modeler' zur Verfügung gestellt werden, orientieren sich hierbei stark an der Stahl-Schalenbauweise im Automobilbau.

Die Vorgehensweise zur Geometrierstellung setzt sich aus dem Aufbau eines Skeletts, der Definition der Konzeptschnitte und der Erstellung der Flächenrepräsentation zusammen, siehe Abbildung 2.23. Durch die hierarchische Vorgangsweise wird ein Beitrag zu einer transparenten Modellstruktur geleistet. Die zur Flächenerstellung erforderlichen Hilfsgeometrien werden im finalen geometrischen Objekt aggregiert, wodurch der Strukturbaum vereinfacht wird. Dies ist besonders für umfangreiche Modelle von gesamten Systemen von Relevanz. Die vereinfachte Bauteildarstellung und Pa-

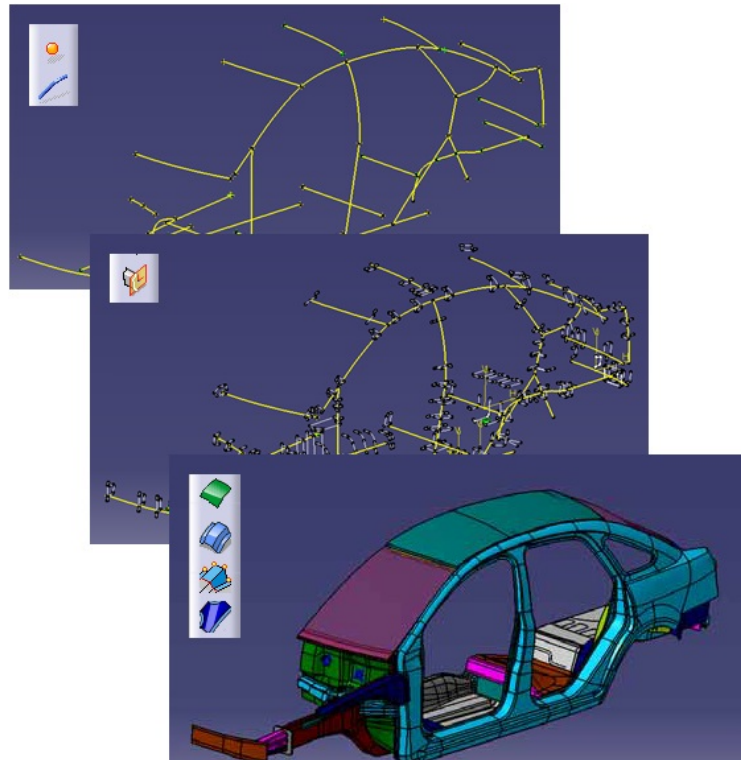


Abbildung 2.23: Darstellung der hierarchischen Vorgehensweise in der Geometrierstellung anhand des 'Fast Concept Modeler' (FCM) [155, S. 7]

rametrierung des FCM-Modelles stellen einen weiteren Aspekt für flexible Änderungen des Produktmodelles dar. Verfügbare Stellparameter sind die Form und Lage des Skeletts und die Dimensionierung der Bauteilschnitte. Die Form der Flächen kann über Führungskurven adaptiert werden, wobei komplexere Bauteilformen nur stark eingeschränkt dargestellt werden können. Alternative Strukturbauweisen, wie Aluminium-Spaceframe oder Faserverbundbauteile sind durch Funktionen des FCM nicht einfach darstellbar. Die verfügbaren Flächenoperationen beschränken sich auf Grundfunktionen und zeigen eine starke Redundanz zu Geometriefunktionen, welche in CATIA V5 verfügbar sind, wobei die geometrische Stabilität der Basissoftware nicht erreicht wird, siehe Kapitel 4.2.

Die erzeugten Flächen werden nachgelagert zu Bauteilen zusammengefasst und mit Bauteileigenschaften versehen. Hierzu zählen die eindeutige Property ID (PID), Wandstärken und Materialien, sowie Einstellungen für die nachfolgende Bauteilvernetzung, wie die gewünschte Elementkantenlänge [155, S. 8]. Zur Berechnung von Systemeigenschaften ist zusätzlich die Definition der Abhängigkeiten der Bauteile zueinander erforderlich, welche durch die Deklaration der Fügechnik, sowie der Lasten und Einspannungen erfolgt.

Eine durchgängige Datenübergabe zwischen Konstruktionsstand und Simulationsmodell vereinfacht eine Optimierung von Systemeigenschaften. Das generierte Strukturmodell kann anhand des FCM über Batchprozesse vernetzt und das Netz im CAD-System visualisiert werden [155, S. 14].

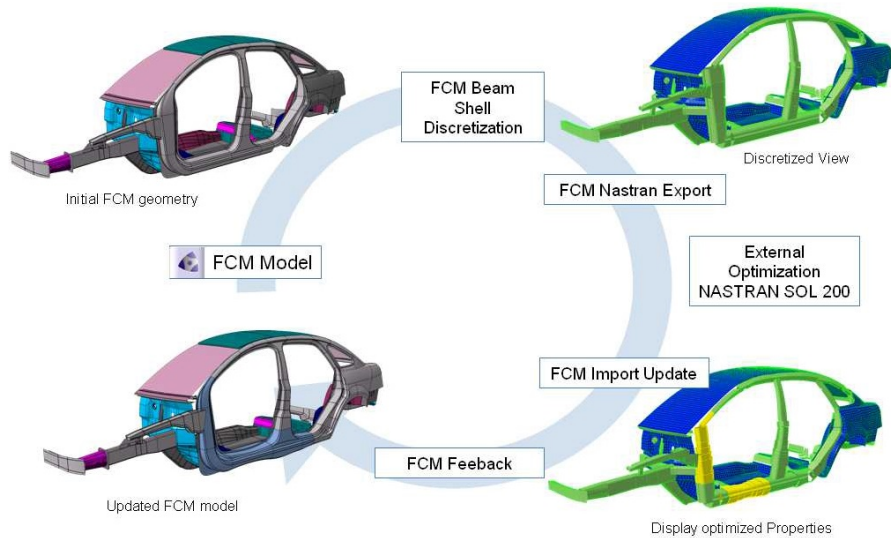


Abbildung 2.24: Darstellung des durchgängigen Optimierungsprozesses anhand des 'Fast Concept Modeler' (FCM) [156, S. 18]

Anhand des FCM-Modelles können explizite als auch implizite FE-Analysen, sowie lineare Optimierungen und nicht-lineare Simulationen mit Daten versorgt werden [156, S. 17]. Der 'Fast Concept Modeler' unterstützt neben der Datenversorgung auch den Import von geometrisch optimierten Bauteilen aus der Simulation, siehe Abbildung 2.24.

Das Gesamtkonzept des 'Fast Concept Modeler' erfüllt grundsätzliche Anforderungen für die Strukturentwicklung in einer frühen Phase. Durch die Integration des FCM in ein natives CAD-System werden zusätzliche Systembrüche vermieden. Die final generierten Flächen können in ihrer Dimension und räumlichen Ausprägung als Referenz für die detaillierte Konstruktion herangezogen werden. Nachteilig erweist sich die eingeschränkte Auswahl von verfügbaren geometrischen Funktionen, welche eine Technologieabhängigkeit zur Stahl-Schalenbauweise in der Strukturentwicklung aufweisen. Zur Darstellung alternativer Strukturkonzeptes sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Der Vergleich verschiedener Strukturbauweisen im Rahmen einer Konzeptentwicklung ist anhand des FCM nur eingeschränkt möglich und kann zu Lösungen mit geringerem Innovationsgehalt führen.

**Modellierung anhand spezialisierter Werkzeuge - SFE CONCEPT**

Das Softwareprogramm SFE CONCEPT [160] zielt ebenso wie der FCM auf die Integration von Geometrieerzeugung und simulationsbasierter Strukturentwicklung in der Konzeptphase ab. Die verfügbaren Modellierungsfunktionen in SFE CONCEPT zeigen ebenfalls eine hohe Eignung für eine Stahl-Schalenbauweise in der Strukturentwicklung. SFE CONCEPT ist als 'Stand-Alone'-Lösung verfügbar und verfügt seit 2013 über eine Integration in das native CAD-System CATIA V5 [204]. Sofern SFE CONCEPT nicht als integrierte Lösung verwendet wird, sind zusätzliche Maßnahmen zur Synchronisierung verschiedener geometriebasierter Entwicklungsprozesse erforderlich. Ein Ansatz hierzu ist die Ausleitung des verfügbaren Bauraumes für die Strukturentwicklung und der fortlaufenden Anpassung der zulässigen Grenzen [51, S. 414].

Die Geometrieerstellung ist nach einem stark hierarchischen Ansatz aufgebaut, siehe Abbildung 2.25. Initiales Objekt ist der Geometriepunkt, welcher als Basis für Basislinien (Verbindungslinien) und Basiskontouren (Bauteilschnitte) dient. Nachfolgend werden flächige geometrische Objekte wie Balken, Verbindungen und Membranflächen erzeugt. Die Eigenschaften der einzelnen Elemente werden über die Hierarchiestufen auf die nächste Bearbeitungsebene vererbt [122, S. 16] und vereinfachen die Modellaufbereitung für die Simulation.

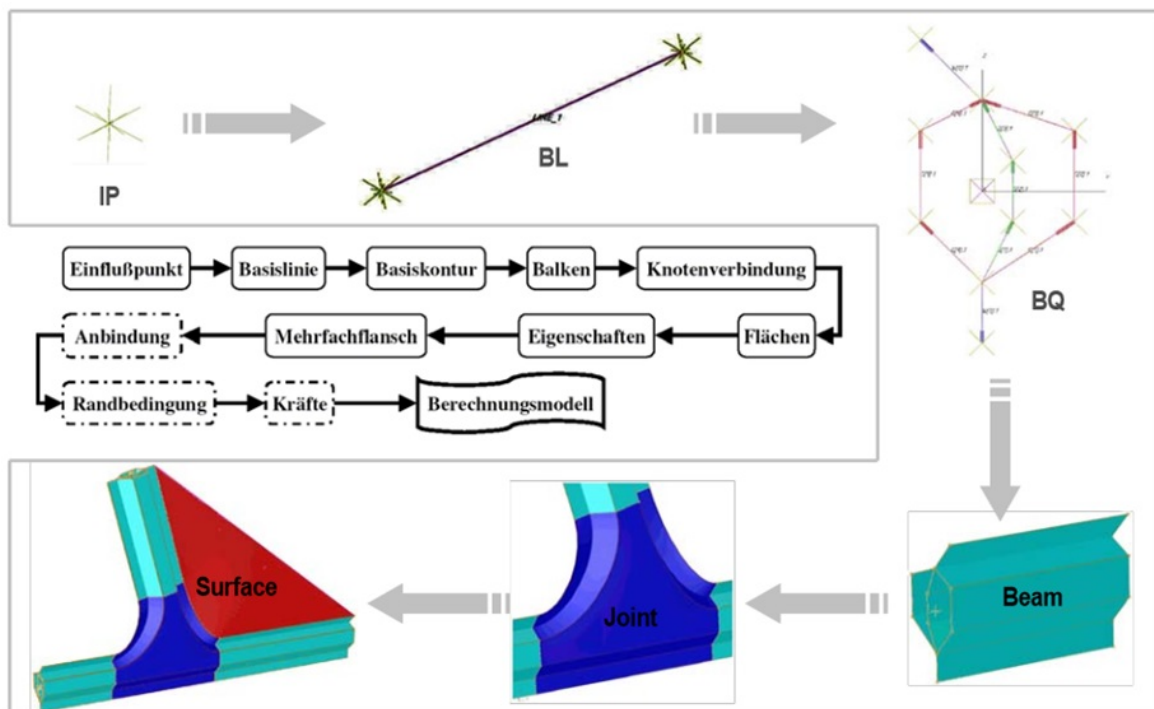


Abbildung 2.25: Geometrieerstellungsprozess anhand SFE CONCEPT [122, S. 16]



Die enge Verzahnung von impliziter parametergesteuerter Geometrie [51, S. 416] und berechnungsrelevanter Information anhand von SFE CONCEPT eignet sich für eine effiziente Formoptimierung [101, 50]. Der Durchlauf des Optimierungsprozesses, siehe Abbildung 2.26, kann im ersten Schritt vom verfügbaren Bauraum gestartet werden. Aus dem verfügbaren Bauraum und definierten Grundlastfällen kann eine erste Topologieoptimierung [158, S. 213] begonnen werden. Diese muss nicht zwangsläufig anhand von SFE durchgeführt werden, sondern kann durch weitere Entwicklungswerkzeuge der Berechnungslandschaft, beispielsweise Optistruct [5], durchgeführt werden. Aus diesem Optimierungsmodell resultiert eine erste Materialverteilung, welche aus den definierten Lasten und eingestellten Kriterien, wie beispielsweise geringe Masse und hohe Steifigkeit, ermittelt wird.

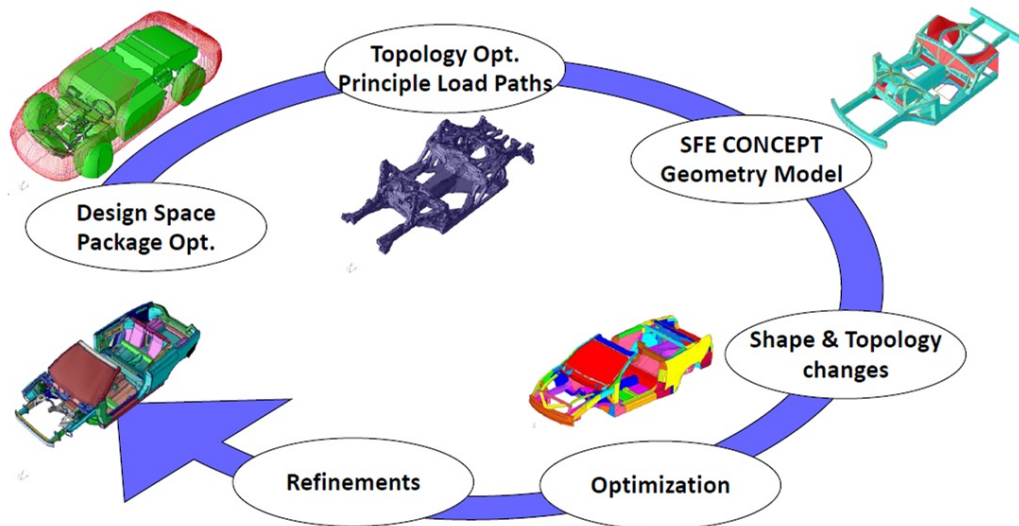


Abbildung 2.26: Prozess der kombinierten Form- und Topologieoptimierung anhand SFE CONCEPT [50, S. 31]

Auf Basis des Strukturvorschlages kann anhand von SFE CONCEPT ein Strukturmodell konstruiert werden, welches als Grundlage für die folgende rechnerbasierte Form- und Topologieoptimierung dient. Auf den Prozess der Strukturoptimierung wird in Abbildung 2.27 genauer eingegangen. Hierzu können die erzeugten Flächengeometrien in Form eines FE-Netzes, sowie die Rahmenbedingungen direkt an einen FE-Solver übergeben werden [50, S. 29]. Nach der numerischen Berechnung des aktuellen Strukturmodelles werden die generierten Output-Files und relevanten Kriterien anhand eines Optimierers ausgewertet, welcher auch die definierten und publizierten Designvariablen systematisch variiert. Sofern die veränderten Designvariablen eine konsistente Lösung ergeben, kann das geänderte Berechnungsmodell aktualisiert, für eine weitere Berechnungsschleife bereitgestellt und erneut bewertet werden. Dies ermöglicht eine systemgestützte Betrachtung des möglichen Lösungsraumes und Ermittlung der Systemabhängigkeiten.

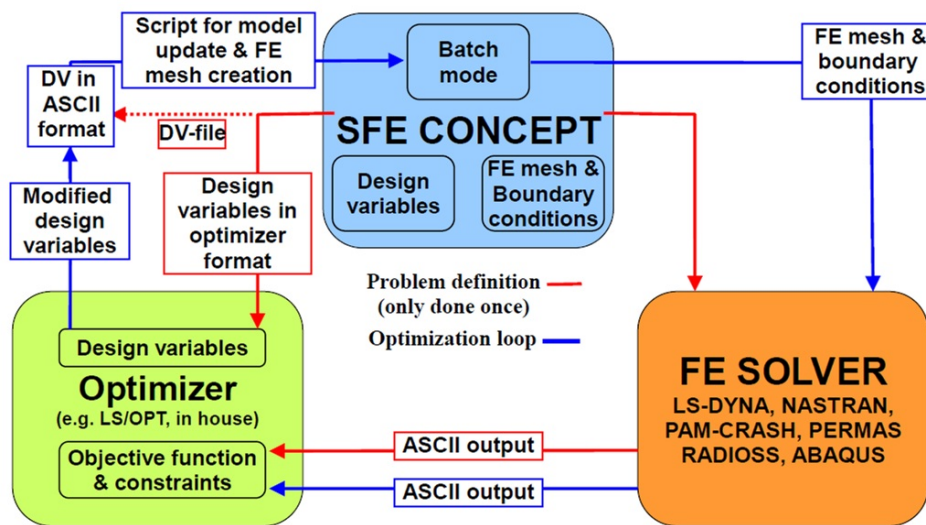


Abbildung 2.27: Bausteine der integrierten Optimierung anhand des SFE CONCEPT Modelles, FE-Solvers und eines Optimierungswerkzeuges [50, S. 29]

Die erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen nach dem durchlaufenen Optimierungsprozess können bezüglich der Konformität der Gesamtfahrzeuganforderungen überprüft werden. Dies bedeutet besonders die Prüfung, ob die vorgegebenen Bauraumgrenzen eingehalten werden und ob die prinzipielle Herstellbarkeit nach der durchlaufenen Formänderungen gegeben ist. Analog zum FCM können die generierten Flächen von SFE CONCEPT als Grundlage zur Dimensionierung und Positionierung der detaillierten Konstruktion verwendet werden. Die Konzeptgeometrie von SFE CONCEPT kann in nicht parametrische 3D-CAD-Flächen für die fortführende Serienkonstruktion konvertiert werden. Die Flächen des nativen CAD-Modelles werden danach zumeist nicht weiterverarbeitet, da keine Parametrierung verfügbar ist. Alternativ können Bauraumschnitte aus dem SFE CONCEPT Modell abgeleitet und als Referenz genutzt werden. Die stark technologieabhängigen Funktionen zur Flächenmodellierung stellen auch bei SFE CONCEPT eine Einschränkung im Vergleich verschiedener Strukturbauteile dar.

### Beurteilung von Modellierungswerkzeugen für die Konzeptphase

Der Ansatz der vereinfachten Modellierung und integrierten Funktionsentwicklung wird anhand von Werkzeugen der Konzeptmodellierung auf systembasierte Weise umgesetzt. Vorteile dieser Werkzeuge bestehen in der Fokussierung auf Methoden und Funktionen, welche auf die Bedürfnisse der frühen Entwicklungsphase abgestimmt sind. Anhand der Konzeptentwicklungswerkzeuge werden schnelle Optimierungsschleifen zwischen Modellierung, Modellaufbereitung und numerischer Berechnung realisiert und eine Beschleunigung der funktionalen Optimierung im Vergleich zu konventionellen Gestaltungs- und Übergabeprozessen [107, S. 43] erreicht.

Der Einsatz von Entwicklungswerkzeugen ist gesamtheitlich über den Fortschritt des Entwicklungsprozesses zu betrachten. Die Verwendung von verschiedenen Entwicklungssystemen kann zu einem Informationsverlust bei der Datenübergabe und zu höherem Aufwand zur fortlaufenden Synchronisierung von Arbeitsständen führen. Dies betrifft die Übergabe von konzeptionellen Modellen an die Serienentwicklung, als auch an weitere Entwicklungsdisziplinen im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen, beispielsweise die Abstimmung der Strukturentwicklung mit Entwicklungsumfängen des Styling, der geometrischen Integration und des Gesamtfahrzeugmaßkonzeptes. Durch die Vollintegration von FCM und SFE CONCEPT in ein natives CAD-System ist eine zusätzliche Synchronisierung zu CAD-basierten Auslegungsschritten nicht erforderlich und es wird die Datenaufbereitung für FE-Berechnungen deutlich verbessert. Die vereinfachten und funktional bestätigten Flächen der Konzeptmodellierungswerkzeuge können als Referenz zur Dimensionierung und Positionierung in detaillierte Produktmodelle übergeführt werden, wobei die Parametrierung nicht in geeigneter Weise weiterverwendet werden kann. Im Rahmen der detaillierten Konstruktion sind weitere relevante Aspekte, siehe Abbildung 2.21, im Konstruktionsprozess zu berücksichtigen. Hierzu zählen Stylingflächen, fertigungsbedingte Randbedingungen, Anlageflächen zu weiteren Bauteilen im Gesamtsystem, oder erforderliche Formeigenschaften wie Tangenten- oder Kurvenstetigkeit. Diese Faktoren schließen in der Regel eine Weiterverwendung von Konzeptflächen aus und erfordern einen Neuaufbau des Produktmodelles.

Bestehende Konzeptmodellierungswerkzeuge setzen auf technologische Konzepte in der Strukturentwicklung auf, welche eine hohe Durchdringung in der automobilen Entwicklung besitzen, wie beispielsweise die Stahl-Schalenbauweise [37]. Dies führt zu Modellierungsfunktionen, welche speziell auf diese Bauweise abgestimmt sind. Für die Entwicklung von Strukturkonzepten, für welche diese Werkzeuge konzipiert sind, sind deutliche Effizienzsteigerungen im Vergleich zu nativer Konstruktion erreichbar (siehe Anhang 4.2). Im Gegenzug führt die Spezialisierung der Modellierungssysteme zu erhöhten Aufwänden für alternative Konzepte, beispielsweise Multi-Materialstrukturen, Aluminium-Spaceframebauweisen, Bauteilen aus Rapid-Prototyping Herstellung, sowie den Einsatz neuer Werkstoffkonzepte, wie Faserverbundmaterialien. Zur Darstellung dieser Konzepte sind neue Modellierungsfunktionen in den Konzeptmodellierungswerkzeugen, als auch in nativen CAD-Systemen erforderlich. Da native CAD-Systeme eine geringere Affinität mit spezifischen Branchen aufweisen, existieren allgemeine Modellierungsfunktionen und ein breites Spektrum von verfügbaren Methoden. Beispielsweise sind Auslegungswerkzeuge zur Faserverbundmodellierung als zusätzliche Entwicklungspakete in nativen CAD-Systemen verfügbar, welche schon in der Luftfahrtentwicklung eingesetzt werden [43].

Die Implementierung von neuen Modellierungsmethoden in konzeptionellen Entwicklungswerkzeugen für innovative Strukturkonzepte ist von den erforderlichen Entwicklungszeiten in der Softwareentwicklung abhängig. Bei der Untersuchung innovativer Lösungskonzepte ist es jedoch in der Regel nicht möglich, die Adaption und Erweiterung der Entwicklungswerkzeuge in der Projektarbeit abzuwarten.

Tabelle 2.1: Vergleich von nativem CAD und speziellen Konzeptentwicklungswerkzeugen (Anmerkung: SE: Systemebene, BT: Bauteilebene)

	natives CAD	SFE CONCEPT	FCM
Modellierungsumfang zur Darstellung von geometrischen Lösungen	hoch	gering	gering
Detaillierungsmöglichkeiten	vereinfacht & detailliert	vereinfacht	vereinfacht
Abhängigkeit von Geometriefunktion und technologischer Bauweise	gering	hoch	hoch
Beschränktheit der Modellierung bzgl. neuer Strukturtechnologien	keine	mittel	mittel
Parametrierung der Geometrie	explizit	explizit	explizit
Parametrierung der Bauteileabhängigkeiten	explizit	implizit	implizit
Definierte methodische Vorgehensweise in der Modellierung	keine	gegeben	gegeben
Vorbereitung der Modellierung auf nachgelagerte Prozesse	gering	hoch	hoch
Eignung für integrierte Optimierungsprozesse	gering SE, mittel BTE	gering BTE, hoch SE	mittel BTE, hoch SE

Der breite Funktionsumfang von nativen CAD-Systemen und deren technologieunabhängige Modellierungsfunktionen stellen einen wesentlichen Vorteil zur Darstellung neuer Entwicklungslösungen im Vergleich zu spezialisierten Konzeptmodellierungswerkzeugen dar. Innerhalb nativer CAD-Systeme können methodische Vorgangsweisen erarbeitet werden, welche für die Anforderungen in der frühen Phase der Produktentwicklung ebenso geeignet sind. Diese besitzen teilweise nicht den Anwendungskomfort von speziellen Entwicklungswerkzeugen für die frühe Phase, unterliegen dadurch auch nicht standardisierten Rahmenbedingungen und verringertem Spielraum der Modellierung. Darüber hinaus besteht in nativen Systemen die Möglichkeit zur Anwendung von wissensbasierten Produktmodellen über den gesamten Entwicklungsprozess. Diese Aspekte sind die Hauptgründe, warum in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf die Methodenentwicklung in nativen Autorenssystemen gelegt wird.

# Kapitel 3

## Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden in der Produktentwicklung

Die Weiterentwicklung von Konstruktionsmethoden in der vorliegenden Arbeit baut auf die Klassifikation der Konstruktionsmethoden nach der VDI-Richtlinie 2209 [184] auf, welche in Kapitel 2.4.2 erläutert wurde.

Wissens- und featurebasierte Methoden in der parametrischen Konstruktion werden im vorgestellten Ansatz durch Automationsmethoden in der Produktentwicklung ergänzt. Programmgestützte Erweiterung von CAD-Systemen sind Bestandteil aktueller automobiler Konstruktionsmethoden und durch verschiedene Publikationen dokumentiert, [89], [171], [178], [65]. In der Literatur wird zwischen Skript Routinen und Applikationen unterschieden [176, S. 111]. In der vorliegenden Arbeit wird hingegen vorgeschlagen, Automationslösungen in der Konstruktion in drei Kategorien einzuteilen. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt sind dies deskriptive skriptbasierte, prozedurgesteuerte und kriteriengeleitete generative Methoden. Dieser Ansatz resultiert aus der Blickweise bezüglich des Leistungsumfanges einzelner Automationsmethoden, anstatt einer Klassifizierung anhand von Programmiersprache und Automationsschnittstelle. Auf die Charakteristika der einzelnen Ansätze in der Automation wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

Auf Basis von wissensbasierten Konstruktions- und Automationswerkzeugen wird in der vorliegenden Arbeit ein Rahmenkonzept für die strukturierte Vorgangsweise in der Gestaltung von wissensbasierten Lösungen in der Konstruktion vorgeschlagen. Vor- und Nachteile von Modellierungs- und programmgestützten Methoden werden hierzu analysiert und optimale Einsatzbereiche für die jeweilige Methode und deren Kombination abgeleitet.

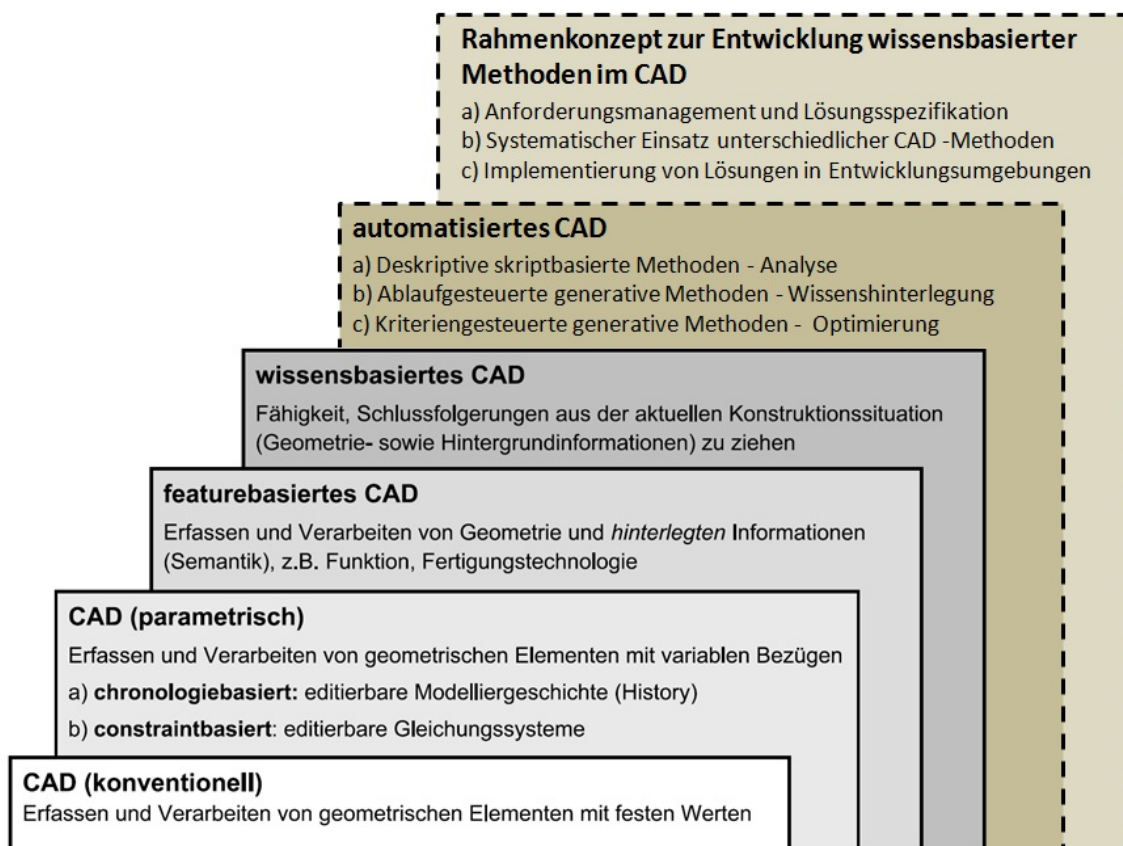


Abbildung 3.1: Weiterentwicklung der Methoden in der Konstruktion auf Basis der VDI 2209 [184] durch Umfänge des automatisierten CAD und eines gesamtheitlichen Konzeptes für die Gestaltung von wissensbasierten Lösungen im CAD

In den folgenden Kapiteln wird die Leistungsfähigkeit von Modellierungs- und Automationsmethoden anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert. An die erarbeiteten Lösungen wird zusätzlich der Anspruch erhoben, die gegebene Fragestellungen mithilfe von neuartigen Ansätzen zu realisieren. Die umgesetzten Werkzeuge und Lösungskonzepte dienen als Grundlage zur Diskussion der spezifischen Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden. Aufbauend auf der Beurteilung der Methoden werden optimale Einsatzgebiete der jeweiligen Lösungsmethode abgeleitet. Ergänzend werden Randbedingungen in der Konzeption von wissensbasierten Werkzeugen erarbeitet, welche Einfluss auf den Erfolg in der Realisierung haben. Darunter fallen strukturierte Vorgangsweisen zur Lösungsspezifikation, die Anforderungen des Anwenders an die Interaktion mit Lösungsmethoden, sowie systemgestützte Ansätze zur Verteilung und Verifikation von Lösungen. Ergebnisse dieser Arbeit ist eine strukturierte Vorgehensweise zur Gestaltung von wissensbasierten Lösungen und Strategien, welche in einem systematischen Einsatz unterschiedlicher Methoden in verschiedenen Fragestellungen resultiert.

## 3.1 Konstruktionsmethodik

### 3.1.1 Konstruktionsfunktionen und Parametrik

#### Parametrik in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses

In der modernen Fahrzeugentwicklung wird ein iterativer Prozess zur Produktgestaltung und Produktoptimierung umgesetzt. Anhand von Meilensteinen wird die Verbesserung je Entwicklungsschleife dokumentiert und es werden weitere Maßnahmen abgeleitet, siehe Kapitel 2.2. Sofern keine Informationen über bestimmte Produkteigenschaften vorliegen, werden Annahmen getroffen und grundsätzliche Untersuchungen anhand von vereinfachten Auslegungsmethoden vorgenommen. Aufgrund der Komplexität von modernen Fahrzeugstrukturen in Bezug auf geometrische Integration und funktionale Auslegung kann nicht auf reines Erfahrungswissen ('Engineering Judgement') zurückgegriffen werden. Vereinfachte geometrische Modelle können dieses Vorgehen zur frühzeitigen Indikation des Entwicklungsstandes unterstützen.

Besonders in der Konzeptphase besteht die Anforderung, dass geänderte Eingabeinformation effizient in das Produktmodell integriert werden können. Die vereinfachte Umsetzung von Änderungen am Produktmodell erhöht die Reaktionsfähigkeit zur Bearbeitung von Optimierungsvorschlägen. Um diese Anforderung abzudecken sind entsprechende Methoden im Aufbau der Produktmodelle erforderlich. Die Modellierung sollte den Anforderungen nach minimalem Erstellungs- und Modifikationssaufwand unter Erhaltung der funktionalen Aussage entsprechen. Die Anforderungen an Konzeptmodelle in Bezug auf Erstellungsaufwand und Flexibilität werden durch eine parallele Bearbeitung und den Vergleich mehrerer Konzepte verstärkt. Um flexible geometrische Produktmodelle in der Konzeptphase umzusetzen sind folgenden Ansätze in der Konstruktion denkbar:

- Parametrierung in Bezug auf Systemeigenschaften
- Parametrierung in Bezug auf sich ändernde Randbedingungen und Eingabewerte
- Reduktion der Komplexität durch Abstraktion
- Referenzierung anhand einer systematischen Vorgangsweise
- Referenzierung anhand objektorientierter Assoziation
- Stabile Parametrierungskonzepte als Ersatz für generative und operationale Funktionen mit geringer Stabilität

Die einzelnen Ansätze zur stabilen parametrischen Modellgestaltung in der Konzeptphase werden in den folgenden Absätzen erläutert und dienen als Grundlage für das Anwendungsbeispiel eines konzeptionellen Strukturkonzeptes in einem nativen CAD-System.

In einer frühen Entwicklungsphase wirkt sich eine hohe Detaillierung von Bauteilen nachteilig aus, da eine erhöhte Erstellungszeit benötigt wird, und der Lösungsraum für Änderungen in geometrischen Modellen reduziert ist. Bei der Produktdarstellung anhand von Konzeptmodellen können geometrische Exaktheit und Detailuntersuchungen in einer frühen Entwicklungsphase von geringerer Priorität sein. Aufgrund einer erhöhten Volatilität in einer frühen Entwicklungsphase liegt der Fokus auf einer grundsätzlich funktionalen und machbaren Untersuchung. Zur Umsetzung von flexiblen Modellen in der Konzeptphase können Methoden der Abstraktion und systematischen Referenzierung in der Konstruktion eingesetzt werden. Der kritische Faktor der Abstraktion ist die Übertragbarkeit der funktionalen Aussage von vereinfachten auf detaillierte Modelle. Der Anspruch besteht in einer affinen Charakteristik von Konzept- und Serienbauteilmodell. Neben der geometrischen Vereinfachung kann auch der verwendete Umfang von Modellierungsfunktionen auf stabile parametrische Funktionen reduziert und eine systematische Parametrierung der geometrischen Objekte eingesetzt werden. Einhergehend mit einer Vereinfachung der geometrischen Darstellung kann eine Verschlankung der Modellstrukturen erreicht werden.

Konventionelle Konstruktionsmethoden in CAD-Systemen implizieren oft eine hohe Anzahl von geometrischen Objekten und deren logische Verknüpfungen in parametrischen Modellen. Durch eine hohe Anzahl von Verknüpfungen reduziert sich der Lösungsraum von zulässigen geometrischen Operationen. Publikationen zur Einschätzung dieser Thematik beleuchten diese Randbedingungen in nativen CAD-Systemen kritisch: *Parametrisierung anhand bestehender Standardfunktionalitäten in CAD-Systemen wie z.B. dem Branchenstandard der Automobilindustrie, CATIA V5, ist zwar grundsätzlich vorstellbar, wegen der Komplexität der resultierenden Strukturbäume und der damit verbundenen Fehlermöglichkeiten ist die Erstellung robuster parametrisierter Karosseriemodelle mit Standardfunktionalitäten jedoch sehr aufwändig, zeitintensiv, fehleranfällig und unflexibel* [112, S. 7]. Bedingt wird dieser Zusammenhang durch die begrenzte Gültigkeit jeder einzelnen logischen Operation. Die Änderungsfähigkeit eines parametrischen Bauteils wird aus diesem Grund durch die Grenzen jeder einzelnen Operation bestimmt. Bei Nichterfüllung von Bedingungen treten Fehler im Bauteilmodell auf. Der mögliche Lösungsraum kann durch systematische Modellierungsstrategien erweitert werden. Ein einfaches Beispiel stellt die Schnittmenge von zwei Linien im Raum dar, welche verschiedene Lösungen ergeben kann: Eine punktförmigen Schnittmenge  $G_1 \cap G_2$ , eine idente Lage und Richtung  $G_1 \parallel G_2 \wedge P_{G_1} \in g_2$ , keine Lösung durch parallele, verschobene Lage  $G_1 \parallel G_2 \wedge P_{G_1} \notin g_2$ , sowie windschiefe Lage im Raum  $G_1 \neq G_2$ . Der Lösungsraum zur Erzeugung eines Schnittpunktes im Raum stellt sich als stark beschränkt dar.



Das Beispiel der Schnittmenge von zwei Linien zeigt spezifische Randbedingungen auf, welche für eine gültige geometrische Operationen erforderlich sind. Die Berücksichtigung dieser Randbedingungen in der geometrischen Definition kann die nicht gültigen Lösungsmengen einer geometrischen Funktion in Bereiche verschieben, welche für das Modell nicht relevant sind. Dies ist besonders für die Erstellung operationaler Funktionen (logische Relation zwischen Objekten) von Bedeutung und muss bei Erstellung der generativen geometrischen Objekte berücksichtigt werden. Ein Ansatz, um die Operation eines Schnittpunktes durch ein alternatives Konzept zu ersetzen, ist eine veränderte Parametrierung. Anhand einer, je nach Problemstellung spezifizierten Steuerung von drei Punkten, wobei ein Punkt als Eingabeinformation für die beiden Linien dient, kann ein Schnittpunkt stets gewährleistet werden. Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, dass Operationen welche nur einen geringen Lösungsraum besitzen, anhand von alternativen Konstruktionslösungen ersetzt und die Modellstabilität dadurch erhöht werden kann.

Die Methoden der parametrisch assoziativen Konstruktion können zur Umsetzung der geometrischen Konzept- und Detailmodelle eingesetzt werden. Im Modell hinterlegte Parameter ermöglichen eine Steuerung von Geometrie, sowie den Aufbau von logischen Abhängigkeiten zwischen geometrischen Objekten. Die Grundlagen der parametrischen Konstruktion wurden in Kapitel 2.4.2 näher erläutert. Zur Steuerung des Geometriemodelles anhand von Parametrik sind vielfältige Parametertypen verfügbar. Auszugsweise können dies geometrische Parameter wie Länge, Fläche, Volumen, als auch physikalische Parameter wie Dichte, Masse, Kräfte, Momente, sowie semantische Parameter wie String, Boolean, Single oder Double sein. Ein Ansatz in der Modellsteuerung ist die Parametrierung des Modelles in Bezug auf Eingabegrößen. Eine direkte Verarbeitung von Eingabegrößen als Steuerungsparameter unterstützt den fortlaufenden Änderungsprozess in einer frühen Entwicklungsphase, da geänderte Werte im Modell interpretiert und Modifikationen sichtbar gemacht werden können. Eine Steuerung des Modelles über sekundäre Parameter, welche von den Eingabewerten abgeleitet werden müssen, bedeutet einen erhöhten Aufwand zur Adaption. Eine Herausforderung in der automobilen Konstruktion stellt die hybride Referenzierung anhand unterschiedlicher Eingabegrößen dar. Hierzu zählen maßbedingte Eingaben wie Abstände, formbedingte Randbedingungen wie das Fahrzeugstyling, sowie funktionsbedingte Anforderungen wie Wandstärken oder die Bauteildimensionierung. Diese sind anhand von geeigneten Methoden im Produktmodell zu kombinieren.

Die Modellierung und Referenzierung sollte nicht nur in Bezug auf Eingabeparameter, sondern auch hinsichtlich funktionaler Anforderungen gestaltet werden. Diese beinhalten die System- als auch Bauteilanforderungen. Die in der Konzept- und Serienentwicklung erarbeiteten Ergebnisse manifestieren sich im Entwicklungsprozess im Materialkonzept, der Topologie und Dimensionierung. Eine Steuerung dieser funktional bedingten Größen unterstützt die Variation des Produktmodelles und die Verbesserung von Produkteigenschaften. Eine Parametrierung anhand von externen Eingabegrößen und funktional bedingten Aspekten stellt prinzipiell keine gegenläufigen Anforderungen. Die beiden Parametrierungsansätze können komplementär angewendet und in unterschiedlichen Ebenen einer Modellsteuerung umgesetzt werden. Da einzelne Eingabegrößen von einander abhängen können, ist eine eindeutige Definition der Steuerungsparameter, beispielsweise durch Funktionsketten, von Vorteil. Bei der Anwendung von Funktionsketten können treibende Werte einer Maßgebung gesetzt werden. Im Rahmen der Strukturentwicklung sind globale funktionale Steuerungsparameter die Gestalt der Strukturtopologie und der Strukturlastpfade. Basierend auf einer globalen funktionalen Modellsteuerung sind lokale funktionale Parametrierungen für Bauteile zu ergänzen. Dies können auf Bauteilebene beispielsweise kinematische oder fertigungstechnische Aspekte, wie die Werkzeugrichtung, sein.

Zur Umsetzung von flexiblen Modellen für die frühe Konzeptphase ist ein Modell- aufbau erforderlich, welcher stabil auf Änderungen reagieren kann. Dies bedeutet die Gewährleistung der geometrischen Repräsentation bei der Änderung von Eingabewerten. Eine Schlüsselrolle spielt hierbei die Strategie der Referenzierung. Anhand einer definierten und durchgängigen Vorgangsweise in der Auswahl der Modellierungsfunktionen und der Referenzierungssystematik im Modell kann eine gesteigerte Transparenz im Modell erreicht werden. Hierarchische Konzepte, systematische und zentrale Referenzierungsstrategien und die Vererbung von Eigenschaften in Produktmodellen sind Ansätze, welche für die Gestaltung von Konzeptmodellen eingesetzt werden können. Anhand einer zentralen Referenz können systemrelevante Eigenschaften synchronisiert und die Abstimmung von Subsystemen und Bauteilen vereinfacht werden. Eine Möglichkeit stellt hierbei die Parametrisierung über filebasierte Bauteilgrenzen im CAD-System dar. Die Koppelung über Bauteilgrenzen wird von CAD-Systemen unterstützt, wobei teilweise spezifischen Methoden anzuwenden sind; beispielsweise sind Objekte explizit als Publikationen zu definieren. Die Referenzierung über Bauteilgrenzen ist in Konstruktionsrichtlinien aufgrund nicht transparenter Änderungshistorie und der zugeordneten Bauteilverantwortung teilweise nicht zugelassen [78, S. 45].

Auf Bauteilebene bieten CAD-Systeme Konzepte zur Referenzierung auf Basis von geometrischen Objekten, sowie aufbauend auf sekundäre Geometriedaten ('BRep'-Modellierung [26]), welche vom CAD-System verwaltet werden. Unter sekundäre Datenstrukturen fallen beispielsweise die Ableitung von Flächen, Randkurven oder Kantenpunkte von einem Volumenkörper, welche nicht parametrisch vom Benutzer gesteuert werden können. Bei einer Änderung des Basisobjektes können Sekundärdaten entfallen oder eine Änderung der Identifikation eintreten, welche nicht an nachfolgende Objekte weitergegeben wird. Dadurch wird eine manuelle Nachbearbeitung der geometrischen Struktur erforderlich [123, S. 117]. Durch Verwendung von objektbasierter Referenzierung [28] anstatt von systemverwalteten Sekundärdaten, kann ein Beitrag zur stabilen Parametrierung eines Modelles geleistet werden.

### **Anwendungsbeispiel zur Gestaltung eines parametrischen Rohbaus für die Konzeptphase**

Im vorliegenden Beispiel sollen die Möglichkeiten nativer parametrischer Konstruktion im Rahmen der Strukturentwicklung demonstriert werden. Es werden hierbei die funktionalen Aspekte der Strukturentwicklung mit den methodischen Ansätzen der parametrisch assoziativen Konstruktion dargestellt.

Aktuell angewandte Vorgangsweisen in der Fahrzeugentwicklung, siehe Kapitel 2.1.2, bestehen in der simultanen Entwicklung und Absicherung von funktionalen Eigenschaften, Machbarkeit in der Produktion, Kosten und gesetzlichen Anforderungen. Die Arbeitsmethode einer simultanen Produktentwicklung ist auch im Rahmen der Strukturentwicklung anzuwenden. Neben einer funktionalen Bewertung von mechanischen Struktureigenschaften anhand von Simulationsmethoden kann eine Bewertung hinsichtlich Lösungshomogenität in Bezug auf geometrische Integration, Bauraum, gesetzliche Anforderungen, Schwerpunkt und Gewicht abgeschätzt werden.

Die Steuerung eines komplexen Produktmodelles, wie einer Fahrzeugstruktur, zeigt die Notwendigkeit einer zentralen und systematischen Referenzierung. Diese bedingt eine Verknüpfung verschiedener Komponenten auf Bauteilebene und Darstellung der Interaktion im Verbund, wie durch Verbindungstechnik. Ein schneller Durchlauf zwischen Produktmodellierung, funktionaler Bewertung und Vergleich unterschiedlicher Konzepte ist ein wesentlicher Teil, um in früher Entwicklungsphase zielgerecht zu entwickeln und Potentiale einzelner Konzepte auszuloten. Durch die qualitative Bewertung und den Vergleich von Varianten in der frühen Konzeptphase, sowie dessen funktionaler Optimierung kann ein reduzierter Entwicklungsaufwand in der Serienentwicklung erreicht werden.

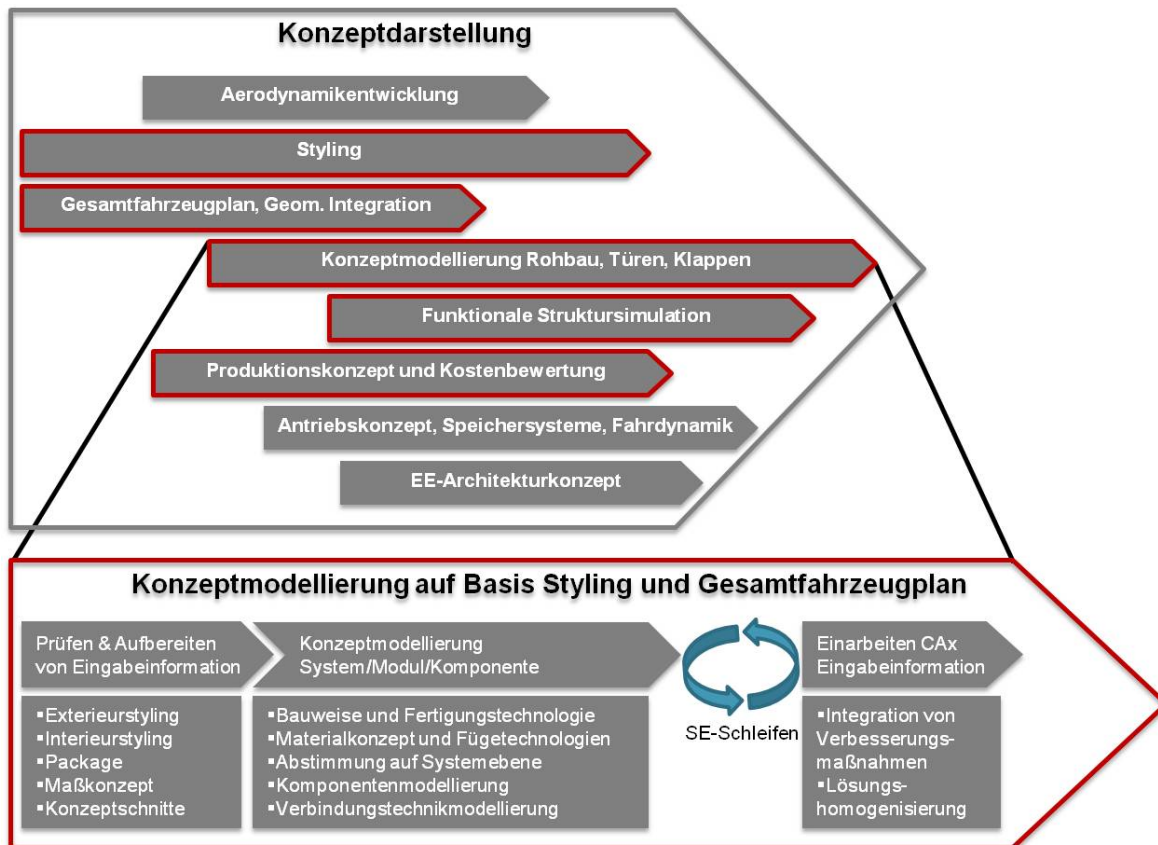


Abbildung 3.2: Einbettung des Anwendungsbeispiels des konzeptionellen Rohbaus in die Konzeptentwicklung

Das vorliegende Anwendungsbeispiel behandelt insbesondere den Umfang der Konzeptmodellierung auf System-, Modul- und Bauteilebene, siehe Abbildung 3.2. Herausforderungen in der Modellierung von assoziativen Fahrzeugstrukturen bestehen in der globalen Steuerung des Konzeptes, Kopplung der Bauteile zueinander und der erforderlichen Parametrierung. Auf funktionale Anforderungen an die Modellierung von Fahrzeugkarosserien wurde im Kapitel 2.3 eingegangen.

Die Formgestaltung in der Karosseriekonstruktion besteht in den Schwerpunkten der funktionalen Dimensionierung, geometrischen Integration sowie fertigungstechnischer Machbarkeit. Aus geometrischer Sicht nehmen Strukturtopologien oftmals komplexe Formen an, welche sich aus einer Kombination von Freiformflächen und Regelgeometrien ergeben. Der Grund hierfür liegt in fahrzeugspezifischen Eingabeinformationen, welche in folgenden Absätzen beschrieben werden. Zur Verarbeitung von Eingabeinformation und Steuerung des Modelles kann auf eine Einteilung anhand von drei Parametertypen zurückgegriffen werden [111, S. 16]. Diese umfassen externe Parameter, Komponentenparameter (interne Steuerung) und Zustandsparameter (Metadaten und Eigenschaften, z.B. Material), siehe Abbildung 3.3.

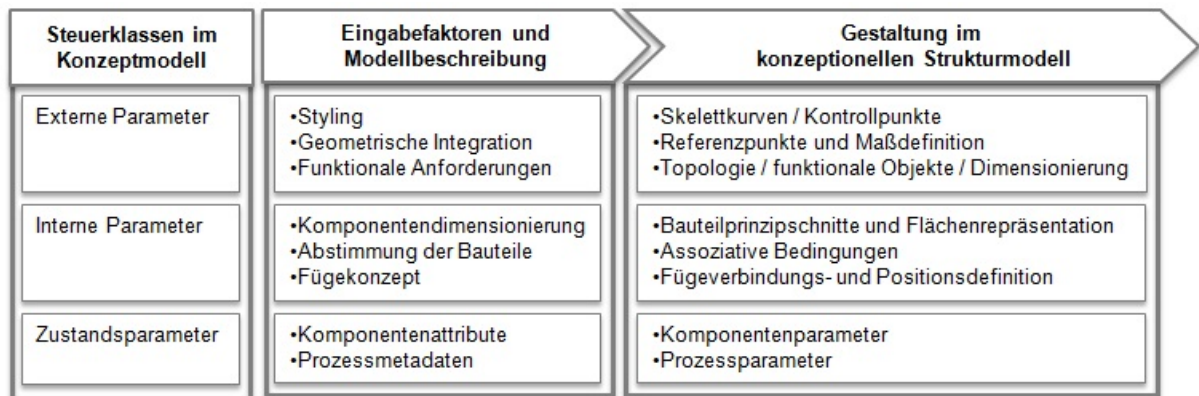


Abbildung 3.3: Strukturierung des Konzeptmodelles anhand von Steuerungsklassen und der Überführung von Eingabefaktoren und Produktbeschreibung in ein CAD-basiertes Produktmodell

Zur Verarbeitung der einzelnen Parametertypen und Steuerung der geometrischen Form der Karosserie wird im vorliegenden Beispiel ein hierarchischer Ansatz nach dem Gedanken einer Top-Down Referenzierung [176, S. 64] verfolgt.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieses Konzeptes auf Bauteilebene besteht in der Gestaltung von Mastermodellen [98, S. 327]. Sofern die Systemsteuerung als auch abhängige Geometrie in einem Modell hinterlegt wird, spricht man von einer Ein-Dokument-Technik [176, S. 99]. Dadurch ist es möglich den Funktionsumfang der parametrisch assoziativen Konstruktionsmethoden ohne dokumentübergreifende Verknüpfungen anzuwenden. Die Steuerung von Zusammenhängen über Dateigrenzen und ein Verknüpfungsmanagement im Produkt werden somit vermieden [81, S. 223]. Ein zentrales, hierarchisch strukturiertes, dreidimensionales Modell bietet den Vorteil, dass zirkuläre Zusammenhänge unterbunden werden. Nachteilig erweisen sich spezifische Schreibrechte für einzelne Modelle, welche zu meist nur für den aktuellen Bearbeiter verfügbar sind und eine Teamarbeit einschränken, als auch ein hoher Datenumfang des Konzeptdatenfiles. Die bauteilübergreifende assoziative Koppelung von Komponenten ist in der Konzeptphase aufgrund geringerer Komplexität eher geeignet, als in der detaillierten Serienentwicklung und kann den gewählten hierarchischen Ansatz unterstützen.

Die Koppelung von Bauteilen erfordert hierbei eine transparente Darstellung der logischen Verknüpfungen, um zirkuläre Abhängigkeiten zwischen Bauteilen zu unterbinden. Aufgrund der Kopplung von Bauteilen können einzelne Änderungen Einfluss auf weitere abhängige Bauteile nehmen. Die Entwicklungskomplexität wird durch diese Abhängigkeiten im Produkt gesteigert und erfordert strukturierte Vorgangsweisen zur transparenten Realisierung. Anhand eines definierten Rollen- und Rechtmanagements von Bauteilen könnten automatisierte Änderungen von Bauteilen ohne Kenntnissnahme des Bauteilverantwortlichen vermieden werden.

Die Einbettung der externen, internen und Zustandsparameter im Rahmen eines hierarchischen Ansatzes wird anhand des konzeptionellen Strukturmodelles in den folgenden Absätzen beschrieben.

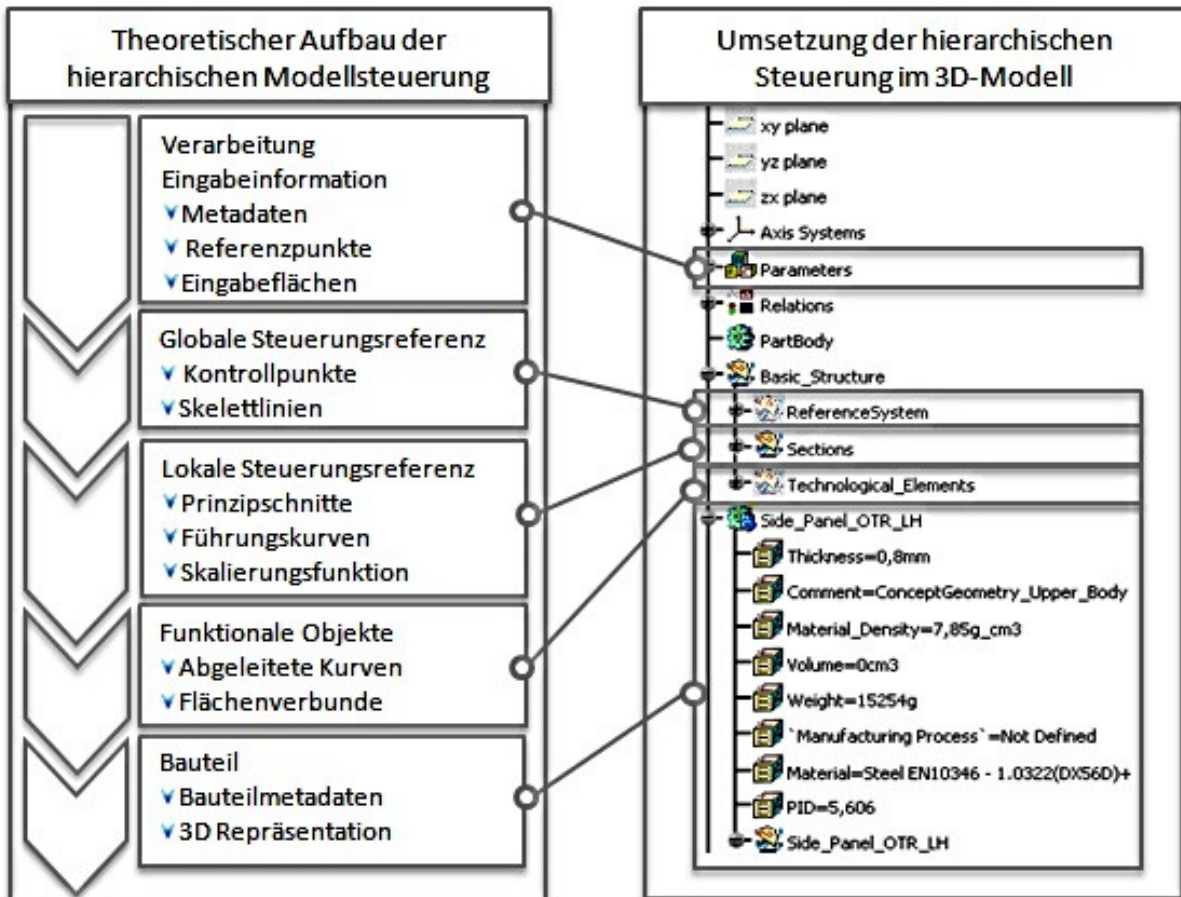


Abbildung 3.4: Hierarchischer Modellansatz in der Theorie (links) und in Form einer Baumstruktur im 3D-Modell

Im ersten Schritt der Verarbeitung von externen Eingabeinformation werden relevante Daten für die weitere 'Top-Down'-Modellierung zentral aufbereitet. Externe geometrische Eingabeinformationen in der Strukturentwicklung stellen das Fahrzeugstyling sowie der Gesamtfahrzeugplan im Rahmen der geometrischen Integration von Sitzkonfiguration, Antrieb, Fahrwerk und Komponenten sowie Stauraum dar. Als explizite Referenz dienen beispielsweise Radmittelpunkte, der Windlaufpunkt, Sitzreferenzpunkte sowie Flächen des Fahrzeugstylings, welche in Form von Parameterwerten oder Geometrie vorliegen können. Diese Informationen können im Rahmen externer Steuerparameter im Modell hinterlegt werden. Möglichkeiten zur Anpassung des Strukturkonzeptes mit Fortlauf der Entwicklung sind aufgrund von Änderungen dieser Eingabeinformationen im Modell vorzusehen. Dadurch können die Aufwände für Änderungen reduziert und schnelle Entwicklungsschlei-

fen ermöglicht werden. Im Kontext der Steuerung auf Basis externer Parameter ist das Fahrzeugstyling hervorzuheben. Bei den Übergabedaten des Exterieur- und Interiorstylings werden in der Regel nicht parametrische Daten übergeben. Eine Adaption an eine veränderte dreidimensionale Lage von Stylingflächen im Raum kann in der Regel nicht anhand von Parameterwerten umgesetzt werden. Zur Weiterverwendung der Stylingdaten als Referenzflächen sind diese in einer frühen Entwicklungsphase zumeist auch qualitativ aufzubereiten.

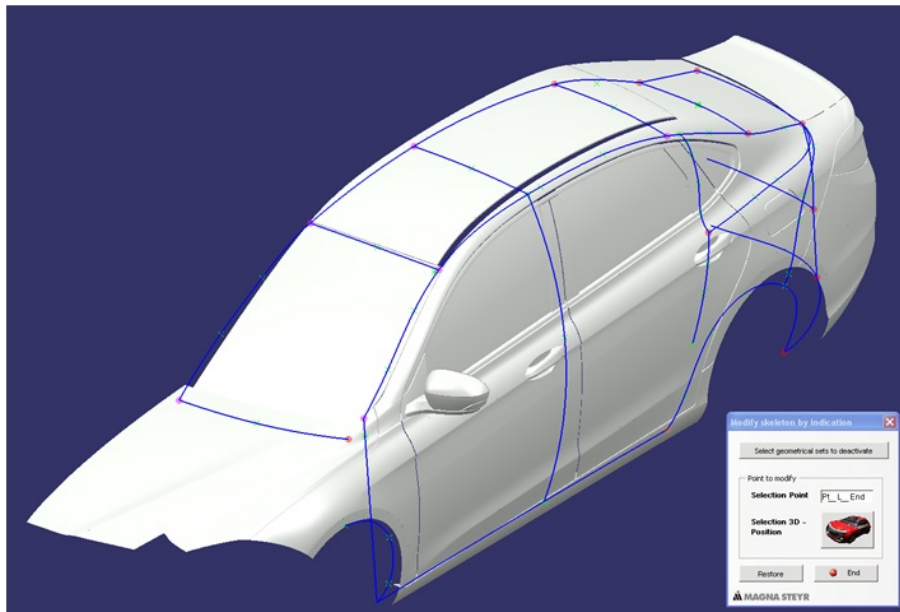


Abbildung 3.5: Adaption eines Strukturmodelles anhand eines Referenzskelettes an ein neues Fahrzeugstyling durch Verschiebung von Knotenpunkten.

Um diese Referenzflächen im Fortlauf der Fahrzeugentwicklung effizient austauschen zu können, wurde im Rahmen des konzeptionellen Rohbaus eine Methode zur effektiven Adaption erarbeitet. Diese basiert auf einem Approximationsansatz, wodurch bestehende Strukturmodelle anhand von Führungskurven und Kontrollpunkte an eine neue Fahrzeugform angepasst werden können, ohne eine hierarchische Abhängigkeit zur Stylingfläche zu generieren. Die charakteristische Form eines Stylings kann beispielsweise anhand von Kurven eines Referenzskeletts approximiert werden. Die Kurven des Skelettes können anhand von Kontrollpunkten auf die Stylinggeometrie adaptiert werden, siehe Abbildung 3.5. Zur einfachen Steuerung der Kontrollpunkte wurde die Methode durch ein programmgestütztes Werkzeug erweitert, siehe Anhang C, welches diesen Vorgang unterstützt. Durch die vorgestellte Vorgangsweise wird es ermöglicht, flexibel auf Änderungen des Stylings im Fortlauf des Entwicklungsprozesses zu reagieren ohne Referenzelemente in der Bauteilhierarchie auszutauschen.

Zur Anpassung an externe geometrische Formen als auch zur zentralen Geometrie-steuerung können Skelettansätze verwendet werden [134, S. 450]. Ein solcher Ansatz wird in der zweiten Ebene (Abbildung 3.4) des hierarchischen Modell gewählt und stellt das Referenzobjekt aller weiteren geometrischen Objekte dar. Das Skelett des Rohbaumodellles approximiert die Eingaben des Stylings sowie die Strukturtopologie und dessen Lastpfade. Die nachfolgenden Prinzipschnitte werden über Punkte auf den Skelettkurven positioniert. Bei einer Adaption des Skelettes folgen die Prinzipschnitte und finale Flächen des Konzeptmodellles diesen Änderungen assoziativ.

Anhand von Prinzipschnit-  
ten im dritten Arbeitsschritt werden die Querschnitte der einzelnen Bauteile erzeugt und für die Gestaltung der Bauteile verwendet. Auf den Skelettkurven wird ein Punkt ('Skelettreferenzpunkt in Abbildung 3.6) zur Definition der Prinzipschnittebene definiert, welcher durch einen zweiten Punkt ergänzt wird. Dieser kann relativ zum Punkt auf der Skelettkurve beliebig im Raum adaptiert werden und ermöglicht einen zu-

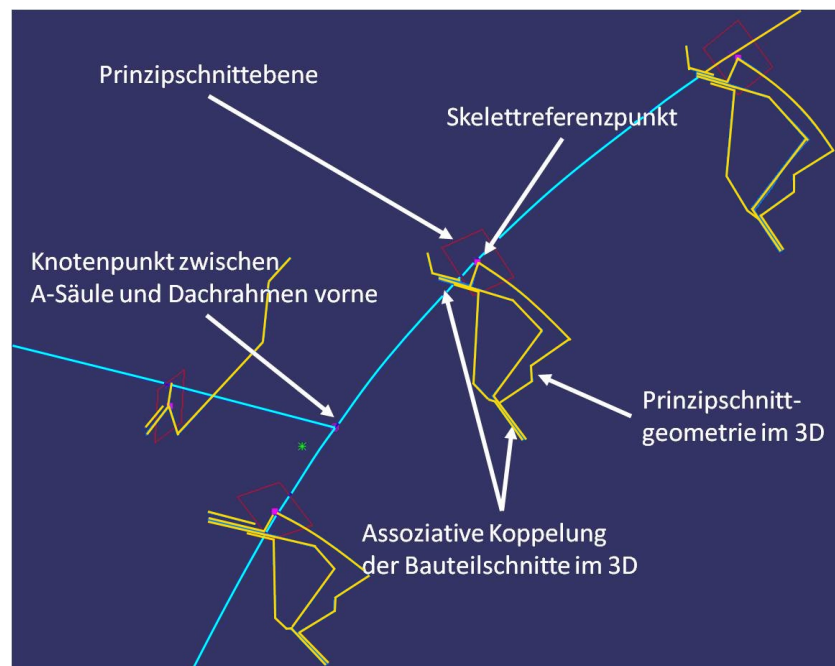


Abbildung 3.6: Aufbau der Bauteilprinzipschnitte auf Basis des Exterieurskeletts

sätzlichen Freiheitsgrad zur Schnittpositionierung. Das erste Schnittsegment geht im vorliegenden Beispiel in der Regel von der Position der Skelettkurve aus und wird immer in der Schnittebene definiert. Die einzelnen Schnittsegmente eines Bauteiles werden über Koppelpunkte an den Enden des Schnittsegments miteinander verbunden und stehen im 3D für die Erstellung von Führungskurven zur Verfügung. Die Schnittsegmente der Bauteile können hierbei assoziativ zueinander definiert werden und zusätzliche Eingaben, wie Entformwinkel, berücksichtigen. Mögliche Einstellungen sind hierbei Abstandsdefinitionen sowie Winkel- und Parallelitätsbedingungen. Die 3D-Schnitte können beliebig erweitert werden, beispielsweise durch Schnittsegmente von Türen und Klappen, siehe Kapitel 3.1.2.



Die Umsetzung der Bauteilschnitte wird im Gegensatz zu sketchbasierten Methoden in der Konzeptentwicklung [176, S. 97] nicht im 2D bewerkstelligt und erlaubt daher eine individuelle Nutzung von Schnittsegmenten und der Koppelpunkte der einzelnen Schnittsegmente im 3D. Prinzipschnitte werden in aktuellen CAD-Systemen im 3D als ein aggregiertes geometrisches Objekt zur Verfügung gestellt und enthalten die Summe der Einzelsegmente. Eine Weiterverarbeitung von einzelnen Schnittsegmenten ist auf Basis dieser 2D-Schnitte nur mit zusätzlichem Aufwand möglich. Durch die Nutzung von 3D-Schnitten erhöht sich der Freiheitsgrad zur Gestaltung der darauf aufbauenden Bauteilflächen. Ein weiterer Grund für eine Schnittdefinition im 3D stellt die teilweise nicht eindeutige Parametrierung von 2D-Schnitten dar. Geometrie wird in 2D-Schnitten oftmals über Abstandsparameter gesteuert. Bei der Definition des Abstandes existieren grundsätzlich zwei gültige Lösungen. Im 3D kann die Definition eines Prinzipschnittes eindeutig bestimmt werden. Die einzelnen Segmente eines Schnittes können im 3D direkt adaptiert und dessen Auswirkungen in Echtzeit visualisiert werden.

Im vierten Arbeitsschritt des hierarchischen Modelles in Abbildung 3.4, der Gestaltung von funktionalen Objekten, werden Geometrien aufgebaut und zentral zur Verfügung gestellt, welche eine Bedeutung für mehrere Strukturkomponenten besitzen. Ein Beispiel hierzu sind der Fahrzeugunterboden oder die Feuerwand, welche als beidseitige Anlagefläche dienen und den Beschnitt der angrenzenden Bauteilprofile bestimmen. Durch diese zentrale Instanz in der Modellhierarchie kann der Aufwand zur Definition und Steuerung von Bauteilabhängigkeiten reduziert und die Modellstabilität gesteigert werden.

Die Darstellung der Produktflächen und Bauteilbeschreibung wird auf der fünften Arbeitsebene umgesetzt. Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes werden nach objektorientierten Ansätzen die Bauteil- und Prozessmetadaten im Bauteilobjekt hinterlegt. Hierzu zählen beispielsweise Bauteilmaterialien, Wandstärken, Bauteilidentifikationsnummer sowie der Herstellungsprozess. Diese können in nachgelagerten Entwicklungsschritten, beispielsweise CAE, CAM, weiter verwendet werden. Der automatisierte Export der Bauteildaten aus dem zentralen Konzeptmodell in einzelne Bauteile in einem Produktmodell setzt auf die Metadatenstruktur dieses Arbeitsschrittes auf. Zur flexiblen Steuerung der Geometrie, welche besonders in der Konzeptphase erforderlich ist, können parametrisch assoziative Methoden angewendet werden. Im Konzeptmodell wird die Gestaltung vereinfachter, jedoch repräsentativer Flächen angestrebt, um den Erstellungsaufwand gering zu halten und die geometrische Flexibilität zu erhöhen. Eine Reduktion der Komplexität in der Darstellung der dreidimensionalen Flächen kann durch den Verzicht auf Details, wie beispielsweise Flächenverrundungen und Verprägungsflächen, erreicht werden.

Um komplexe lokale Geometrien und Sonderlösungen während der Konzeptphase umzusetzen, kann die vereinfachte Geometrie des Konzeptmodells durch native Modellierungsfunktionen im CAD-System beliebig erweitert werden. Dieser Umstand trägt wesentlich zur effektiven Modellgestaltung und Umsetzung neuer Konzepte bei.

Beispielsweise sind dies die Konstruktion von Gussknoten im Rahmen von Space-Frame-Bauweisen oder Faserverbundkomponenten als Teil von Multi-Materialkonzepten in der Strukturentwicklung. Die Darstellung mehrlageriger Multimaterialbauteile (siehe Kapitel 2.3.3) wie Faserverbundwerkstoffe, erfordert eine verstärkte Beurteilung der Topologie bereits in der Konzeptphase. Diese Analyse beinhaltet die Machbarkeit in der Herstellung bezüglich Bauteiltopologie, Radien und Faserausrichtung, welche einen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils haben. Anhand des Modellierungsansatzes im nativen CAD-Modell kann diesen Anforderungen entsprochen werden.

Um die Stabilität der internen Parametrierung in diesem hierarchischen Ansatz zu gewährleisten wurde der Ansatz der objektbasierten Referenzierung auf Basis der Primärdatenstruktur gewählt. Dies bedeutet im vorliegenden Beispiel eine Referenzierung rein auf geometrische Objekte, welche im CAD-Strukturbaum abgelegt sind. Die Weiterverwendung von abgeleiteten geometrischen Objekten in der Sekundärdatenstruktur wird aufgrund reduzierter Änderungsstabilität vermeiden. Dies sind beispielsweise extrahierte Flächensegmente eines Flächenverbundes, Teile eines Kurvenzuges oder Kantenpunkte. Die Möglichkeiten welche Hybridmodelle [8] in modernen CAD-Systemen anbieten werden somit in eingeschränktem Maße angewendet. Das Hybridmodell ermöglicht einen Zugriff auf geometrische Objekte der Primärdatenstruktur des CAD-Modelles, als auch auf abgeleitete Sekundärdatenstrukturen. Die Elemente der sekundären Datenstrukturen werden im vorgestellten Ansatz zur Visualisierung des Bauteiles verwendet. Diese Methodik von Hybridmodellen wird besonders in der Volumenmodellierung angewendet, die Vorgangsweise lässt sich auch auf den Umgang mit Flächenmodellen anwenden.

Die durchgängige Kombination von externen und internen Parametern und der zentrale Modellaufbau konnte vom theoretischen Konzept (Abbildung 3.4) in eine praxistaugliche Umsetzung übergeführt werden. Um dies zu erreichen wurden die Eingabeinformation, das Referenzskelett, zweidimensionale Schnitte, Ableitungen von Referenzflächen und charakteristische Kurven, die Bauteilmetadaten und die finalen Bauteilflächen in einer definierten Abfolge kombiniert. Durch die festgelegte Arbeitsabfolge ergeben sich zentral gesteuerte Zusammenhänge auf Systemebene und die Möglichkeit zur finalen Ableitung auf Bauteilebene. Die durchgängige Umsetzung des hierarchischen Konzeptes wird im folgenden im Aufbau des konzeptionellen Strukturmodells demonstriert.

Abbildung 3.7 zeigt die Umsetzung des hierarchischen Ansatzes für die ersten vier Hierarchiestufen des konzeptionellen Strukturmodells. Im ersten Schritt 'a' wird der Strak des Fahrzeugstyling über das Skelettmodell approximiert. Im Gegensatz zu zentral im Schnitt positionierten Skelettmodellen wird hier das Skelett direkt an die Kontur des Styling herangeführt. Anhand dieser Referenzierung ist es möglich, die Prinzipschnitte und Strukturgeometrie mit jeder Stylingvarianten assoziativ nachsetzen zu können. Dadurch kann der Modifikationsaufwand reduziert und ein vereinfachter Vergleich verschiedener Stylingvarianten unterstützt werden.

Im Schritt 'b' werden im nicht sichtbaren Strukturbereich die einzelnen Lastpfade durch parametrisch gesteuerte Kurven dargestellt. Diese Kurven können von Referenzpunkten der Fahrzeugarchitektur übernommen werden, wie beispielsweise Radmittelpunkte, Windlaufpunkt oder die maximale Fahrzeughöhe als Grenzfläche [48]. Auf das Skelett werden Normalebene aufgebaut, welche als Basisobjekte für die 3D-Prinzipschnitte dienen.

Die Profilschnitte 'c' werden im dreidimensionalen Raum umgesetzt, um eine selektive Nutzung einzelner Segmente zu ermöglichen. Die Schnitte für einzelne Bauteile können anhand von Parametern assoziativ verknüpft werden und implizieren daher eine bauteilübergreifende Abstimmung. Bei der Adaption des Profilschnittes werden die Bauteile im Rahmen der assoziativen Bedingungen automatisch angepasst.

Basierend auf Schnitten können funktionale Elemente 'd' abgeleitet werden, wie beispielsweise die begrenzende Kurve des Einstiegsbereiches.

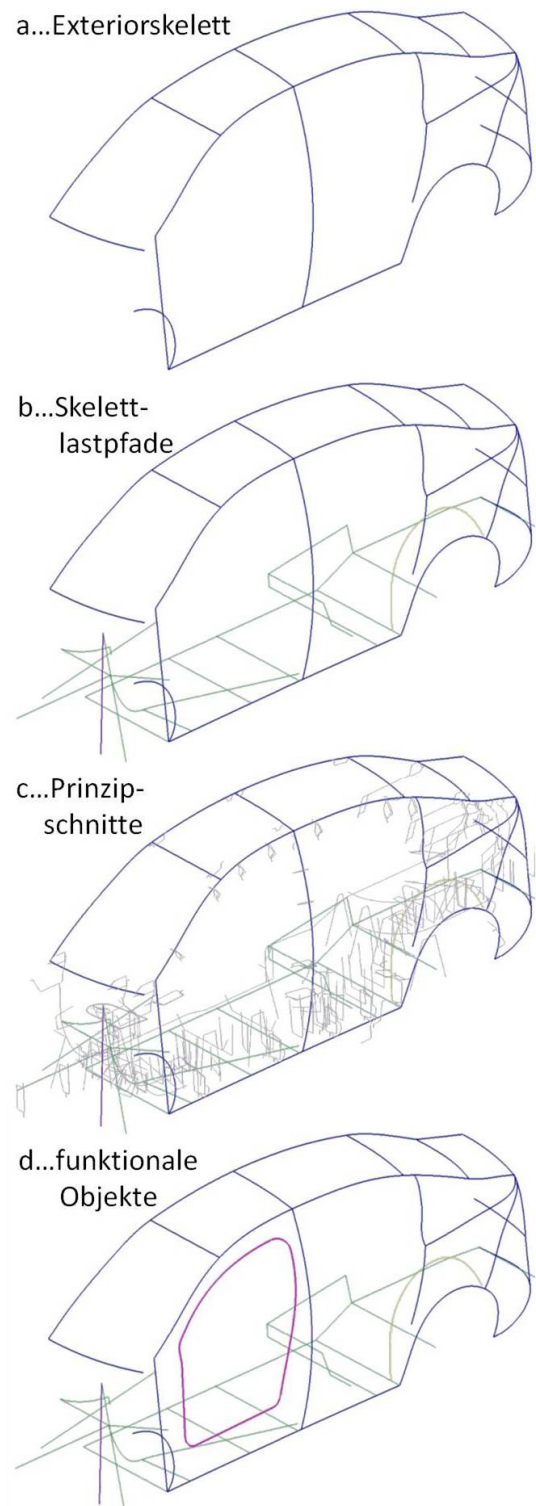


Abbildung 3.7: Konzeptstruktur bestehende aus Exteriorskelett, Lastpfaddefinition, Prinzipschnitten und funktionalen Geometrieobjekten

Der Einstiegskomfort kann auf Basis des Sitzreferenzpunktes, zusätzlichen Flächen des Interiorstylings und des Türeinstiegsflansches, beispielsweise anhand CAD integrierter Werkzeuge (z.B. RAMSIS [103]), am Konzeptmodell bewertet werden [25, S. 590], siehe Schritt 'e'. Erste Untersuchungen zum Einstiegskomfort können somit ohne detaillierte Bauteilkonstruktion erfolgen.

Neben statischer Bauraumdefinition können kinematische Bedarfe der geometrischen Integration, wie ein Radhüllgebirge, als Eingabe-größen in das Konzeptmodell integriert werden. Anhand von Referenzpunkten auf der Grenzfläche des Radhüllgebirges 'f', kann der Bauraumbedarf der Radkinematik direkt im Strukturmodell berücksichtigt werden.

Einzelne Strukturpfade können im nächsten Schritt 'g' zu einem durchgängigen Lastpfad, beispielsweise für Energieabsorption eines Frontalaufpralles, aggregiert werden. Die Verknüpfung erfolgt über operationale Funktionen (z.B. Verrundung), welche in den Übergangsbereichen der einzelnen Segmente appliziert werden. Diese unterstützen eine homogenere Formgestaltung.

Im Schritt 'h' werden Referenzflächen aufgebaut, welche als Eingabeflächen für die weiteren Konstruktionsflächen dienen. Eine Referenzfläche im vorliegenden Strukturmodell ist der Fahrzeugunterboden, welcher für eine Vielzahl von weiteren Bauteilen als Begrenzung dient. In diesem Fall wird von der profilorientierten Konstruktion der Prinzipschnitte, wie zum Beispiel an der A-Säule, abgegangen und es werden Profilbauteile mit flächigen Bauteilen miteinander kombiniert.

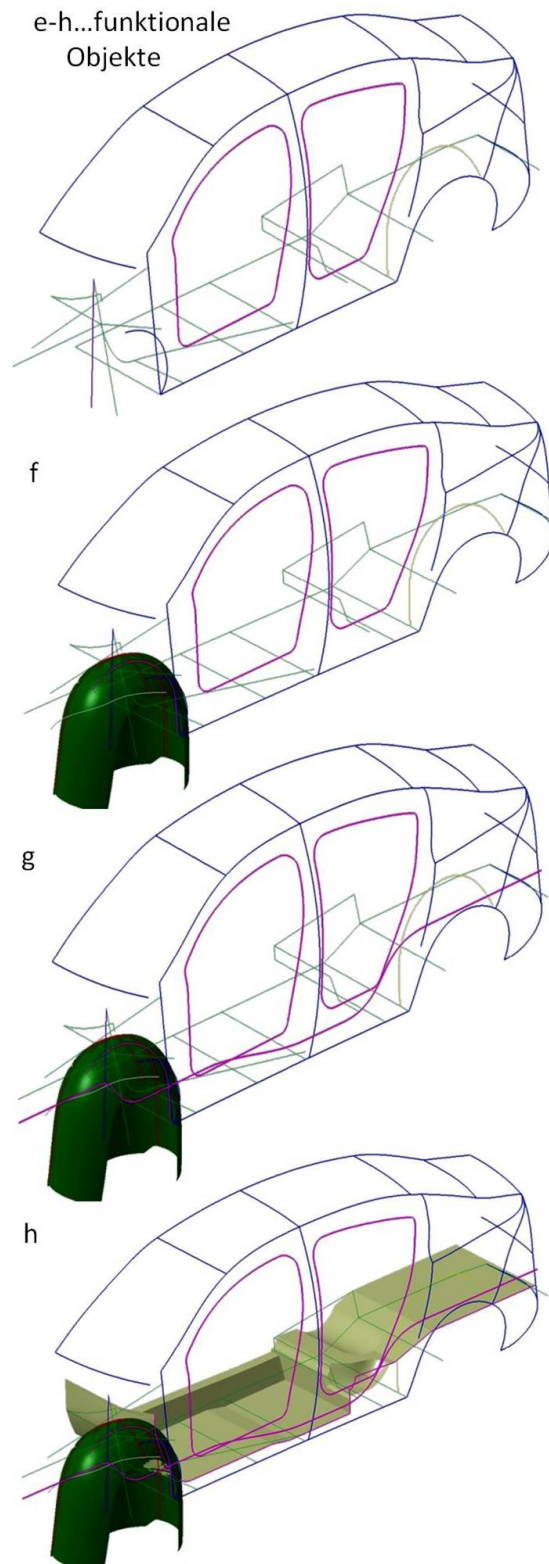


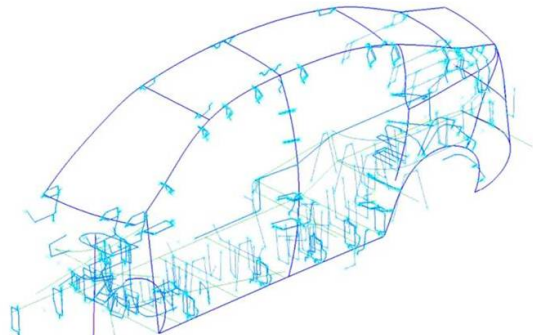
Abbildung 3.8: Ableitung von funktionalen geometrischen Objekten auf Basis der Prinzipschnitte

Auf Basis der Profilquerschnitte können skalierte Profile für die Flächengestaltung generiert werden, siehe Schritt 'i'. Die Referenz der Skalierung verweist hierbei auf den jeweiligen Ankerpunkt auf dem Skelett, wodurch jeder Schnitt entlang des Skeletts verschoben werden kann. Durch eine Skalierung können anhand eines Konzeptmodelles unterschiedliche Größenverhältnisse abgebildet und Anpassungen der Querschnitte an die erforderliche Dimension umgesetzt werden.

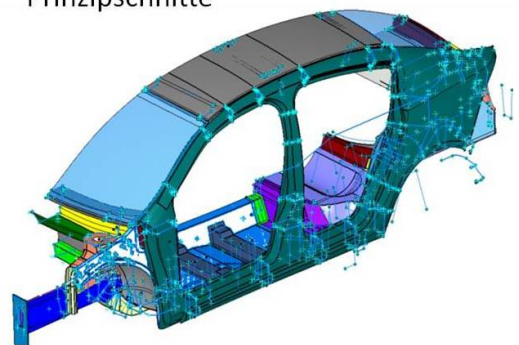
Der Entwicklungsschritt 'j' zeigt die Visualisierung von 65 Konzeptbauteilen für eine halbseitige Fahrzeugstruktur, welche im nativen CAD-System umgesetzt wurde. Die angewendeten Flächenoperationen beschränken sich auf zwei Flächentypen (Knotenflächen und Füllflächen). Die Auswahl der Flächen wurde aufgrund der Stabilität und Steuerbarkeit auf der Basis von Kantenelementen gewählt. Anhand dieser Flächen ist es möglich, alle Flächenübergänge punkt- ( $c_0$ ), tangential- ( $c_1$ ) oder krümmungsstetig ( $c_2$ ) zu gestalten, sodass keine Einschränkung in der fortlaufenden Detaillierung entsteht.

Nachfolgend (Schritt 'k') wird im Konzeptmodell die Verbindungstechnik auf Basis der Bauteiltrennungen generiert. Anhand der Schnitte im 3D können zu jeder Flanschfläche Führungskurven erzeugt werden, welche als Träger von punktförmigen und linienförmigen Verbindungstechniken dienen, siehe Abbildung 3.10. Die Führungskurven werden nicht von der Fläche abgeleitet, sondern als Kurven im Raum auf Basis des Prinzipschnitts definiert. Die Ausrichtung der Kurve wird durch eine Normaldefinition von der Schnittebene gesteuert.

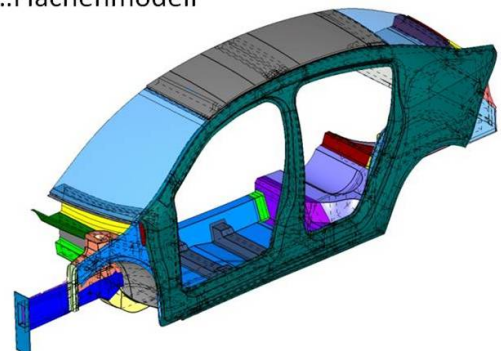
i...Skalierbare Prinzipschnitte



j...Flächenmodell und Prinzipschnitte



k...Flächenmodell



l...Verbindungstechnik

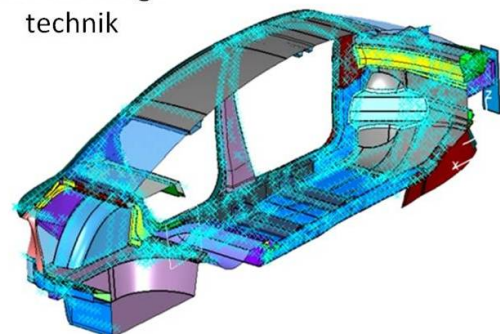


Abbildung 3.9: Finaler Aufbau der Konzeptflächen basierend auf skalierbaren Prinzipschnitten

Anhand der vorgestellten Methode kann die gesamte Fahrzeugstruktur durch die Änderung von unterschiedlichen Parametern adaptiert werden. Charakteristisch für das dargestellte Strukturmodell ist die Assoziativität der einzelnen Bauteile zueinander durch zentrale Referenzen des Skelettes und der Profilquerschnitte. Das gesamte Strukturkonzept kann in Bezug auf die Topologie durch Adaption des Skelettmodells variiert werden. Die Anpassung des Skelettes geschieht durch die Modifikation der Knoten- und Diskretisierungspunkte des Skelettes. Die Prin-

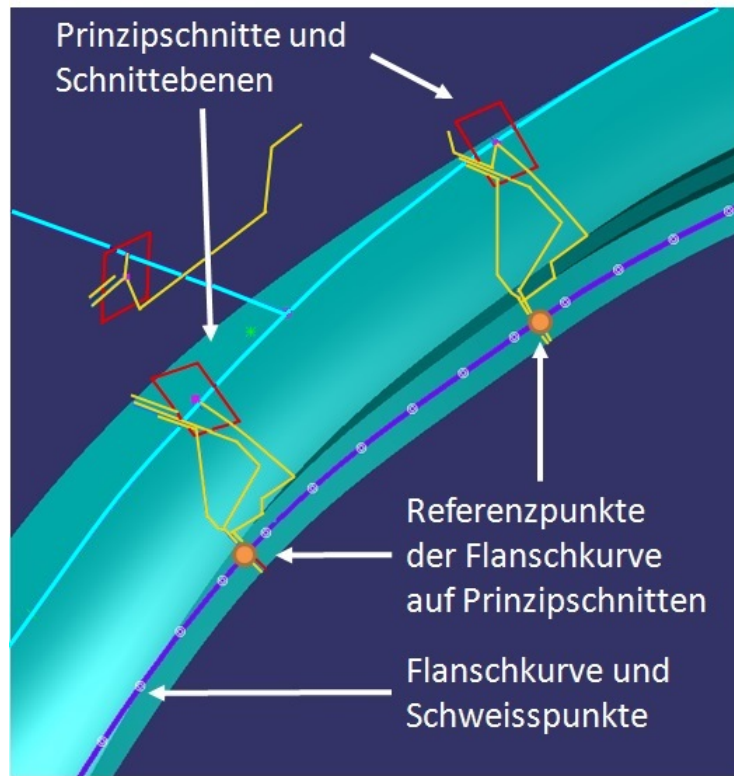


Abbildung 3.10: Definition der Flanschkurve anhand von Prinzipschnitten und der Applikation von Schweißpunkten als Verbindungstechnik

zipschnitte können entlang der Skelettkurven verschoben werden und beeinflussen ebenso die Topologie. Jeder Prinzipschnitt kann in Bezug auf einzelne Schnittsegmente adaptiert und erweitert werden und ermöglicht die Anpassung der Bauteilgeometrie. Durch interaktive Anpassung von Skelettreferenzpunkten und Profilschnitten im 3D anhand von Indikation und Echtzeitadaption der Geometrie kann weitgehend auf die Eingabe von Parameterwerten verzichtet werden. Ein Beispiel zur parametrischen Modelladaption ist die Änderung des Strukturmodelles aufgrund der Modifikation des Radstandes, siehe Abbildung 3.11.

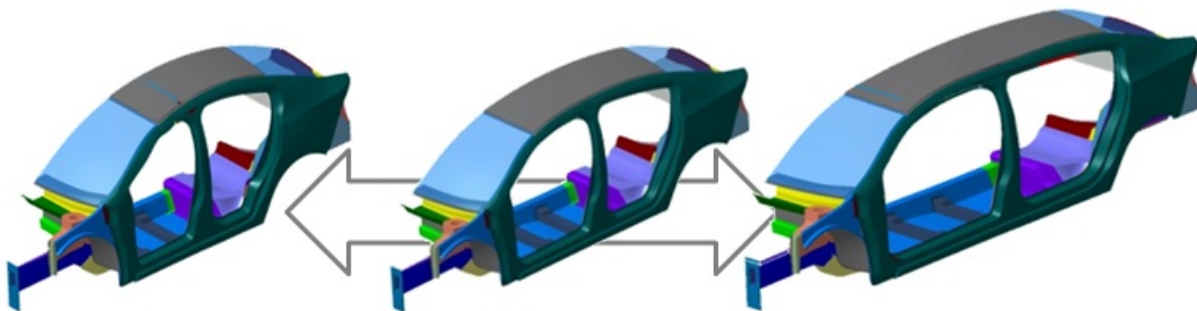


Abbildung 3.11: Variation des Radstandes des parametrisch Konzeptmodelles [126]

Im dargestellten Änderungsbeispiel wurden Knotenpunkte des Skelettes auf die Radmittelpunkte des Fahrzeuges referenziert. Der Ansatz zur Koppelung von Gesamtfahrzeugplan und Strukturmodell ist bereits in der Literatur beschrieben [48, S. 11]. Durch Adaption der Radmittelpunkte verschieben sich die Knotenpunkte des Skelettes, sowie die Prinzipschnitte assoziativ im Raum. Die Parametervariation des Radstandes konnte im dargestellten Beispiel innerhalb von zwanzig Minuten umgesetzt werden. Die Geometrie blieb, abgesehen von geringfügig erforderlichen Nachbearbeitungen in Übergangsbereichen der A- und C-Säule, bei dieser Variation stabil und bestätigte die Eignung des parametrischen Modelles für erforderliche Änderungen in der Konzeptphase.

Neben der parametrischen Steuerung der Abmaße des Fahrzeuges, wurde eine Methode zur Adaption der Querschnitte durch einen Skalierungsparameter für jeden Prinzipschnitt implementiert, siehe Abbildung 3.12. Anhand der Skalierungsparameter können Querschnitte der Struktur an Vorgaben der Strukturmechanik angepasst werden, wobei auch systematische Untersuchungen angedacht werden können, beispielsweise durch eine DOE-Optimierung [163, S. 152]. Aus 80 möglichen Einflussparametern er-

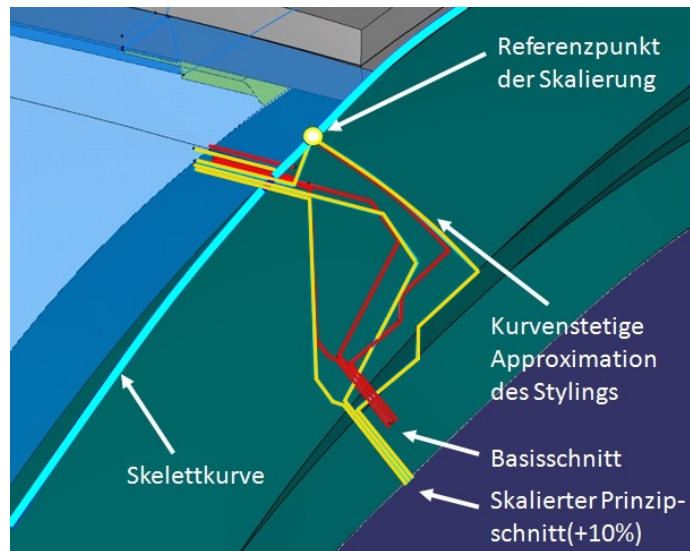


Abbildung 3.12: Skalierung von Querschnitten zur Optimierung von Struktureigenschaften (Skalierung um 10 Prozent)

geben sich bei einer DOE  $2^{80}$  Kombinationen für des Konzeptmodell. Um die Anzahl der Variationsparameter und damit die Berechnungszeit zu reduzieren, können Parametergruppen gebildet werden. Beispielsweise können Schnitte am Schweller durch einen Parameter gesteuert werden. In Summe konnten somit 20 Hauptskalierungsparameter für die Steuerung des Strukturmodelles herausgearbeitet werden. Zielwerte der Optimierung sind beispielsweise verringertes Strukturgewicht und eine Steigerung der statischen und dynamischen Biege- und Torsionssteifigkeit [53, S. 63]. Die Steuerung könnte anhand von Werkzeugen des FE-Pre- und Post-Processing, beispielsweise Hyperstudy [4, S. 166], durchgeführt werden. Dieser gedankliche Ansatz wird im vorliegenden Beispiel aufgrund der Fokussierung auf Konstruktionsmethoden nicht weiter vertiefend bearbeitet.

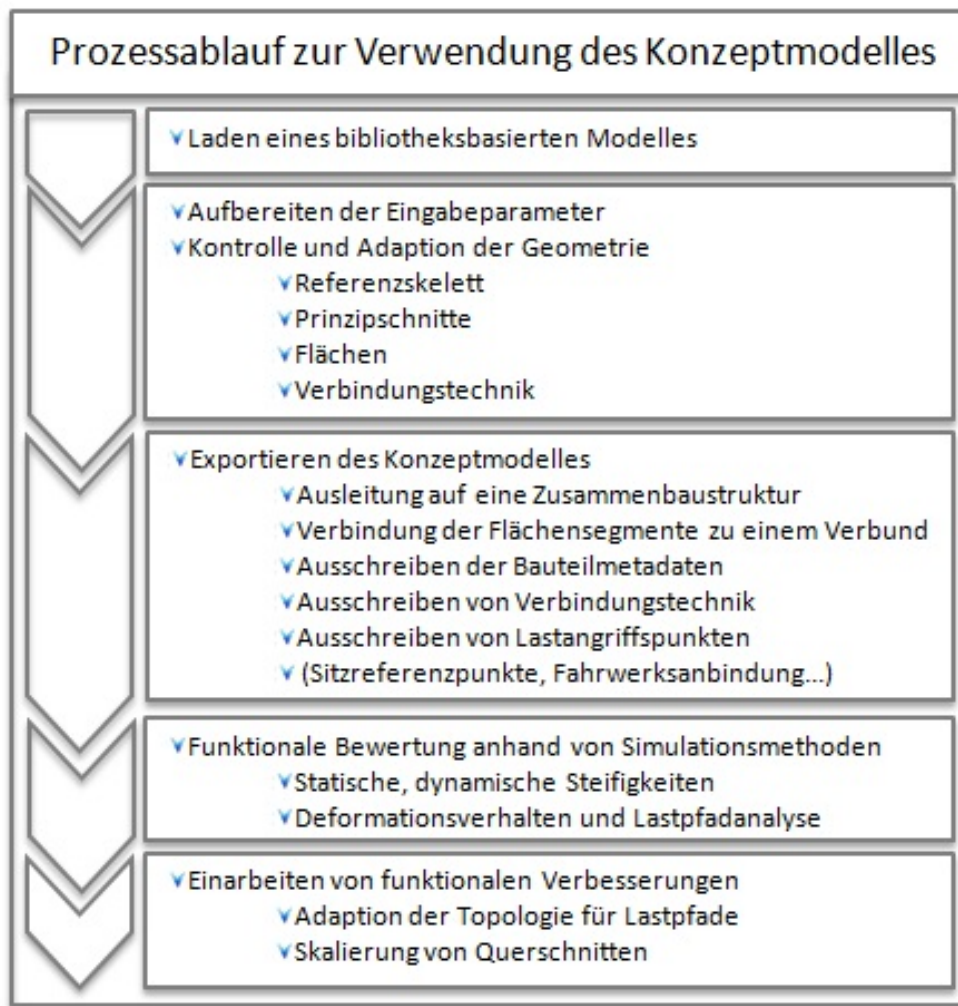


Abbildung 3.13: Ablauf zur Verwendung des Konzeptmodelles im Entwicklungsfortschritt

Der Entwicklungsablauf für das Konzeptmodell ist in Abbildung 3.13 dargestellt und startet mit dem Entwicklungsschritt der Erstellung eines neuen Strukturmodelles beziehungsweise der Weiterverwendung von bibliothekbasierten Modellen. Im zweiten Entwicklungsschritt wird die Bauteilkonstruktion im Konzeptmodell durchgeführt. An die Produktmodellierung schließt der Prozess der CAD-Datenaufbereitung und Übermittlung an weitere Entwicklungsdisziplinen an. Anhand des Konzeptmodelles sollen funktionale Struktureigenschaften, statische und dynamische Biege- und Torsionssteifigkeit und dessen Auswirkung auf Akustik und Schwingungskomfort und Fahrzeuggewicht analysiert werden und in die Strukturkonzeption wieder einfließen. Dieser Punkt ist in der Übersichtsdarstellung 3.2 im Rahmen von simultanen Entwicklungsschleifen dargestellt. In den folgenden Absätzen wird die Aufbereitung und der Export des Konzeptmodelles und die Integration von Verbesserungsmöglichkeiten behandelt.



Um die mechanischen Struktureigenschaften des Fahrzeuges zu beurteilen, ist das Produktmodell in einen Datensatz für eine numerische Analyse anhand einer Finite-Elemente Simulation überzuführen [182]. Zur simulationsbasierten Beurteilung sind die geometrische Repräsentation, Materialeigenschaften und die Verbindungstechnik im Berechnungsmodell erforderlich. Die vereinfachten Konzeptflächen des Strukturmodelles eignen sich aufgrund der geringen Detaillierung für grundsätzliche Analysen, wie eine globale Steifigkeit, und können nicht belastbar für lokale Untersuchungen, wie beispielsweise nicht-lineare Festigkeitsbeurteilung oder Lebensdaueranalysen, eingesetzt werden. Der Grund hierfür liegt in der Flächenabstraktion, beispielsweise durch scharfe Kanten im Konzeptmodell und deren Einfluss auf lokale mechanische Effekte.

Zur Geometriedatenversorgung von CAX-Systemen sind neutrale Schnittstellen für unterschiedliche Datenformate (.step, .iges, .stl, .jt, .3Dxml, .wrl) [116, S. 431] in CAD-Systemen implementiert. Die Rückgabe von Information von CAX-Systemen in CAD-Systeme ist anhand dieser Standardschnittstellen aktuell nicht durchgängig umgesetzt [107, S. 42]. Für die Übergabe von Metadaten, beispielsweise von Verbindungstechnik, gibt es keinen spezifizierten Standard. Stattdessen existieren individuelle Methoden, welche je nach eingesetzter Software zum Einsatz kommen. Die Konvertierung von Daten zwischen Entwicklungssystemen ist in der Regel mit einem Informationsverlust behaftet und betrifft besonders die Weitergabe von Metadaten. Dies ist ein Resultat der Spezialisierung von computergestützten Systemen, welche unterschiedliche Datenformate und Verfahren zur Datenverarbeitung und Speicherung einsetzen.

Schlanke Austauschprozesse ermöglichen effiziente Optimierungszyklen und einen fortlaufend erhöhten Produktreifegrad. Zur Umsetzung eines beschleunigten, übergreifenden und systematischen Datenaustausches sind die Anforderungen der einzelnen Systeme zu berücksichtigen. Anforderungen der FE-Modellerstellung sind die korrekte diskrete Vereinfachung des Modelles für die numerische Berechnung und Übertragung relevanter Metadaten. Die durchgängige Weitergabe von Daten zwischen Entwicklungssystemen kann durch Methoden im CAD unterstützt werden. Die Möglichkeiten im CAD beinhalten Methoden der geometrischen Modellierung, der Strukturierung im Bauteil, Nomenklatur von Elementen, Hinterlegung von Metadaten bis zur Definition von eigenen Übergabekonzepten anhand neutraler Datenschnittstellen.

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel des konzeptionellen Rohbaus wird das zentrale Modell beim Durchlauf der Übergabeprozedur von CAD zu CAE auf ein dateibasiertes Produktmodell übergeführt, um an Routinen zur Vernetzungs- und Verbindungstechnikmodellierung aus der Serienentwicklung anzuknüpfen.

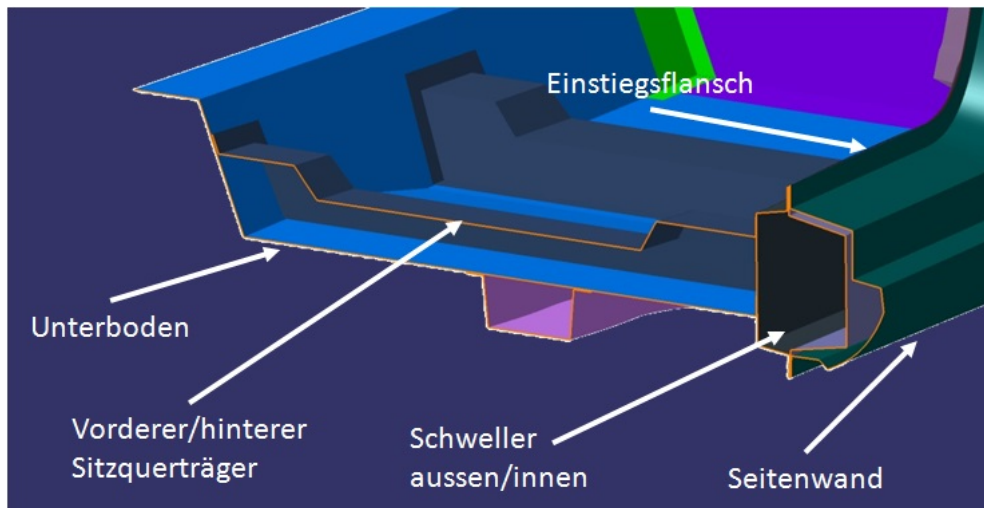
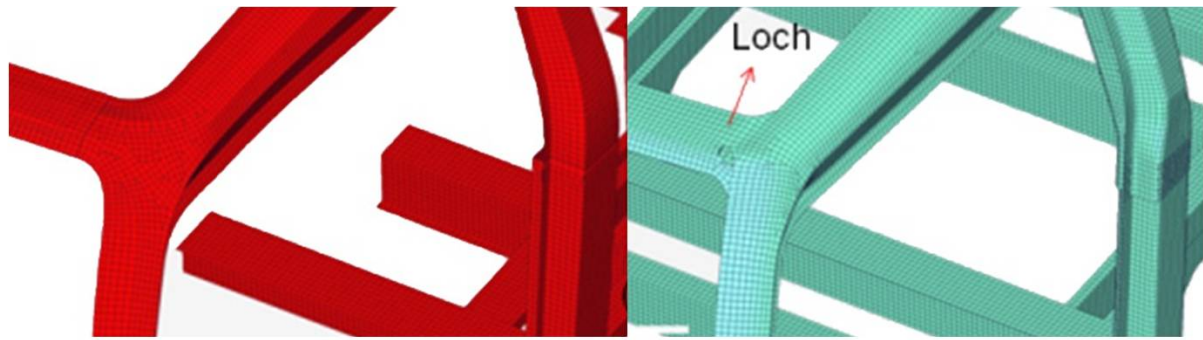


Abbildung 3.14: Visualisierung der Mittelflächen durch einen DMU-Schnitt im Fahrzeugunterboden

Zur Vereinfachung der Berechnungsmodelle wird versucht, das Bauteilvolumen durch eine repräsentative Mittelfläche und eine Bauteilwandstärke zu ersetzen. Die Darstellung der Bauteile im Demonstrationsbeispiel, siehe Abbildung 3.14, ist an die CAE-Modellierung anhand von Schalenelementen angelehnt, welche sich in der Modellierung von Mittelflächen manifestieren. Mittelflächen können für Bauteile mit konstanter Wandstärke direkt im CAE-Modellaufbau verarbeitet werden, wodurch zusätzliche Aufbereiter-routinen zur Ermittlung dieser Mittelfläche [13] entfallen können. Dies ist ein allgemeiner Ansatz in der FE-Modellierung, aus welchem eine reduzierte Elementanzahl im CAE-Modell resultiert. Durch die Abstraktion der Flächen ist damit zu rechnen, dass sich eine Differenz der funktionalen Bewertung von vereinfachten und detaillierten Modellen ergibt. Die funktionale Affinität von detaillierten und vereinfachten Geometriemodellen wird im nachfolgenden Kapitel 3.1.2 näher beleuchtet. Für Bauteile, welche keine konstante Wandstärke aufweisen, wird zur korrekten Beschreibung der Bauteileigenschaften das Volumen anhand von Solidmodellierung vernetzt und an Schalenmodelle gekoppelt. Für Multimaterialbauteile kann die Bauteilträgerfläche durch Kurven zur Definition der Lagenbegrenzung ergänzt werden. Durch eine vereinfachte Modellierung, beispielsweise den Verzicht auf Radien, Verprägungsflächen und Löcher im Produktmodell, wurde ein weiterer Beitrag zum vereinfachten Modellaufbau in den FEM-Simulationsmodellen geleistet.

Zur Übermittlung eines Flächenverbundes über Entwicklungssystemgrenzen spielt die logische Verknüpfung von Einzelflächen eine Rolle. Aktuelle Pre-Processoren beherrschen die Interpretation von nativen CAD-Formaten und sind in der Lage logische Operanden des CAD-Systems zu interpretieren. Je nach Anwendungsbeispiel können Bauteile als ein Flächenverbund oder einzelne Abschnitte, wie ein Lagenaufbau, übergeben werden.



Konzeptgeometrie (FCM )

117.000 Knoten (gesamte Struktur)  
111.000 Elemente (gesamte Struktur)  
6 Minuten Batchmeshing (halbe Struktur)  
841 HM-QualityIndex

Native Geometrie (CATIA V5 )

147.000 Knoten (gesamte Struktur)  
141.000 Elemente (gesamte Struktur)  
22 Minuten Batchmeshing (halbe Struktur)  
614 HM-QualityIndex

Abbildung 3.15: Vergleich der automatisierter Vernetzung von Strukturkomponenten in Form von Konzeptgeometrie (links) und nativer Geometrie (rechts)

Abbildung 3.15 zeigt die Vernetzung von Geometrie eines Konzeptmodellierungswerkzeuges und nativer CAD-Geometrie. In diesem Vergleich weist die native Geometrie einen global besseren Qualitätsindex (614) auf. (Anmerkung: HM-QualityIndex steht für die Anzahl der erzeugten Elemente im FE-Netz, welche den Qualitätsanforderungen der Modellvernetzung nach einem Batchmesh-Prozess eines kommerziellen Pre-Processors nicht entsprechen) Bei Flächen eines nativen CAD-Modelles kann es trotz des besseren globalen Qualitätsindex zu lokalen Löchern in automatisch generierten FE-Netzen kommen. In dargestellten Fall durch Radien und Füllflächen im Bereich der A-Säule. Vernetzungsfehler bedeuten einen manuellen Aufwand zur Nachbereitung, um korrekte Ergebnisse in der FE-Simulation zu erzielen. Die Konzeptflächen zeigen daher Vorteile zur Übergabe des Strukturmodelles vom CAD-System an die CAE-Simulation ohne manuelle Aufbereitung.

Neben der Übergabe der geometrischen Daten sind Daten zur Verbindungstechnik an weitere Entwicklungssysteme zu übergeben. Grundsätzliche Eigenschaften von Verbindungstechnik bestehen aus dem Verbindungstyp und den zu verbindenden Bauteilen. Da Daten zur Verbindungstechnik nicht über standardisierte Schnittstellen übertragen werden, sind zusätzliche Lösungen zum durchgängigen Datentransfer erforderlich. Ein mögliches Konzept wird in Kapitel 3.2.1 vorgestellt. Zum Aufbau von Verbindungstechnik im FE-Modell sind Kriterien wie korrekte Bauteiltrennungen im CAD-Produktmodell zu berücksichtigen. Im vorliegenden Konzeptmodell wird die erstellte Verbindungstechnik anhand einer skriptbasierten Methode in eine zusätzliche Datei ausgeschrieben, welche die relevante Information des Verbindungstechniktyps und der Position enthält. Das Übergabeformat ist an die Vorgangsweise in Kapitel 3.2.1 angelehnt und entspricht auch den Übergabeprozessen in der Serienentwicklung.

#### **Zusammenfassung und Vergleich zu bestehenden Methoden**

Anhand des konzeptionellen Rohbaumodelles kann die Leistungsfähigkeit parametrisch assoziativer Konstruktionsmethoden demonstriert werden. Darüber hinaus wird gezeigt, dass komplexe Produktmodelle durch systematische Modellgestaltung effizient in nativen CAD-Systemen realisiert werden können. Um den Anforderungen in der Konzeptphase zu entsprechen, wurden konstruktive Ansätze speziell für diese Entwicklungsphase erarbeitet und umgesetzt. Die Nachteile komplexer nativer CAD-Konstruktion im Vergleich zu bestehenden Konzeptwerkzeugen in der Strukturentwicklung, beispielsweise nach dem 'Upfront-CAE' Ansatz ('SFE Concept [201, S. 1101ff], [35, S. 1119]), konnten in Bezug auf Erstellungsaufwand sowie geometrische Flexibilität minimiert werden. Darüber hinaus steht in nativen Systemen ein breites Spektrum von Modellierungsmethoden ohne direkte Abhängigkeit zu speziellen technischen Bauformen in der Strukturentwicklung, wie Faserverbundkonzepte oder Space-Frame-Technologien zur Verfügung. Dieser Aspekt ist insbesondere bei der Untersuchung neuer Materialkonzepte in der Strukturentwicklung relevant. Hier sind neue Randbedingungen und Modellierungsweisen zur werkstoffgerechten Konstruktion zu berücksichtigen. Das breite Modellierungsspektrum nativer CAD-Systeme hilft, neue Produktlösungen effektiv darzustellen und den Entwickler nicht durch reduzierten Umfang von Modellierungsfunktionen einzuschränken.

Der Ansatz zur Gestaltung von parametrischen Bereichsmodellen [176, S. 77] wird anhand des vorgestellten Ansatzes erweitert. Die vorgestellte Methode wird an einer Fahrzeugstruktur demonstriert und lässt sich erweitern, beispielsweise zur konzeptionellen Tür- [125] und Klappenentwicklung, siehe Kapitel 3.1.2 und über Prinzipschnitte assoziativ koppeln.

Die Umsetzung der vorgestellten Vorgangsweise in der Konzeptentwicklung ist nicht auf ein spezifisches CAD-System beschränkt. Es wurde bei der Gestaltung des Konzeptes Wert auf die Verwendung von Basisfunktionen eines CAD-Systemes gelegt, um eine CAD-System unabhängige Vorgangsweise darzustellen. Allgemeine Voraussetzungen bestehen in der Verfügbarkeit von parametrischen Modellierungsmethoden, welche in verwendeten CAD-Systemen in der Automobilindustrie Stand der Technik sind. Im Bereich der geometrischen Modellierung sind Methoden zur parametrischen Konstruktion, die Steuerung von Kantenmodellen im 3D, sowie die Erstellung von Flächen anhand von Kantenmodellen erforderlich. In Bezug auf notwendige Flächenfunktionen sind Füllflächen ('Fill') und Knotenflächen ('Junction'), welche sich durch Führungskurven steuern lassen, hervorzuheben. Eine Automationsschnittstelle des CAD-Systems kann den Bedienungskomfort zur Anwendung der Konzeptmethode unterstützen, stellt jedoch keine prinzipielle Anforderung zur Umsetzung des vorgestellten Konzeptes dar.

Anhand der nativen CAD-Arbeitsumgebung ist ein individueller Detaillierungsgrad für jedes Projekt und Modell wählbar und mit Fortlauf des Entwicklungsprojektes ohne Systembruch zu verfeinern. Durch die Umsetzung des Konzeptmodelles im nativen CAD können weitere simultane CAD-basierte Entwicklungsschritte durchgeführt werden. Dazu zählen die direkte Verknüpfung zur Auslegung des Gesamtfahrzeugmaßkonzeptes [96], Prüfung gesetzlicher geometrischer Rahmenbedingungen [176, S. 30ff], sowie die Styling-Technik Konvergenz. Durch die durchgängige Anwendung einer definierten Konstruktionsmethodik können wesentliche Fehlertypen in der Konstruktion [173, S. 594-599], wie Verbindungsfehler von Flächen, Singularitäten, Selbstverschneidungen, spitz zulaufende Flächensegmente, sowie überschneidende Volumenkörper unterbunden werden, was zur verbesserten Stabilität des komplexen Strukturmodelles führt.

Im Vergleich zu abstrakten Methoden, welche die Struktur anhand von vereinfachten Skelettmodellen und Ersatzsteifigkeiten [134, S. 450] oder vereinfachten Schalenkörpern [119, S. 361ff] bewerten, ergibt sich im vorgestellten Konzeptmodell folgender Vorteil: Die Ausprägung der Bauteile, komplexer Knotenbereiche, sowie die Lage und Eigenschaften von Verbindungstechniken, können analog zu detaillierten Produktmodellen berücksichtigt werden. Auf Basis des geometrischen Konzeptmodelles können statische als auch dynamische mechanische Eigenschaften geprüft werden. Dazu zählen Funktionseigenschaften in Bezug auf Struktursteifigkeit, Fahrzeugsicherheit und NVH [49, S. 96]. Die funktionale Vergleichbarkeit von vereinfachter Konzeptgeometrie und detaillierter Seriengeometrie, auf Basis der geometrischen Affinität, ist ein wichtiges Kriterium für das 3D-Konzeptmodell, siehe Kapitel 3.1.2. In der nachgelagerten virtuellen Funktionsabsicherung und Produktionsplanung können bestehende Methoden des Gesamtfahrzeugentwicklungsprozesses ohne Adaption weiterverwendet werden. Darunter fallen Aufbereitungsprozesse des CAE-Modellaufbaus, die Generierung von Verbindungstechnik, sowie die Weitergabe der Produktdaten an weitere SE Disziplinen. Trotz der Verwendung eines CAD-Systems konnte ein Produktmodell im Sinne einer leichtgewichtigen [59, S. 31], jedoch nativen Geometrie umgesetzt werden.

Tabelle 3.1: Verbesserung von nativen CAD-Methoden anhand der entwickelten Methodik im Vergleich zu speziellen Konzeptentwicklungswerkzeugen (Anmerkung: SE: Systemebene, BT: Bauteilebene) in Anlehnung an Tabelle 2.1

	CAD konz.	SFE Concept	FCM
Definierte methodische Vorgehensweise in der Modellierung	<b>gegeben</b>	gegeben	gegeben
Vorbereitung der Modellierung auf nachgelagerte Prozesse	<b>hoch</b>	hoch	hoch
Eignung für integrierte Optimierungsprozesse	<b>mittel SE,</b> mittel BTE	gering BTE, hoch SE	mittel BTE, hoch SE

### 3.1.2 Wissensbasierte Erstellung von Konstruktionsmodellen

#### Aspekte zur Gestaltung wissensbasierter Konstruktionsmodelle

Für die Gestaltung von wissensbasierten Konstruktionsmodellen ist eine gesamtheitliche Analyse der Fragestellung von Vorteil. Hierbei können die vier Phasen des Wissensmanagement nach VDI 5610 [188], Identifizieren und Akquirieren, Kategorisieren und Strukturieren, Speichern und Finden, sowie Anwenden und Nutzen als gedankliches Konstrukt verwendet werden. Die Umsetzung wissensbasierter konstruktiver Modelle kann zusätzlich aus den beiden Blickwinkel der funktionalen Auslegung als auch der Prozessintegration betrachtet werden. Es wird vorgeschlagen diese verschiedenen Aspekte bei der Gestaltung von wissensbasierten Werkzeuge gesamtheitliche einzubeziehen. Dazu zählt die Betrachtung der eigentlichen technischen Auslegungsschritte, die Analyse von Eingabe- und Ausgabegrößen und die Einbettung in den Entwicklungsprozess, sowie die Einbeziehung von externen Randbedingungen und der Infrastruktur, siehe Abbildung 3.16.

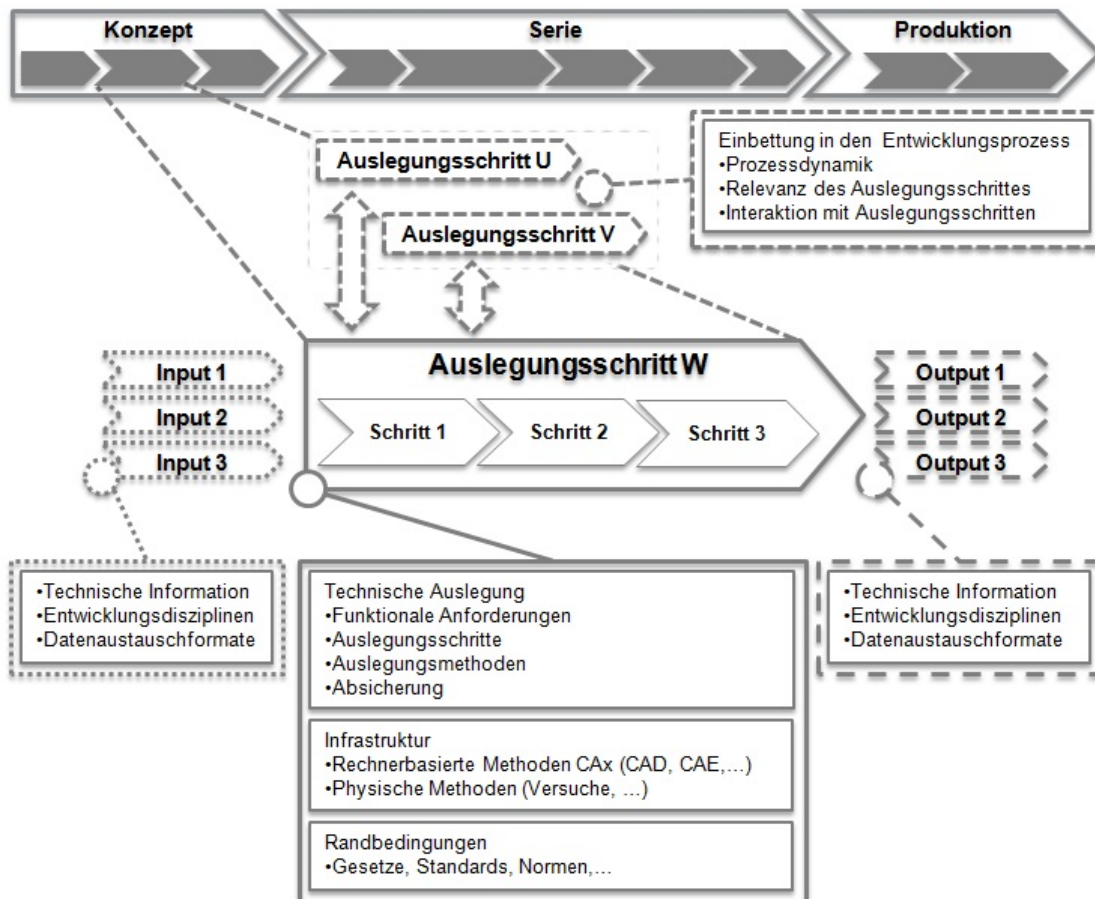


Abbildung 3.16: Analyse eines Entwicklungsschrittes in Bezug auf Prozessintegration, Eingabe- und Ausgabegrößen sowie der durchzuführenden Arbeitsschritte als Grundlage für die Umsetzung wissensbasierter Modelle

Erforderlich für die Analyse eines Entwicklungsschrittes ist eine Abstraktion durch die Erfassung der Veränderung des Entwicklungsstandes in Abhängigkeit von Eingabegrößen. Zusätzlich sind Rahmenbedingungen zu erfassen, beispielsweise die Einbettung in den gesamten Entwicklungsprozess. Faktoren sind hierbei die Prozessdynamik, welche sich über die Phasen des Entwicklungsprozesses ändern kann, oder der erforderliche Reifegrad der Auslegung. Auch die Belastbarkeit der Eingabeinformation ist in diesem Kontext zu bewerten. Zusätzlich sind Wechselwirkungen zu weiteren Entwicklungsschritten zu betrachten. Darunter fallen die erforderlichen Entwicklungsschritte zur Gestaltung der Eingabeinformation, sowie die Kenntnis über die darauf aufbauenden nachfolgenden Entwicklungsschritte. Besonders hervorzuheben sind wechselseitige Abhängigkeiten von zwei oder mehreren Auslegungsschritten und deren effiziente Iteration. Durch den Einsatz von wissensbasierten Methoden kann eine Verschiebung von Arbeitsschritten im Entwicklungsprozess erreicht werden. Eine Fragestellung hier ist sind möglichen Auswirkungen, welche durch eine zeitliche Vorverlagerung erreicht werden können. Eine grundsätzliche Betrachtung dieses Potentials wurden in Kapitel 2.1.2 behandelt.

Die Kenntnis der verknüpften Entwicklungsschritte führt in der nächsten Phase zur Analyse der beteiligten Entwicklungsdisziplinen und der technischen Eingabe- und Ausgabeinformation. Das Ziel ist es, eine Beschreibung der Interaktionen zu erarbeiten, um alle für den Arbeitsschritt relevanten Ein- und Ausgabegrößen zu erfassen. Neben der inhaltlichen Abstimmung im Entwicklungsprozess ist auch die systembasierte durchgängige Übergabe von Informationen und Daten zu betrachten. Hierzu zählen beispielsweise Möglichkeiten der Datenübergabe anhand verschiedener Datenformate.

Der Schwerpunkt der Analyse beschäftigt sich mit der technischen Auslegung, welche durch ein wissensbasiertes Produktmodell unterstützt werden soll. Kernpunkte hierzu sind die funktionalen Anforderungen, welche erfüllt werden müssen. Das übergeordnete Ziel des wissensbasierten Modelles besteht in der Wiederverwendbarkeit, auch bei geänderten Fragestellungen und Rahmenbedingungen. Als externe Randbedingungen sind im Rahmen des Auslegungsprozesses Gesetze, Normen und Standards zu berücksichtigen. Bereits eingesetzte Lösungsansätze und Entwicklungsmethoden sind zu evaluieren, die konventionell durchgeführten Arbeitsschritte darzustellen, und die eingesetzten Werkzeuge für die einzelnen Arbeitsschritte zu erheben. Ein weiterer Aspekt sind die Möglichkeiten zur funktionalen Absicherung der bearbeiteten technischen Auslegung. Die Arbeitsschritte, als auch die Absicherung, werden durch die verfügbaren Ressourcen geprägt; hierzu zählen rechnergestützte und auf Versuchsaufbauten basierende Methoden.

Die erhobenen Informationen der Analyse sind entsprechend in der Konzeption des wissensbasierten Modells zu berücksichtigen. Übergeführt in die Konzeption eines wissensbasierten Modelles sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Ableitung von Systemanforderungen auf die jeweilige Fragestellung
- Definition der funktionalen Anforderungen an das System/Modul/Bauteil
- Darstellung der Prozessanforderungen und Prozessintegration
- Erhebung verfügbarer Ressourcen der Entwicklungsinfrastruktur
- Bewertung von bestehenden Lösungsansätzen
- Entwicklung neuer Lösungsansätze
- Definition von Schnittstellen zur Interaktion mit weiteren Auslegungsschritten
- Bewertung von Methoden im Kontext der Anforderungen und Infrastruktur
- Erhebung von Auswirkungen neuer Lösungsansätze hinsichtlich der Integration in den Entwicklungsprozess

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Erstellung von wissensbasierten CAD-Modellen bearbeitet. Hierbei wird die geometrische Modellierung um funktionale, fertigungstechnische und prozessbedingte Aspekte ergänzt. Basierend auf verfügbaren Funktionen des CAD-Systems kann durch systematische Vorgehensweise eine anforderungs- und funktionsabhängige Logik in geometrische Modelle implementiert werden. Darunter fallen die Berücksichtigung des Herstellungsverfahrens, Implementierung von geometrischen Abhängigkeiten (Bauraum, Formvorgaben, Freigänge) sowie die Steuerung der geometrischen Ausprägung (Topologie und Form) aufgrund von funktionalen Anforderungen. Zusätzlich können Anforderungen von nachgelagerten Prozessschritten integriert werden. Durch eine Integration von Anforderungen, Funktionen, Geometrie und dessen systematischer Steuerung kann von wissensbasierten Modellen gesprochen werden.

Wissensbasierte Modelle bieten Potential zur Reduktion des Arbeitsaufwandes in der Konzeptphase durch die Anwendung vorgefertigter Lösungsmodule. Die Anforderung zur Wiederverwendbarkeit von wissensbasierten Modellen beeinflusst die Umsetzung bezüglich Erweiterbarkeit, Fehlerbearbeitung, konsistenter Modellstruktur und geometrischer Stabilität. Die Implementierung von intelligenten und anpassbaren Strukturen und einer Logik in das Modell können zur Erfüllung dieser Anforderungen einen Beitrag leisten. Die Umsetzung dieser Konzepte bedeutet jedoch eine Erhöhung des Erstellungsaufwandes für wissensbasierte Modelle. Ausprägungen für wissensbasierte Konstrukte erstrecken sich von Funktionsmodulen eines Bauteildetails ('Features' und 'Powercopies'), gesamten Bauteilen ('Templates'), Teilsystemen, bis zu Gesamtsystemen und können im Rahmen von Wissensbibliotheken im CAD verwaltet werden.



Die Festlegung funktionaler Zusammenhänge und deren Steuerung durch Stellparameter dient als Grundlage zur Erstellung wissensbasierter Modelle. Die Realisierung von wissensbasierten Modellen kann modular auf einer granularen Problemebene ansetzen, um für unterschiedliche Anforderungen verschiedene Lösungsstrategien und darauf konzipierte Lösungen spezifisch gestalten zu können. Auf übergeordneter Ebene ist zu berücksichtigen, dass einzelne wissensbasierte Module kombiniert werden können und so eine Durchgängigkeit vom spezifischen Auslegungsschritt zur Systemanforderung gewährleistet ist. Basierend auf Grundlagen der Parametrik kann Wissen in Form von geometrischen Objekten, Verknüpfungen und Steuerungsmethoden abgelegt werden. Assoziativität ermöglicht eine relative Festlegung und implizite Steuerung von Objekten ohne explizite Parametereingabe. Eine konsistente Logik der Modellierung und hierarchischer Strukturen kann eine Fehlerallokation durch verbesserte Modelltransparenz unterstützen. Möglichkeiten zur Anpassung an neue Fragestellungen sind in die Steuerung von wissensbasierten Modellen zu berücksichtigen. Dazu zählen im geometrischen Modell verwendete Referenzeingaben, beispielsweise Stylingflächen, angrenzende Bauteile oder eine veränderte Topologie zur Umsetzung und Optimierung der Bauteilfunktionen. Durch parametergesteuerte Modifikation am Bauteil kann auf geänderte Eingaben reagiert werden. Sofern Stellhebel zur parametrischen Modifikation an neue Anforderungen nicht implementiert sind, besteht während der Projektlaufzeit die Notwendigkeit, das Modell neu aufzubauen, beziehungsweise nachträglich zu adaptieren. Die Umsetzung der notwendigen Steuerungsmöglichkeiten im Modell basiert auf System- und Bauteilanforderungen und stellt einen fundamentalen Bestandteil von wissensbasierten Modellen dar.

Auf Basis von allgemein definierten wissensbasierten Vorlagen sind individuelle Erweiterungen nach projektspezifischen Anforderungen ein Erfolgsmerkmal in der Anwendung. Eine generische Erweiterbarkeit der festgelegten Logik und Struktur eines wissensbasierten Modelles ist vorzusehen, um Weiterentwicklungen durchgängig in einem wissensbasierten Katalog zu integrieren. Durch eine definierte Logik der Modellierung wird die durchgängige Umsetzung für mehrere Bearbeiter vereinfacht. Zusätzliche Anforderungen in der Umsetzung wissensbasierter Modelle ist die Notwendigkeit zur individuellen Anpassung an verschiedene Fragestellungen, sowie eine etwaige Fehlerbehebung. Die Umsetzung erfordert in der Praxis zumeist alternative geometrische Modellierungsfunktionen. Sofern geometrische Modulen zu abgeschlossenen wissensbasierten Objekten und Anwendungen [41] aggregiert werden, sind entsprechende Fehlerbehandlung und Möglichkeiten der Anpassung zu implementieren. Dies sind beispielsweise Fehlerbehebungsroutinen, oder Konfigurationseinstellungen. Sofern der Entwickler keine Möglichkeit hat Module und Modelle zu adaptieren und Fehler zu korrigieren, reduziert sich das Potential funktional verbesserte Lösungen entwickeln zu können.

Die Anwendung von wissensbasierten Konzeptmodellen adressiert eine Reduktion des Aufwandes zur Darstellung von Lösungen bei gleichzeitig verbesserter Aussagefähigkeit. Dies kann insbesondere für grundsätzlich bekannte Fragestellungen deutliche Verbesserungen im Vergleich zu einer Neugestaltung von Produktmodellen führen. Die Verwendung von wissensbasierten Modellen unterliegt jedoch spezifischen Einschränkungen zur Adaption, welche durch die implementierte Modellstruktur bedingt ist. Bei deutlich abweichenden Fragestellungen ist die Fähigkeit zur individuellen Anpassung und Erweiterung des wissensbasierten Modelles ein wichtiges Kriterium.

Um die geometrische Flexibilität für unterschiedliche Fragestellungen mit einer vereinfachten Bauteilsteuerung zu verbinden, wird in der Arbeit der Ansatz der Abstraktion angewendet. Das Ziel dieses Ansatzes ist eine Vereinfachung des geometrischen Modells auf funktional relevante Formen und ein Verzicht auf untergeordnete Details. Eine hohe Detaillierung der Modelle reduziert die Möglichkeit zur Adaption von komplexen Systemen. Die wählbare Granularität von Konzeptmodellen hängt mit funktional belastbaren Modellen zusammen. Um eine belastbare, abgesicherte funktionale Aussage treffen zu können, ist eine mit detaillierten Modellen affine vereinfachte Abbildung der Bauteile umzusetzen. Ein Beitrag in wissensbasierten Modellen besteht daher in der Definition der zulässigen Vereinfachung des geometrischen Modelles. Zur Verifikation des wissensbasierten Modelles sind Auslegungsergebnisse mit Ergebnissen aus der Funktionsabsicherung in der Serienentwicklung und gegebenenfalls von Erprobungen gegenüberzustellen.

Die Anwendung von wissensbasierten Modellen eröffnet unterschiedliche Szenarien, wobei die schnelle Produktmodellierung mit gesteigertem Reifegrad hervorzuheben ist. Die gewonnene Entwicklungszeit kann gegebenenfalls in den Aufbau von unterschiedlichen Varianten oder eine nachfolgende Detaillierung des Modelles investiert werden. Durch den Aufbau verschiedener Varianten wird der dargestellte Lösungsraum erweitert, um gegebene Anforderungen zielgenauer zu erfüllen. Parallel dazu können funktionale Absicherungen durchgeführt und Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt werden. Aufgrund des reduzierten Bearbeitungsaufwands ergibt sich auch wirtschaftlich gesehen die Möglichkeit, das wissensbasierte Modell bereits in einer früheren Entwicklungsphase einzusetzen und eine frühzeitigere Absicherung von Projektergebnissen zu verfolgen. Darüber hinaus ermöglichen diese Modelle aufgrund erhöhter Änderungsfähigkeit agile Optimierungsschleifen und können zu verbesserten Produkteigenschaften führen. Durch den Einsatz von wissensbasierten Modellen können sekundäre Effekte erzielt werden. Dies bedeutet, dass Auslegungsschritte, welche auf die technische Aussage des wissensbasierten Modelles angewiesen sind, ebenfalls zu einem früheren Entwicklungszeitpunkt gestartet werden können.

### Anwendungsbeispiel einer wissensbasierten Vorderwagenstruktur für den Fußgängerschutz

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird der Ansatz der wissensbasierten Konzeptauslegung anhand von drei Gesichtspunkten behandelt. Die funktionalen Anforderungen an die Konzeptauslegung werden mit prozeduralen Randbedingungen und der methodischen Realisierung anhand eines wissensbasierten Modelles kombiniert.

Die Entwicklung der Struktureigenschaften eines Fahrzeugvorderwagens ist durch zielkonfliktbehaftete Anforderungen auf Grund des Fußgängerschutzes und die erforderliche Struktursteifigkeit geprägt. Eine zusätzliche Herausforderung stellt die starke Abhängigkeit der Lösungsfindung vom Fahrzeugstyling dar, da die äußere Fahrzeugform die Kontaktfläche im Falle einer Kollision mit einem Fußgänger darstellt. Die Bewertung von stylingrelevanten Flächen stellt hohe Ansprüche an die Durchlaufzeit zur funktionalen Evaluierung, um bereits in der Stylingfindungsphase Änderungsmaßnahmen einbringen zu können. Um geforderte Entwicklungsziele im Fußgängerschutz zu erreichen, sind Stylingkonturen und Fugenverläufe, das Motorraumpackage, Position der Frontleuchten sowie der Einsatz aktiver Systeme zu bewerten.

Zur Absicherung des Fußgängerschutzes sind die Bauteile der Frontklappe, Scheinwerfer und Stoßfänger bezüglich der Verzögerung von Passanten bei Kollisionen mit dem Fahrzeug auszulegen. Konkrete Entwicklungsziele sind durch gesetzliche Vorgaben und Prüfungen durch Konsumentenschutzvereine (z.B. NCAP [67]) definiert und betreffen die Biomechanik von Unter- und Oberschenkel, Hüfte und Kopfaufprall. Besonders der Verbund von Frontklappenaußen- und innenblech und der umgebenden Bauteile ist als deformierbares System zu gestalten, um Verletzungen bei einem Aufprall zu reduzieren. Technische Randbedingungen der konzeptionellen Untersuchung des Fahrzeuges sind Stylingflächen, Strukturtopologie, sowie Material- und Bauraumkonzept. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird im Besonderen auf die Auslegung des Frontklappensystemes eingegangen. Der zu prüfende Lastfall hierzu ist der Kopfaufprall. Zur Beurteilung von Kopfverletzungen existiert ein dimensionsloses Kriterium HIC [189], welches die Beschleunigung und die Einwirkdauer in Relation setzt:

$$HIC = \left[ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right] \quad (3.1)$$

Die Auswertung des HIC-Kriteriums wird für verschiedene gewählte Positionen des Kopfaufpralles durchgeführt. Zur vollständigen Zielerfüllung darf der HIC-Wert definierten Höchstwerte nicht überschreiten, beispielsweise den  $HIC_{15}$  von 650 im EuroNCAP [162, S. 2].

Gegenläufig zur gewünschten Fähigkeit der Deformation sind hohe Steifigkeitswerte der Motorhaube zur Formbeständigkeit, zum Diebstahlschutz und zur Sicherstellung eines zufriedenstellenden Vibrationsverhaltens gefordert. Eine hohe Steifigkeit von Anbau- und Strukturteilen erhöht die negative Beschleunigung und das Verletzungsrisiko, dazu zählen Haubenaußen- und Haubeninnenblech, Frontleuchten, Scharnieranbindung, Schlossanbindung, Überlappungsflansch von Kotflügel und Motorhaube, Scheibenquerträger, Schlossträger, Wasserkasten und Aggregate im Motorraum, sowie die Frontscheibe, A-Säule und das Wischersystem.

Um den Stylingfindungsprozess in einer frühen Entwicklungsphase zu unterstützen, kann anhand von Erfahrungswissen und durch simulationsbasierte Werkzeuge eine Vorauslegung umgesetzt werden. Auf Basis von Erfahrungswissen und vereinfachten Berechnungen kann der erforderliche Bauraum für die Deformation abgeleitet und in den Entwicklungsprozess eingebracht werden. Anhand von konzeptionellen Strukturmodellen und simulationsbasierter Bewertungen kann die Lösungsfindung der Strukturbauteile und die Überprüfung der Funktionserfüllung unterstützt werden.



Abbildung 3.17: Simulationsmodell zur Analyse der Beschleunigung beim Kopfaufprall auf eine Frontklappe in Y0-Ansicht (Quelle: MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG)

Eine Herausforderung in der frühen Konzeptphase besteht in der Unvollständigkeit von Daten bezüglich der Fugenverläufe, Motorisierungsvarianten, Form der Strukturbauteile sowie der gewichtsabhängigen Messlastebene des Fahrzeuges. Die geometrische Darstellung und die Topologie von Komponenten in virtuellen Modellen bilden jedoch die Basis für eine simulationsbasierte Bewertung. Zur Gestaltung der notwendigen Strukturmodelle sind die Fachbereiche der Karosserieentwicklung, der Klappenentwicklung und der geometrischen Integration in der Fahrzeugarchitektur, sowie des Massenmanagements erforderlich. Die Realisierung schneller Absicherungsschleifen in der frühen Entwicklungsphase erfordert eine intensive Abstimmung der Entwicklungsbereiche. Um die Arbeitsschritte integral zu betrachten, wurde im Anwendungsbeispiel ein zentrales Modell aufgebaut, welches den Auslegungsprozess nach wissensbasierten Kriterien unterstützt. Der Ansatz zielt auf schnelle Bewertungen unterschiedlicher Strukturkonzepte ab, welche vereinfacht an die aktuelle Fragestellung angepasst werden können, und eine direkte Verknüpfung zu Projektdaten der Fahrzeugarchitektur, des Styling und der Strukturentwicklung besitzen.

Die funktionalen Anforderungen an PKW-Vorderwagenstrukturen können sich je nach Fahrzeug unterscheiden, ebenso wie die Lösungsansätze, welche eine Erfüllung der Anforderungen ermöglichen. Des weiteren ist die stete Adaption der Vorderwagenstruktur auf neue Fahrzeugstylings und Varianten mit Fortschritt des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen. Diese Rahmenbedingungen sind in der Konzeption des wissensbasierten Modells zu beachten. Steuergrößen für das wissensbasierte Modell sind die Aufprallpunkte, die Standhöhe, Stylingform, Fugenverläufe, Strukturbauteile und die Position von Komponenten im Motorraum. Darunter fallen die Lage des Klappenschließsystems, der Scharnierpositionen, des Federbeindoms, der Scheibenquerträger, der Wischeraufnahme und der Aggregate. Zur Modellsteuerung wird auf die Grundsätze der parametrisch assoziativen Konstruktion, siehe Kapitel 3.1.1, zurückgegriffen. Die Positionen der Kopfaufprallpunkte zählen zu den relevanten Eingabegrößen welche durch das Fahrzeugstyling und die Standhöhe des Fahrzeuges beeinflusst werden. Eine Übernahme einer Klappentopologie von bestehenden Fahrzeugen ist daher nur eingeschränkt möglich. Eine steuerbare Adaption in Bezug auf Topologie, Form und Größe in Abhängigkeit von der Lage und der Aufprallpunkte ist somit im Konzeptmodell erforderlich.

Positionen des Kopfaufpralls sind Eingangsparameter zur Gestaltung der Strukturmodelle und werden zu Entwicklungsbeginn festgelegt. Zur Determination der Positionen wird in den Prüfnormen angenommen, dass der Passant im Kollisionsfall entlang der Fahrzeugkontur abrollt und der Kopf entsprechend der Körpergröße am Fahrzeug auftrifft. Dynamische Effekte, wie Bremsnicken des Fahrzeuges oder Translation des Passanten während der Kollision, werden in die Festlegung der Prüffelder nicht explizit miteinbezogen. Im Rahmen der Prüffeldauslegung werden unterschiedliche Personengrößen von Kindern und Erwachsenen erfasst.

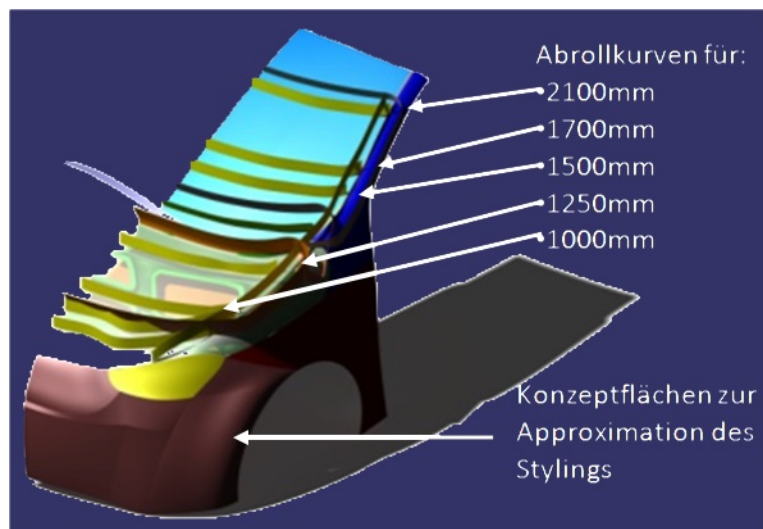


Abbildung 3.18: Grenzkurven abgeleitet von der Abrollung der Körpergröße von Fußgängern an den Fahrzeugaußenflächen

Zur Erarbeitung der Prüffelder kann eine manuelle Konstruktion der Abrollkurven angewendet werden. Dies bedeutet eine Approximation der Stylingflächen durch eine tangentialstetige Kurve für verschiedene Fahrzeugschnitte in Y-Ebenen. Alternativ können kommerzielle Werkzeuge (z.B. CAVA [179]) auf Basis länderspezifischer Anforderungen unterstützen. Zur Festlegung der Prüffelder sind punktstetige Eingabeflächen erforderlich. Abbildung 3.19 zeigt gewählte Aufprallpositionen auf einer Frontklappe, an welchen die gewünschten Entwicklungsziele des Fußgängerschutzes überprüft werden.

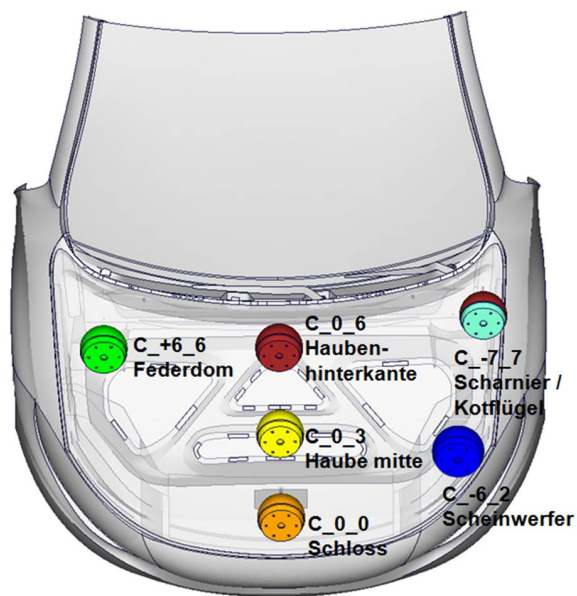


Abbildung 3.19: Definition von Kopfaufprallpunkten auf einer Frontklappe zur Bewertung des Fußgängerschutzes

Numerische Optimierungsmethoden, siehe Abbildung 3.20, ermöglichen die Generierung topographischer Vorschläge zur Steifigkeitsverteilung der Frontklappe. Der zuvor beschriebene Zielkonflikt von geringen lokalen und hohen globalen Steifigkeiten dient als Kriterium der Optimierung. Anmerkung: Diese Methode wurde nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzt, sondern als bestehende Methode des Industriepartners in den Entwicklungsprozess integriert. Eine effiziente Adaption des Konzeptmodelles auf die Vorgabe der topographischen Optimierung wird im vorliegenden Beispiel durch Steuerung der Strukturpfade des Skelettmodelles (siehe Abbildung 3.21) umgesetzt. Das darauf aufgebaute dreidimensionale Strukturmodell kann die vorgeschlagene Steifigkeitsverteilung der numerischen Optimierung anhand simulationsbasierter Methoden hinsichtlich der Entwicklungsziele bewerten.

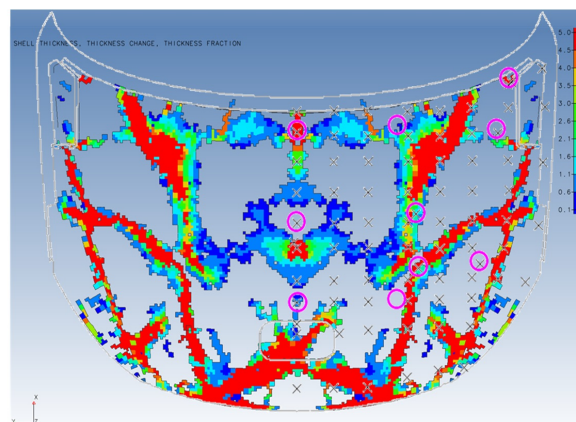


Abbildung 3.20: Vorgeschlagene Steifigkeitsverteilung nach einer numerischen Optimierung mit gegenläufigen Anforderungen zu lokaler und globaler Steifigkeit der Frontklappe (Quelle: MAGNA STEYR Engineering AG & Co KG)

Zur globalen Steuerung des Modelles und Referenzierung wird analog zur konzeptionellen Strukturentwicklung ein Skelettmodell angewendet. Anhand des Skelettes lassen sich die Konturen des Styling approximieren, mit jeder Stylingvariante adaptieren und die Steuerung der Topologie bewerkstelligen. Auf Basis des Skelettmodelles können neue Lastpfade hinzugefügt und angepasst werden. Durch Vorgaben von numerischen Optimierungsmethoden (siehe Abbildung 3.20) als auch bei Fortschritt des Entwicklungsprozesses kann das Skelett mit geringem Zeitaufwand modifiziert werden, um auf Änderungen reagieren zu können. Die Topologie kann hierbei so gewählt werden, sodass die einzelnen Strukturlastpfade um die Kopfaufprallpunkte herumgeführt werden.

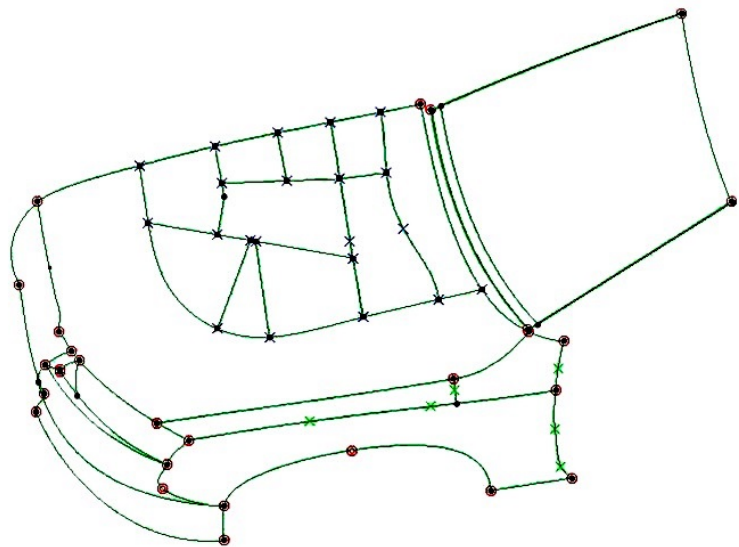


Abbildung 3.21: Stylingorientiertes Referenzskelett des parametrischen Vorderwagenstrukturmodelles

Die Topologie kann hierbei so gewählt werden, sodass die einzelnen Strukturlastpfade um die Kopfaufprallpunkte herumgeführt werden. Analog zum konzeptionellen Rohbau werden Prinzipschnitte am Skelettmodell erzeugt, welche als Basisgeometrie für die Bauteilflächen dienen und die Assoziativität der einzelnen Bauteile gewährleisten. Anhand der Profilschnitte werden geometrische Ausprägungen der Strukturbauteile und Anlageflächen interaktiv gesteuert und Adaptionen im 3D vorgenommen, siehe Abbildung 3.22. Im Besonderen ist die Dimensionierung der Profilquerschnitte des Haubeninnenblechs ein wesentlicher Einflussfaktor zur Steuerung der Struktursteifigkeit und der Deformationseigenschaften des Gesamtsystems.

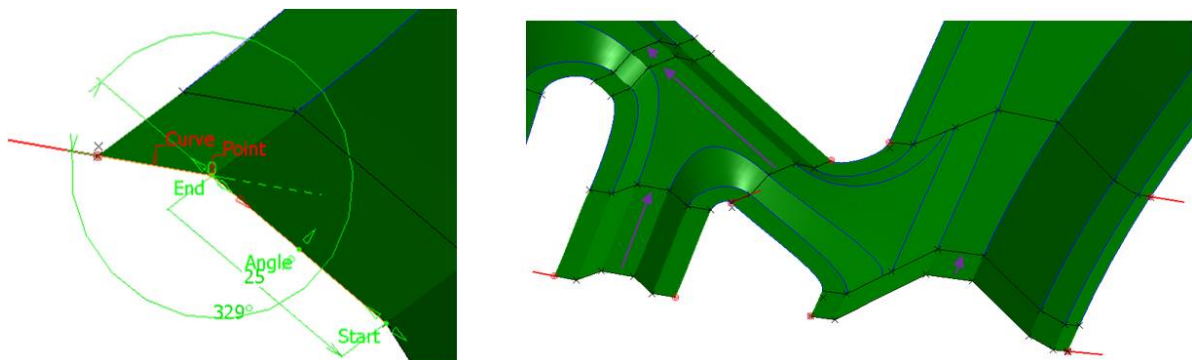


Abbildung 3.22: Adaption der Strukturkomponenten im 3D und Ausprägung des Innenblechs durch Änderung von Winkel und Länge eines Profilsegmentes

Auf Basis des Skelettmodelles und der approximierten Stylingflächen können unterschiedliche Strukturkonzepte und Bauteile aufgebaut werden. Der Freiraum in der Modellierung verschiedener Konzepte wird durch die Verwendung der wissensbasierten Vorlage nicht eingeschränkt. Abbildung 3.23 visualisiert unterschiedliche Ausprägungen eines Frontklappeninnenblechs aus der erarbeiteten wissensbasierten Vorlage. Anhand des Skelettmodelles kann eine zentrale Steuerung von unterschiedlichen Konzepten gesamtendlich umgesetzt werden. Auf Änderungen von Eingabeinformationen kann anhand einer Adaption des Skelettes reagiert werden. Sofern das Skelett zentral für mehrere Varianten verwendet wurde, wirkt sich diese Adaption konsistent auf die einzelnen Varianten aus.



Abbildung 3.23: Varianten eines Frontklappeninnenblechs, welche aus der wissensbasierten Vorlage abgeleitet wurden

Neben dem Frontklappenmodell werden weitere relevante Bauteile, wie Querträger unter der Windschutzscheibe, Wasserfangabdeckleiste, Federbeindom, oberer Längsträger und Knoten an der A-Säule im Konzeptmodell aufgebaut, siehe Abbildung 3.24. Diese Komponenten werden ebenso assoziativ zum Skelettmodell aufgebaut, wobei Knotenpunkte des Skelettes zumeist als Referenz verwendet werden. Bauraumkomponenten des Motorraums werden vereinfacht als Deckflächen dargestellt und im nachgelagerten CAE-Modell als starre Körper ('ridgid') modelliert. Dies reduziert den CAE-Modellaufbereitungsaufwand von komplexen Geometrien wie Motor oder Ansaugsystem. Für Anbauteile können einfache Ersatzgeometrien an den Anbindungsstellen zum Einsatz kommen, welche im CAE-Modell über das erreichbare Lastniveau gesteuert werden und ein Versagen abbilden können.

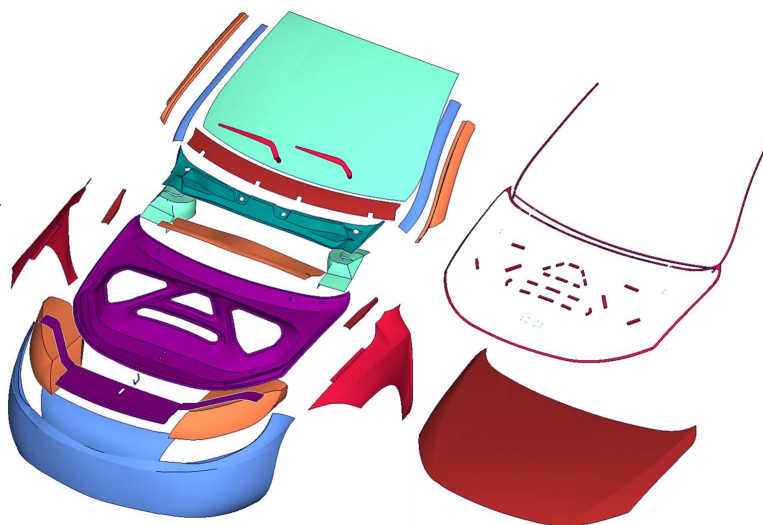


Abbildung 3.24: Visualisierung der parametrisch assoziativen Strukturbauteilflächen und der Verbindungstechnik



Durch die Integration aller relevanten Komponenten in ein Modell reduziert sich der Aufwand zur Abstimmung unterschiedlicher Konstruktionsbereiche und zur Sammlung der Konstruktionsdaten. Das Konzept des parametrischen Vorderwagens stellt Eigenschaften eines gesamten Systems dar, um Bewertungen auf Gesamtfahrzeugebene zu beurteilen. Durch einfache Möglichkeiten zur Adaption kann das Konzeptmodell im Sinne des funktionsgetriebenen Produktdesigns adaptiert werden und Verbesserungsmaßnahmen können in den Entwicklungsprozess integriert werden. Durch die zentrale Bearbeitung des Gesamtsystems werden zusätzlich organisatorische Abläufe zur Modelladaption und Funktionsgruppenabstimmung vereinfacht. Anhand des zentralen Steuerskeletts können die Approximation des Stylings, sowie die Steuerung der Topologie der Frontklappe und weiterer Strukturbauteile und Positionierung von weiteren Bauraumkomponenten vorgenommen werden. Das parametrische Modell zeichnet sich durch eine hohe Stabilität aus. Die daraus resultierende Flexibilität und mögliche Variation eines wissensbasierten Bibliotheksmodells wird dadurch positiv beeinflusst, demonstriert anhand von Abbildung 3.25.

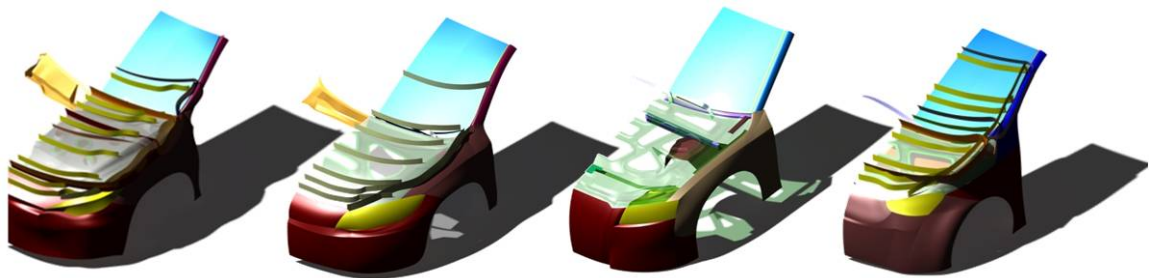


Abbildung 3.25: Varianten von Vorderwagenstrukturen, welche aus der wissensbasierten Vorlage abgeleitet wurden

Ein wesentlicher Bestandteil des vorliegenden wissensbasierten Modelles stellt die funktionale Aussage und die Belastbarkeit der Konzeptbauteile dar. Technische Fragestellungen betreffen die Deformationsfähigkeit der Frontklappe und der Anbauteile im Vorderwagen auf Basis der Bauteilsteifigkeit. Um repräsentative Aussagen bereits in einer frühen Entwicklungsphase zu generieren, ist die Vergleichbarkeit der Konzeptmethode mit den generierten Modellen in der Serienentwicklung erforderlich. Da für das Konzeptmodell eine vereinfachte geometrische Methode gewählt wurde, kann der Vergleich von Serien- und Konzeptmodell anhand derselben Simulationswerkzeuge durchgeführt werden. Auch der Formfindungsprozess der Bauteile wird durch den geometrischen Ansatz unterstützt. Die zu klärende Fragestellung betrifft eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit und relevante Charakteristik der Konzeptflächen in Bezug auf das mechanische Deformationsverhalten und der daraus entstehenden Verzögerung des Kopfes.

Zum Vergleich der Konzeptgeometrie mit der Seriengeometrie wurde auf gleiche Stylingvorgaben zurückgegriffen und es wurden dieselben Kopfaufprallpositionen verglichen. Die räumliche Ausprägung des Konzeptmodelles entspricht weitgehend dem Detailmodell. Aufgrund des Fokus auf die Konzeptentwicklung wurden Maßnahmen, welche als Detailoptimierungen einzustufen sind, explizit nicht im Modell dargestellt. Um eine signifikante Reduktion der erforderlichen geometrischen Objekte zu erreichen, sind im Konzeptmodell keine Detailoperation wie Radien, tangentialstetige Übergänge oder kleine Ausnehmungen modelliert. Die um eine Zehnerpotenz reduzierte Anzahl von geometrischen Objekten trägt wesentlich zur erforderlichen Flexibilität des Modelles bei. Abbildung 3.26 zeigt eine Gegenüberstellung von Konzept- und Serienmodell.



Abbildung 3.26: Vergleich eines detaillierten Strukturmodelles links (rund 800 Flächenoperationen) und vereinfachten Konzeptmodell rechts (95 Flächenoperationen)

Die Prüfung ob die geometrische Vereinfachungen des Konzeptmodelles zulässig ist, wird anhand der nichtlinearen Deformation und Energieaufnahme der Frontklappe und der Anbauteile vorgenommen. Zur Bewertung der Prediktion der aufgebauten Konzeptflächen wurden diese den finalen Resultaten aus der Serienentwicklung gegenübergestellt und analysiert. Es wurde Wert auf den Einsatz von gleichen Methoden von Serien- und Konzeptentwicklung gelegt, um an die Validierung bestehender virtueller Methoden anhand physikalischer Testergebnisse anzuknüpfen. Aus Prozesssicht erfolgt eine Konstruktion in einem nativen CAD-System unter Verwendung von Modellierungsmethoden, welche auf Anforderungen in der Konzeptentwicklung abgestimmt sind. Die funktionale Bewertung erfolgt hingegen anhand validierter Simulationsmethoden der Serienentwicklung. Die geometrischen Daten werden als Produktmodell übergeben, wobei die jeweiligen Metadaten der einzelnen Komponenten hinterlegt sind. Die Verbindungsdaten werden ergänzend anhand einer zusätzlichen Datei übergeben. Nach der Übergabe an Finite-Elemente Pre-Processoren wurden verschiedene Positionen des Kopfaufschlages, siehe Abbildung 3.19, berechnet und nachfolgend mit den Ergebnissen aus der detaillierten Serienentwicklung verglichen.

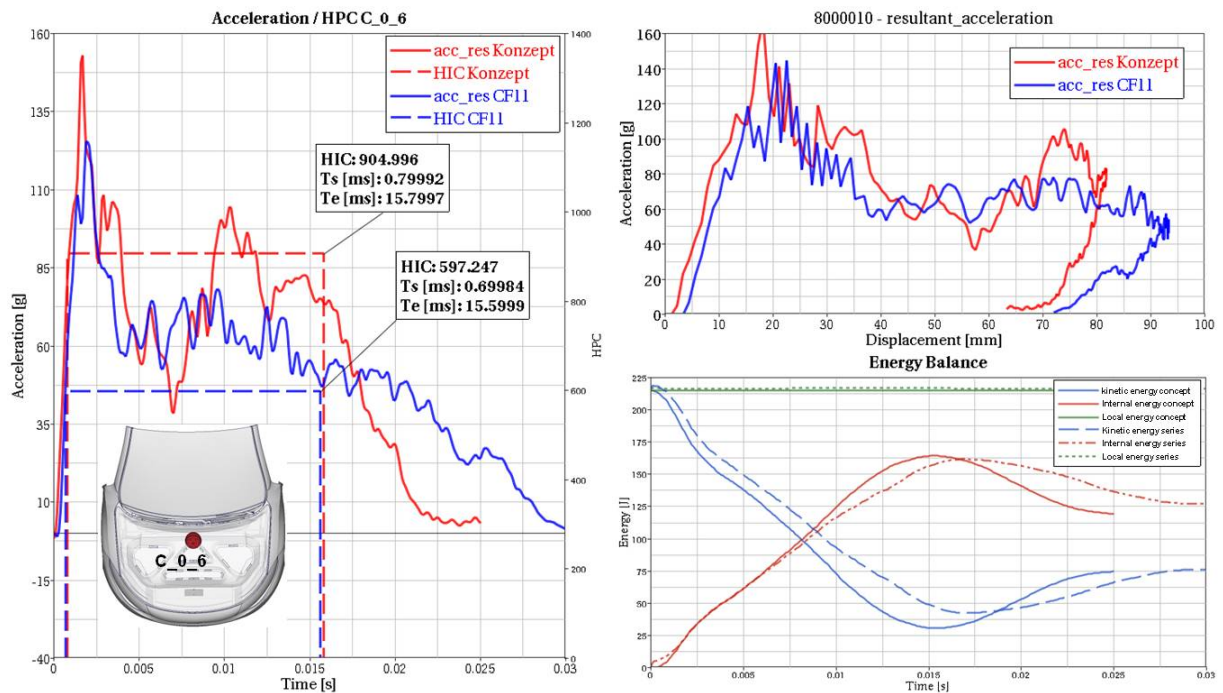


Abbildung 3.27: Simulationsergebnisse des vereinfachten Konzeptmodells (rot, bzw. erhöhte Beschleunigungswert) und des detaillierten Modells (blau) bezüglich der Kopfbeschleunigung und des HIC-Wertes (links), der Intrusion des Kopfimpaktors (rechts oben) und der Energieaufnahme (rechts unten)[127]

Der Vergleich der Simulationsmodelle von Seriengeometrie und Konzeptmodell, siehe Abbildung 3.27, zeigt eine ähnliche Charakteristik bezüglich Beschleunigung, Deformation der Frontklappe und der Umwandlung der kinetischen Energie in plastische Verformung. Die absoluten Beschleunigungs- und Deformationswerte sind plausibel zu bewerten und können als erste Indikation belastbar angewendet werden. Eine Abweichung besteht in der erhöhten Steifigkeit des Konzeptmodells gegenüber der Seriengeometrie. Dieser Unterschied ist aufgrund fehlender Optimierungsmaßnahmen, welche an der detaillierten Seriengeometrie vorgenommen wurden, erklärbar. Hierzu zählen die gezielte Schwächung der Klappe anhand von Ausnehmungen und Löchern und die fehlende Optimierung des Kleberspaltes zwischen Klappenaußen- und Innenblech. Die Position und Kleberspaltstärke der Kontaktstellen zwischen Außen- und Innenblech beeinflussen die Systemsteifigkeit und die Deformation wesentlich. Bezüglich des Konzeptmodells ist diese Differenz als nicht kritisch einzuschätzen, da es sich hierbei um laufende Verbesserungsmaßnahmen und ein Potential während des Entwicklungsprozesses handelt. Erhöhte Abweichungen wurden bei Kopfaufschlagpositionen in Kombination mit Aggregaten festgestellt. Dies betrifft die Komponenten im Motorraum, die Frontleuchten und das Scheibenwischersystem. Die Unterschiede kamen aufgrund einer fixen Einspannung der Aggregate im Simulationsmodell zustande und führten zu einer Überhöhung der Beschleunigung.

Diese Abweichung wurde kritisch bewertet, da in der Entwicklung in diesem Fall eine Veränderung der Komponentenposition gefordert werden müsste. Das Konzeptmodell wurde daher überarbeitet und um deformierbare Bauteile zur Anbindung Komponenten an den Rohbau ergänzt. Die Bauteilsteifigkeit dieser Anbindungselemente ist in der FE-Simulation gezielt einstellbar, wodurch ein reales Bauteilversagen der Anbindung implementiert werden konnte. Die Aussagequalität des überarbeitete Konzeptmodelles konnte durch eine nachfolgende Entwicklungsschleife bestätigt werden und zeigte eine analoge Charakteristik zu Abbildung 3.27. Die Resultate des detaillierten Simulationsmodelles entsprechen dem realen Verhalten, validiert durch physische Tests. Das zu prüfende HIC-Kriterium liegt analog zur Beschleunigung tendenziell über den Serienresultaten, wobei die Abweichung aufgrund der zuvor dargestellten Unterschiede in den Modellen plausibel ist. Das Konzeptmodell ermöglicht grundsätzliche Aussagen zur technischen Machbarkeit der geforderten Zielwerte und unterstützt die Ableitung von erforderlichen Maßnahmen.

Auf Basis der technischen Plausibilität des Konzeptmodelles wurde ein Prozess für die Bewertung und Entwicklung des Fußgängerschutzes umgesetzt, siehe Abbildung 3.28. Beginnend mit der Eingabe eines Stylings werden die Aufprallpositionen des Kopfaufpralles festgelegt (1). Diese Information dient als Grundlage für numerische Optimierungsmethoden (2), welche topografische Vorgaben zur Steifigkeitsverteilung vorschlagen. Die Verteilung wird in ein geometrisches Konzeptmodell übergeführt (3), welches anhand Finite-Elemente Simulation auf funktionale Eigenschaften geprüft wird (4). Verbesserungsmaßnahmen können nach Vorliegen der Simulationsergebnisse in das Styling und zentrale CAD-Konzeptmodell rückgeführt (5).

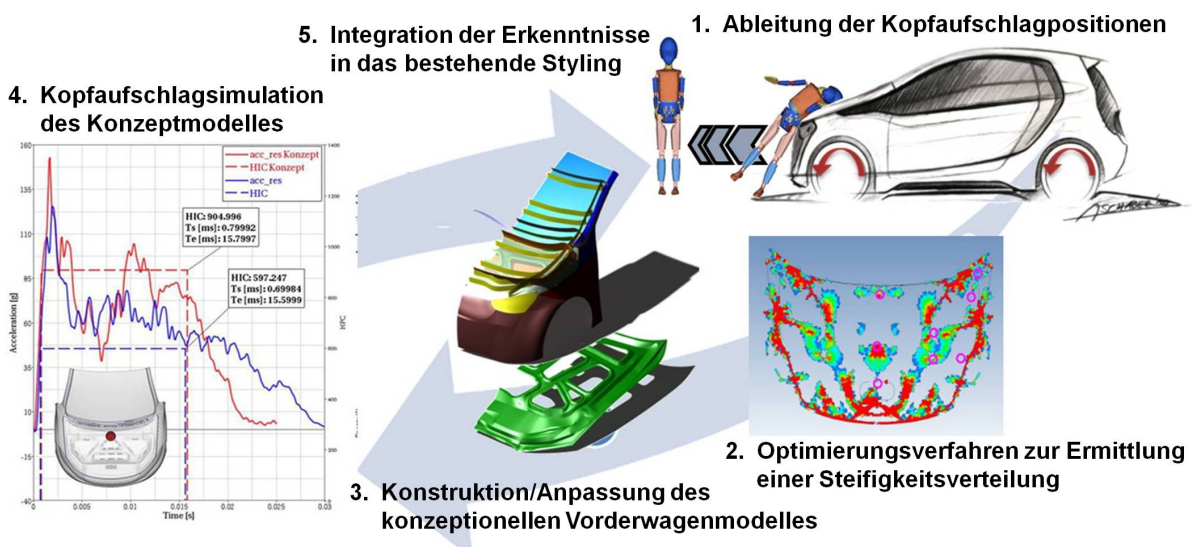


Abbildung 3.28: Durchgängige Schleife zur Entwicklung des Fußgängerschutzes

### **Zusammenfassung und Vergleich mit bestehenden Methoden**

Das vorgestellte Anwendungsbeispiel demonstriert Möglichkeiten zur Parametrierung von Modellen nach wissensbasierten Aspekten. Funktionale Aspekte zur Bauteil- Systemauslegung wurden hierbei mit prozessbedingten Randbedingungen und verfügbaren Modellierungsmethoden in einem Modell gesamtheitlich betrachtet. Eine zentrale Eigenschaft des Strukturmodelles ist die Berücksichtigung der zulässigen geometrischen Vereinfachung zur funktionalen Darstellung des Frontklappensystems. Anhand des Vergleiches von detaillierten CAD-Klappenmodellen und des Konzeptmodelles wurde die Belastbarkeit der vereinfachten Modelle bestätigt. Auf Basis dieser überprüften funktionalen Vergleichbarkeit von vereinfachten und detaillierten Modellen kann ein frühzeitiger Einsatz von vereinfachten Produktmodellen im Entwicklungsprozess erfolgen.

Das Vorderwagenmodell wurde analog zum parametrischen Rohbau konzipiert und stellt eine Erweiterung dieses Systementwicklungsansatzes dar. Die Modelle können im virtuellen Produktmodell assoziativ miteinander verknüpft werden. Das parametrische Modell kann als wissensbasierte Vorlage ('Template') [98, S. 320] wiederverwendet und generisch erweitert werden. Das Modell kann durchgängig von der Konzeptphase in die Serienphase übergeführt werden und ist durch native CAD-Funktionen zu bearbeiten. Durch die erhöhte Flexibilität des Konzeptmodelles kann auf unterschiedliche Stylingvorgaben reagiert, können verschiedene Varianten evaluiert und Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet werden. Der Arbeitsaufwand zur Bewertung eines neuen Fahrzeugstylings reduziert sich durch die Verwendung von wissensbasierten Vorlagen deutlich. Durch eine nicht assoziative Verknüpfung von Styling und wissensbasiertem Konzeptmodell ist jedes abgeleitete Konzeptmodell als weitere Variante von wissensbasierten Vorlagen einsetzbar. Voraussetzung hierzu ist eine konsistente Weiterführung der angewendeten Modellierungs- und Referenzierungsmethode.

Anhand des integralen Zusammenspiels von numerischer Simulation und darauf ausgerichteten wissensbasierten CAD-Konzeptmodellen ist es vereinfacht möglich, verschiedene Stylingvarianten in einer frühen Entwicklungsphase zu bewerten, sowie schnelle Entwicklungsschleifen zwischen Simulation und Bauteilkonstruktion umzusetzen. Durch eine Umsetzung anhand nativer CAD-Methoden ist eine direkte Integration in bestehende Berechnungsabläufe möglich. Im Vergleich zur 'In the Loop'-Geometrieoptimierung [101, S. 137] wird der Prozess der funktional abgeleiteten Geometriemodifikation übersprungen und auf Basis einer numerisch kalkulierten Steifigkeitsverteilung die Motorhaube modelliert. Vorteile ergeben sich aus der Unabhängigkeit der Optimierungsergebnisse von einer initialen Modelltopologie und den eingestellten geometrischen Parametern und Randbedingungen in einer Optimierung.

Aus Funktionssicht können mit relativ geringem Aufwand Fahrzeugkonzepte bewertet und in der Styling-Technik-Konvergenz Maßnahmen zum Fußgängerschutz auf Basis simulationsbasierter Methoden eingebracht werden. Eine analoge Vorgehensweise im Prozess ist mit Methoden von 'Upfront-CAE' Programmen wie SFE-Concept [101, S. 147], als auch Modellierungsprogrammen wie dem 'Fast Concept Modeler' durchführbar. Die Möglichkeiten zur Modellierung und Parametrisierung fallen in diesen Werkzeugen jedoch geringer aus. Die integrale Verknüpfung von Konstruktionsmodell und Styling sowie ein Ersatz von Stylingflächen und eine Ermittlung der Abrollkurven der Aufprallpositionen sind in der nativen Umgebung auf effiziente Weise handhabbar. Im Vergleich zu nicht CAD-basierten Methoden [169] ist anhand des Konzeptmodelles eine detaillierte Untersuchung anhand von Entwicklungsmethoden der Serienabsicherung möglich. Es werden hierbei sowohl die Bauteiltopologie, als auch die Verbindungstechnik und die Bauraumkomponenten für jedes Fahrzeug auf individueller Basis mit entsprechender Detaillierung dargestellt. Dies ermöglicht eine Analyse der Rechenergebnisse durch konventionelle AuswerteprozEDUREN und die Visualisierung im numerischen Modell. Die Auswertung bildet die Basis für Verbesserungsvorschläge in Bezug auf Bauraumausnutzung, Topologie der Außenblechstruktur, Lage der Fugen und Anbindung der Haube (Scharnier, Schlossbereich). Ergänzend können Mehrkörpersimulationsmodelle für aktive Sicherheitssysteme, beispielsweise aktive Klappensysteme, in den Berechnungsablauf integriert werden.

Im Prozess ergibt sich die Verbesserung im Vergleich zu konventionellen Konstruktionsprozessen durch die frühzeitige Einbindung simulationsbasierter Werkzeuge anhand von bibliotheksbasierten Modellen ab Vorliegen des Maßkonzeptes. Dies bedeutet, dass Stylingflächen bei einer ersten Abschätzung für eine Beurteilung eines Maßkonzeptes und von Bauraumverhältnissen nicht zwingen erforderlich, jedoch sehr hilfreich sind. Das Modell kann in diesem Fall generisch an festgelegte Fahrzeugmaße angepasst werden. Bei Vorliegen eines Stylings kann das Modell adaptiert und Bauraumkomponenten für eine Berechnung vereinfacht aufbereitet werden. Ab frühester Phase kann so proaktiv auf das Fahrzeugstyling eingewirkt und ein erhöhter Reifegrad erreicht werden. Der Mehrwert der vorgestellten Methode besteht in der systematischen Untersuchung einer funktional aussagekräftigen und belastbaren 3D-Konzeptgeometrie, sowie in der zielgerechten Gestaltung des nativen Konzeptmodelles hinsichtlich eingesetzter Simulationsmethoden und verfügbarer Resultate aus numerischen Optimierungsroutinen.

## 3.2 Automatisiertes CAD - Programmgestützte Methoden

Die Funktionalität von CAD-Systemen kann, neben der manuellen Anwendung, über Automationschnittstellen genutzt und abgerufen werden [202]. Die Automatisierung von Konstruktionsfunktionen bietet sich für die Bearbeitung von definierten und wiederkehrenden Arbeitsschritten an [97, S. 8]. Durch Methoden der Automation wird versucht, den Aufwand für manuelle Tätigkeiten in der Konstruktion zu reduzieren. Gewünschte Effekte bestehen in der Verlagerung der Arbeitstätigkeit, hin zu technisch anspruchsvollen Inhalten und einer Reduktion von manuellen Fehlern für definierte Prozeduren. Die Hinterlegung von Wissen kann anhand von Verknüpfung von Auslegungsschritten zu Sequenzen, sowie eine Implementierung von Abhängigkeiten und Kriterien erreicht werden.

In der vorliegenden Arbeit wird vorgeschlagen, programmgestützte Methoden in verschiedenen Funktionsniveaus zu klassifizieren, siehe Tabelle 3.2. Die automatisierte Analyse, Sammlung und Weitergabe von Information und Eigenschaften von Produktmodellen bilden grundsätzliche Funktionen von Automationsmethoden, dargestellt durch deskriptiv skriptbasierte Methoden. Die Erstellung von Objekten, sowie die Definition von Assoziativitäten und Relationen erweitert das Spektrum im Rahmen ablaufgesteuerter generativer Methoden. Im Vordergrund steht hier die Umsetzung von standardisierten Prozessabläufen und wiederkehrenden Arbeitsschritten. Die Implementierung von Wissen in programmierten Werkzeugen wird durch Berücksichtigung funktionaler Kriterien und Abhängigkeiten erreicht. Hierzu zählen analytische und iterative Verfahren zur technischen Lösungsfindung. Resultate dieser Routinen sind beispielsweise Geometrie, Funktionsparameter und Kriterien, Regeln, Reaktionen sowie Bewertungen.

Tabelle 3.2: Funktionsniveaus und Klassifikation von Automationsmethoden

	Deskriptiv skriptbasierte Methoden	Prozedurbasiert generative Methoden	Kriterienbasiert generative Methoden
Analyse von Information	✓	✓	✓
Ausschreiben von Information	✓	✓	✓
Erstellung von CAD-Objekten		✓	✓
Definition von Relationen		✓	✓
Analytisch funktionale Auslegung			✓
Iterativ funktionale Auslegung			✓



Abbildung 3.29: Automationsmöglichkeiten am Beispiel des Konstruktionsprogrammes CATIA V5 anhand interner (CAA-CATIA Automation Architecture, CATSkript, VBA-Visual Basic for Applications) anhand externer Lösungen (VB-Visual Basic des .NET Frameworks, C++)

Die Umsetzung von konstruktionsnahen Programmen ist der problemorientierten Kategorie von Softwarewerkzeugen [60, S. 184] zuzuordnen. Moderne CAD-Systeme bieten hier unterschiedliche Schnittstellen und Automationsprachen an, siehe Abbildung 3.29. Mögliche Programmiersprachen sind Skriptsprachen, welche durch das System kompiliert werden oder selbst zu kompilierte Basissprache, beispielsweise C++ [64]. Die Grundlage für Automationswerkzeuge im CAD ist eine verfügbare Automationschnittstelle (API) und die Abbildung des Aufrufes der jeweiligen Funktion.

Eine zusätzliche Klassifikation von Automationswerkzeugen im CAD kann anhand der Integration der Automationsprozedur in das CAD-System getroffen werden. Automationsfunktionen können direkt im CAD-System integriert und von diesem ausgeführt werden, sowie als externe Anwendung ein CAD-System ansprechen [203, S. 67]. Die durchgängige Verfügbarkeit der Funktionsaufrufe über Automationschnittstellen ist in CAD-Systemen nur teilweise gegeben und kann zwischen den eingesetzten Automationsprachen im Umfang abweichen [64, S. 4]. Die Vorteile einer integrierten Automationschnittstelle bestehen in der direkten und eindeutigen Nutzung der verfügbaren Ressourcen des CAD-Systemes in Form von Funktionsbibliotheken. Für integrierte Automationswerkzeuge entfallen Aufwände, um das CAD-System anzusprechen und die Verfügbarkeit des Systems zu prüfen. Integrierte Automationschnittstellen verfügen in der Regel über Dokumentationsunterlagen, welche eine effiziente Lösungserstellung unterstützen. Nachteile von integrierten Automationslösungen in CAD-Systemen bestehen in teilweise eingeschränkten Funktionsumfängen, beispielsweise zur grafischen Gestaltung von Benutzeroberflächen oder bezüglich Möglichkeiten zur objektorientierten Programmierung (OOP) [128, S. 44ff].



Ein wesentlicher Vorteil einer externen Ansteuerung besteht in der umfassenden Kontrolle des CAD-Programmes. Hierzu zählen die Überwachung der Ressourcenauslastung und die Möglichkeit das CAD-System bei Erreichen der maximalen Auslastung zu beenden und neu zu starten, bis die Routine abgearbeitet ist. Darüber hinaus können verschiedene Abläufe des Automationswerkzeuges parallelisiert ('Threads') werden, wobei nur CAD-relevante Abläufe die Ressourcen des CAD-Systems belasten. Externe Automationswerkzeuge zeigen zusätzlich das Potential, dass Kernalgorithmen nicht ausschließlich für ein CAD-System gestaltet werden, sondern diese je nach Schnittstelle in verschiedenen Systemen eingesetzt werden können. Nachteile der externen Ansteuerung bestehen im zusätzlichen Aufwand, das gewünschte CAD-System und die benötigten Systemressourcen anzusprechen und die fortlaufende Verfügbarkeit zu prüfen. In der folgenden Tabelle werden Eigenschaften und Möglichkeiten von integrierten Automationsmethoden (CAA, CATSkript, VBA) und Automation auf Basis einer Automationsarchitektur (VB, C++) des CAD-Systemes CATIA V5 kompakt gegenübergestellt. Die Bewertung des Automationszuganges in CATIA V5 kann grundsätzlich auf weitere CAD-Systeme übertragen werden, wobei spezifische Unterschiede in den automotiv eingesetzten Systemen (z.B. Siemens NX [166, S.18]) auftreten können.

Tabelle 3.3: Vergleich von Zugangspunkten zur Automation im CAD

	integrierte Automationsmethoden	externe Entwicklungsumgebung
Ansteuerung der Programmressourcen	gegeben	Einbettung von Funktionsbibliotheken
Eindeutigkeit der Programmressourcen	gegeben	zusätzliche Definition je nach Version
Verfügbare grafische Methoden (z.B. GUI)	basierend auf CAD-Ressourcen	basierend auf Entwicklungsumgebung
Verfügbare Programmiermethoden (z.B. OOP)	teilweise verfügbar je nach Automationsprache	verfügbar je nach Entwicklungsumgebung
Laufzeit	eingeschränkt durch CAD-System	unabhängig von CAD-System
Ressourcenauslastung des CAD-Systems	durch alle Befehle der Applikation	nur CAD-Funktionen der Applikation
Zugriff auf Lösungen	intern im CAD	extern und intern
Lösungsadministration (Rollen, Rechte, Versionen)	geringe Möglichkeiten im CAD-System	erweitert durch externes Verwaltungsmanagement
Verfügbarkeit der Algorithmen	ausschließlich für ein CAD-System	Verwendung in mehreren CAD-Systemen möglich

### 3.2.1 Deskriptive skriptbasierte Methoden

Deskriptive programmgestützte Methoden ermöglichen eine automatisierte Abfrage, Aufbereitung und Ausleitung von vorliegenden Informationen. Der Umfang von deskriptiven Funktionen kann die Prüfung von qualitativen Kriterien [63, S. 67], [180], Sammlung und Zusammenfassung von Information, Strukturierung und Aufbereitung von vorliegenden Daten und eine Weitergabe an weitere Systeme umfassen. Der Nutzen ergibt sich neben reduziertem manuellen Aufwand aus der Systematisierung von Analysen und Schnittstellen unter Berücksichtigung von definierten Qualitätskriterien. Im Gegensatz zu generativen programmgestützten Funktionen werden vorliegende Informationen weiterverarbeitet ohne Objekte im CAD-System zu erzeugen. Grundlage zur Übermittlung von Daten aus dem Produktmodell bestehen in der Zugänglichkeit der hinterlegten Informationen über die Automationsschnittstelle und die eindeutige Klassifizierung der Art der Information. Deskriptive skriptbasierte Methoden umfassen in der vorliegenden Arbeit folgende Schwerpunkte:

- Erfassung direkt hinterlegter Information
- Analysemethoden zur Ermittlung nicht direkt vorliegender Information
- Aggregation der ermittelten Information
- Austausch von ermittelter Information zwischen Systemen

Die Erfassung bestehender Information erfordert die Vorgabe des zu beurteilenden Objektes, als auch des Typs der Information. Hierbei kann die Vollständigkeit und konforme Hinterlegung des Informationstyps geprüft werden. Beispiele dieser Analysen im CAD-System stellen automatisierte Erfassung von CAD-Strukturen, sowie das Ermitteln von Produkt- und Bauteilattributen, wie Bauteilnummern oder Bauteilmetadaten, dar.

Anhand von zusätzlichen Analysemethoden können weitere Eigenschaften von Produktmodellen erfasst werden, welche nicht durch Metadaten hinterlegt sind. Die einsetzbaren Methoden zur vertiefenden Produktanalyse beruhen hierbei auf den verfügbaren Möglichkeiten des CAD-Systems. Im Rahmen der Bewertung von Produktmodellen sind dies beispielsweise die Vermessung von Bauteilen bezüglich Masse, Volumen, Schwerpunkt, räumlicher Ausprägung oder Lage im Raum.

Daten, welche aus Bauteilen ermittelt werden, können im Rahmen gesamter Produktmodelle weiter verarbeitet werden. Darunter fällt die Aufbereitung und Strukturierung der ermittelten Information, als auch die Prüfung bezüglich der Konformität des Informationstyps und der Vollständigkeit. Beispiele für übergeordnete Analysen in der CAD-Anwendung sind die Aggregation von Einzelschwerpunkten eines Produktmodelles zu einem Gesamtschwerpunkt, oder die Ermittlung der Instanzen eines verbauten Bauteiles.

Die ermittelten Informationen können anhand von Automationswerkzeugen graphisch dargestellt, als auch in verschiedene Datenformate übergeführt werden. Textverarbeitungsformate (z.B. .txt, .xml, .csv...) stellen eine grundsätzliche Möglichkeit der Informationsübergabe dar. Hierzu müssen die verschiedenen Entwicklungssysteme eine Export sowie Importschnittstelle der einzelnen Formate aufweisen. In CAD-Systemen ist dies in der Regel gegeben [150, S. 125].

Im Rahmen automobiler Produktentwicklung sind deskriptive skriptbasierte Methoden hinsichtlich der Prüfung von vorliegenden Daten, Dokumentation und Weitergabe für weitere Entwicklungssysteme von Bedeutung. Die Relevanz dieser Methoden ergibt sich aus folgenden Aspekten in aktuellen Entwicklungsprozessen. PDM- beziehungsweise TDM-Systeme stehen im Zentrum der Produktdatenverwaltung und dienen als Versorgungsbasis für CAx-Systeme im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen. Zur funktionalen Auslegung anhand von CAx-Systemen sind neben geometrischen Daten auch Metadaten erforderlich. Zur Übergabe und Aufbereitung von geometrischen Daten existieren standardisierte Schnittstellen, welche für Metadaten und Information zur Systemintegration nur teilweise verfügbar sind. Neben der unidirektionalen Datenversorgung vom Autorensystem hin zu simulationsgestützten Methoden, sowie der digitalen Fertigungsplanung, ist die Rückgabe von Information nach durchlaufenen Entwicklungsschleifen als bidirektionaler Datentransfer von Interesse. Trotz stetiger Weiterentwicklung von Methoden zur systemgestützten integrierten Arbeitsweise anhand von PDM-Systemen [45], [165] existiert bis heute keine Standardschnittstelle, welche einen multi-direktionalen Informationsaustausch zwischen CAx-Systemen bewerkstelligen kann. Der Informationsaustausch aller erforderlichen Informationen in integrierten Produkterstellungsteams [57, S. 196] erfordert somit oftmals eine Gestaltung von individuellen Schnittstellen, um die Versorgung von Daten, welche nicht über standardisierte Schnittstellen [79, S. Y28] übermittelt werden, zu ermöglichen. Diese individuell gestalteten Schnittstellen können durch Werkzeuge der Automation unterstützt werden, um die erforderliche Arbeitseffizienz für die Übermittlung von umfangreichen Datensätzen zu erreichen. Individuell konzipierte Datenschnittstellen zeichnen sich hierbei durch erhöhte Flexibilität und Umsetzungsgeschwindigkeit aus, bedürfen jedoch einer entsprechenden Standardisierung und Wartung. Zu beachten ist, dass Dateien welche zur Versorgung von individuell gestalteten Schnittstellen generiert werden, keine losgelöste Datenversorgung von eingesetzten PDM-Systemen darstellen, sondern in bestehende Versorgungsprozesse integriert werden können.

#### Anwendungsbeispiel Allokation von Verbindungstechnik

Die Verwaltung, Analyse und Übergabe der Verbindungstechnik von Fahrzeugstrukturen zwischen CAx-Systemen wird aktuell in keinem allgemein standardisierten Format gehandhabt. Zu betrachtende Arten von Verbindungstechnik in der Automobilindustrie sind punktförmige Verbindungen wie Schweißpunkte, Nieten, Schrauben, sowie linienförmige Verbindungstechnik wie Klebeverbindungen, Schweiß- und Lötinähte. Methodische Lösungen für die umfassende Verwaltung und Weitergabe der Verbindungstechnikinformation existieren als spezifische Werkzeuge und Prozesse verschiedener Automobilhersteller [38], welche nicht allgemein verfügbar sind. Alternativ existieren allgemeine Werkzeuge in CAD-Systemen [164], [42], welche nur bedingt dem spezifischen geforderten inhaltlichen Umfang und den Prozessen der Datenversorgung entsprechen. Darüber hinaus existieren stark vereinfachte Herangehensweisen, welche auf bestehende Ressourcen von CAD-Systemen aufbauen und einen geringen Informationsgehalt aufweisen. Dies ist beispielsweise die geometriebasierte Übergabe der Position und des Typs der Verbindungstechnik, welche keine beschreibende Informationen umfasst, die für einen eindeutigen und korrekten Modellaufbau in weiteren SE-Disziplinen erforderlich sind. Besondere Relevanz haben die ÜbergabeprozEDUREN zwischen Autorensystemen, Simulationswerkzeugen und Produktionsplanung im Rahmen der Engineering Collaboration [62, S. 43] und dessen Verwaltung in PDM oder PLM Systemen. Relevante Informationen der zu übermittelnden Verbindungstechnikdaten umfassen:

- Verbindungstyp und Sub-Typ (optional)
- Position für punktförmige Verbindungstechnik
- Verlauf für linienförmige Verbindungstechnik
- Fügepaarung und Eigenschaften (z.B. Materialien, Wandstärken, Beschichtung)
- Eigenschaften der Verbindungsart (spezifisch je nach Verbindungsart)

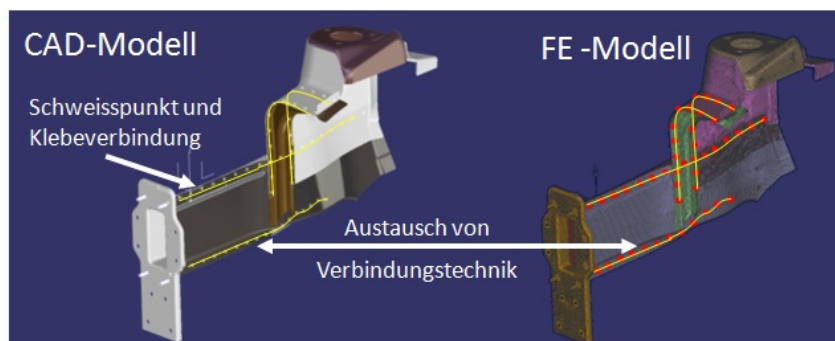


Abbildung 3.30: Beispielhafte Darstellung der Übermittlung von Verbindungstechnik zwischen den verschiedenen CAx-Systeme, beispielsweise CAD und CAE, im Rahmen von simultanen Entwicklungsprozessen

Eine Herausforderung stellt der Umgang mit unvollständigen Datensätzen in Bezug auf die Bereitstellung der zuvor aufgezählten Information dar, welche für die Datenübergabe zu erfüllen sind. Sofern die Verbindungstechnik nicht oder nicht konsistent in CAD-Modellen vorliegt, kann diese alternativ in der FE-Modellaufbereitung erstellt werden. Dies bedeutet, dass der Konstrukteur als Bauteil- und Baugruppenverantwortlicher möglicherweise nicht in die Definition und Positionierung der Verbindungstechnik eingebunden ist und produktionsrelevante Aspekte nicht in die Generierung einfließen.

Im vorliegenden Beispiel generiert das erarbeitete Programm die erforderliche Information der Fügepaarung für punktförmige Verbindungstechnik in der Produktstruktur des CAD-Modelles. Die Zuordnung der Schweißpunkte erfolgt durch eine geometrische Distanzanalyse zwischen Schweißpunktposition und Bauteil. Unterteilt nach Klassifizierung der Anzahl der zu fügenden Komponenten werden angrenzende Bauteile nach dem Prinzip des minimalen Abstandes zugeordnet. Die Definition des Suchradius zur Ermittlung angrenzender Bauteile wird dynamisch an die Bauteilwandstärken angepasst, welche je nach Material unterschiedlich sind. Die Kenntnis der Wandstärken ist erforderlich, um Mehrfachpaarungen, beispielsweise drei- oder vierfach Fügekombinationen anhand des Algorithmus korrekt zu erfassen. Die je nach Werkstoff spezifizierten Suchradien können durch den Algorithmus in einem definierten Toleranzbereich variiert werden.

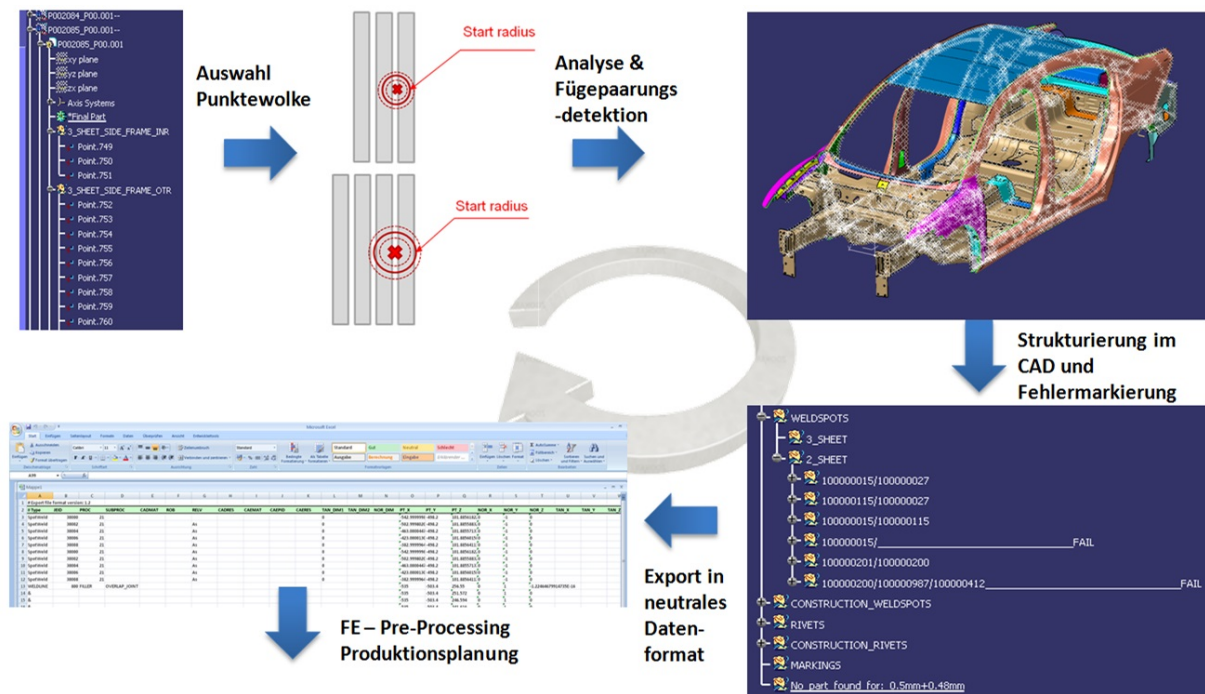


Abbildung 3.31: Prozess der Verbindungstechnikallokation anhand eines deskriptiven prozedurbasierten Programmes

Die in Abbildung 3.31 dargestellten Prozessschritte beginnen bei der Selektion der punktförmigen Verbindungstechnik, z.B. Schweißpunkte, im CAD-Modell. Hier kann eine Auswahl von Punkten, sowie das gesamte Modell angewählt werden. Nachfolgend können Kriterien der Allokation zugewiesen werden. Hierzu zählen die verwendeten Materialien der Struktur, die Definition der maximalen Anzahl der zu fügenden Bauteile, sowie die Art der Verbindungstechnik. Die selektierten Punkte werden nachfolgend im CAD-Produktmodell den Bauteilen im Suchradius zugeordnet. Diese Vorgangsweise ermittelt nicht direkt vorliegende Information der Fügepaarung und kombiniert diese mit hinterlegter Information, in diesem Fall der Bauteilnamen der ermittelten Bauteile im Suchbereich. Die ermittelte Fügekombination kann optional im nächsten Schritt im Rahmen einer generierten Modellstruktur abgelegt werden, wobei dieser Prozessschritt strenggenommen bereits generativ skriptbasierten Methoden entspricht. Die Strukturierung wird hierbei nach Typ der Verbindungstechnik und der Fügekombination zusammengefasst. Sofern dieser Schritt übergangen wird, werden die Position der Verbindungstechnik als Koordinaten im 3D, der Typ der Verbindungstechnik und die ermittelten Bauteile in Form der Bauteilnummern in ein Textformat (csv-Datei) übergeführt. Diese Textdatei kann wiederum von Pre-Procesoren von CAE-Systemen, als auch Produktionsplanungssystemen eingelesen werden.

Sofern die Verbindungstechnik anhand generativer Funktionen im CAD strukturiert abgelegt wird, stehen weitere Funktionen zur Plausibilisierung zur Verfügung. Bei nicht eindeutigen Ergebnissen der Bauteilzuordnung, beispielsweise zu wenigen oder zu vielen Bauteilen im Suchbereich, werden Fügeelemente für eine Nachbearbeitung markiert. Entwickler können diese Positionen der Verbindungstechnik manuell prüfen und gegebenenfalls korrigieren. Zusätzlich können doppelte Elemente anhand des Werkzeugs gefunden und visualisiert werden. Der Vorteil der Plausibilisierungsmethoden im CAD-System besteht in der vereinfachten Überprüfung durch den Bauteilverantwortlichen vor Modellübergabe. Ein geprüfter und korrekter Verbindungsdatensatz führt zu reduzierten Aufwänden zum Modellaufbau in nachgelagerte Entwicklungssystemen.



Abbildung 3.32: Visualisierung von nicht eindeutig zugeordneter Verbindungstechnik

Ein wesentlicher Aspekt in simultanen Entwicklungsprozessen besteht im mehrdirektionalen Austausch von Daten in verschiedenen Entwicklungssystemen. Auf Basis des ersten Verbindungstechnikdatenstandes können Bewertungen und Verbesserungen aus verschiedenen funktionalen Aspekten erarbeitet werden. Anhand von definierten Schnittstellen ist daher nicht nur ein Datenexport, sondern auch ein Datenimport umzusetzen. Anhand einer integrierten Importschnittstelle von verschiedenen Entwicklungsdisziplinen in das zentrale Produktmodell können Verbesserungsvorschläge und Bewertungen systemgestützt in das zentrale Produktmodell eingebracht werden. Dies ist beispielsweise eine optimierte Verteilung punktförmiger Verbindungsgarten welche nach Kosten- und Steifigkeitskriterien ermittelt werden kann. Eine Neuverteilung von punktförmiger Verbindungstechnik im Gesamtfahrzeug kann eine Vielzahl von Verbindungselementen betreffen, sodass eine manuelle Rückführung sich als aufwändiges Unterfangen darstellt. Ebenso können in Bewertungsprozessen, beispielsweise der Produktionsintegration, technisch nicht machbare Positionen ermittelt werden. Eine geänderte Verteilung der Verbindungstechnik kann im Rahmen eines simultanen Entwicklungsprozesses in das Produktmodell rückgeführt und unter verschiedenen Aspekten bewertet werden. Im vorgestellten Entwicklungswerkzeug wurde aus diesem Grund auch eine Importschnittstelle implementiert, welche den geschlossenen Austausch von Verbindungsdateninformation zwischen Systemen unterstützt. Anhand des Datenimports in das zentrale Produktmodell ergibt sich automatisch eine systematische Dokumentation von Vorschlägen und des Änderungsverlaufes, welcher in PDM- oder PLM-Systemen verwaltet werden kann.

### **Zusammenfassung und Vergleich zu bestehenden Methoden**

Der vorgestellte Ansatz unterstützt die Zuordnung der Verbindungstechnik zu den zu fügenden Bauteilen im CAD, sofern keine strukturierten Verbindungstechnikdaten vorliegen. Dies ist ein wiederkehrendes Szenario bei der Datenübergabe zwischen OEM und Lieferanten. Erweitert wird die Strukturierung mit Methoden zur Plausibilisierung des Verbindungstechnikdatensatzes. Die Analyse der Verbindungstechnik kann auf Gesamtfahrzeug- und Modulebene durchgeführt werden, somit ist es möglich, selektiv lokale Bereiche zu bearbeiten. Dies erhöht Qualität der Zuordnung und vereinfacht eine parallele Bearbeitung, da die einzelnen Zusammenbauten innerhalb einer Fügefolge einzeln bearbeitet werden können. Darüber hinaus kann die getrennte Betrachtung genutzt werden, um Verbindungstechnik für verschiedene Fahrzeuge auf einer Fahrzeugplattform selektiv zuzuweisen. Die Verbindungstechnik der Plattform wird einmalig zugewiesen und überprüft. Verbindungstechnik welche Plattform- und Derivatsteile betrifft, kann den verschiedenen Derivatsvarianten selektiv zugewiesen werden.

Nach der Plausibilisierung im Autorensystem kann der Simulation, als auch Produktionsplanung, ein qualitativ geprüfter Datenstand mit den geforderten Metadaten übergeben werden, wodurch kein zusätzlicher Simulationsdurchlauf zur Plausibilisierung benötigt wird. Die Durchlaufzeiten in der Modellaufbereitung einer Simulationsschleife können somit beschleunigt werden.

Anhand einer mehrdirektionalen Schnittstelle ist eine systemgestützte Rückgabe von Information nach dem Durchlaufen von Entwicklungsschleifen möglich. Mündliche Kommunikation und zusätzliche Dokumentationsunterlagen können durch das Verbindungsdatenfile wirksam ergänzt, und der Aufwand zur Informationsübergabe reduziert werden. Die erzeugten Datensätze können im Rahmen eines gesamtheitlichen Produktlifecyclemanagements [61, S. 280] in der Ausarbeitung verwaltet werden. Die Gestaltung und Weiterentwicklung dieser Verbindungsdatenschnittstelle ermöglicht eine agile Integration von neuen Verbindungstechniktypen und zusätzlicher Metadaten. Besonders Multimaterialkonzepte in der Strukturentwicklung umfassen unterschiedliche und neue Arten von Verbindungstechnik (z.B. Nieten, Nageln, CMT Schweißen...), welche somit übermittelt werden können.

Von OEM konzipierte und verwendete Methoden und Werkzeuge in CAD-Systemen zur Verbindungsdatenverwaltung setzen auf eine detaillierte Definition und Beschreibung der Verbindungstechnik (z.B. DX-Weld [38], FIDES [70]), welche in der Regel keine weitere Aufbereitung für eine Datenübergabe erfordert. Methoden zur Zuordnung der Fügepartner sind aufgrund dieser Verwaltungssysteme nicht mehr erforderlich. Sofern diese Methoden nicht vorliegen und eine korrekte Zuordnung der Verbindungstechnik generiert, beziehungsweise überprüft werden muss, existieren neben dem CAD alternative Methoden in Finite-Elemente Pre-Processoren. Die Zuordnung basiert in diesen Werkzeugen ebenfalls auf Distanzkriterien, wobei die korrekte Zuordnung nicht mehr durch die Bauteilentwicklung geprüft wird. Fehler in der automatisierten Zuordnung in der Simulation können entstehen, sofern Informationen der Fügefolge nicht vorliegen und die automatisiert ermittelten Fügepartner nicht dem realen Fügeprozess entsprechen. Eine Zuordnung im Simulationsmodell erfordert somit eine zusätzliche Plausibilisierungsschleife mit dem Bauteilentwickler, um einen korrekten Einbau der Verbindungstechnik zu gewährleisten.

Anhand der selektiv einsetzbaren und performanten Methode des umgesetzten Programmes kann das Verbindungsdatenmanagement für verschiedene Rohbauvarianten in der Handhabung vereinfacht werden, wodurch speziell die automobilen Individualisierung unterstützt wird.



### 3.2.2 Ablaufgesteuerte generative Methoden

Ausgehend von Möglichkeiten deskriptiver Routinen können anhand von Automationschnittstellen auch Objekte in CAD-Systemen generiert werden. Eine Abfrage von Modell- und Systemdaten ist zumeist die Basis für eine Erstellung von Objekten durch Automatismen. Im Gegensatz zur kriteriengesteuerten Auslegung (siehe Kapitel 3.2.3) wird in der ablaufgesteuerten Erstellung primär die Abfolge eines vorgegebenen Arbeitsverlaufes abgearbeitet. Im Ablauf der Routine können verschiedene vorgefertigte Pfade verfolgt werden, wobei auf vorliegende Informationen reagiert werden kann (z.B. 'If-Then-Else', 'Select Case'...). Der Unterschied zu kriteriengesteuerten generativen Methoden besteht darin, dass die Vorgangsweise in der Objektgenerierung nicht auf funktionalen sondern auf ablaufbedingten Aspekten beruht, und daher den definierten Prozess in den Vordergrund stellt. Folgende auszugsweise aufgezählte Elemente können automatisiert in einem CAD-System erstellt werden:

- Produktstrukturen
- Bauteilstrukturen
- Geometrie
- Metadaten
- Parameter
- Funktionszusammenhänge (Funktionsketten)
- Überprüfungen ('Checks')
- Regeln ('Rules')
- Reaktionen ('Reactions')
- Relationen (Assoziativität)
- Bemaßungen und Symbole

Der Nutzen von automatisierter Erstellung von Objekten erstreckt sich von einfachen Abläufen zur Erstellung einer spezifizierten Modellstruktur, bis hin zu komplexen Prozeduren zur Erstellung von Geometrien, Regeln und Reaktionen. Bei diesen Routinen steht besonders der Zeitvorteil und die reproduzierbare Datenqualität im Vordergrund.

Eine Herausforderung in der skriptbasierten Erstellung von geometrischen Objekten besteht in der Gewährleistung der Plausibilität. Überprüfungen bezüglich der Korrektheit der erstellten Objekten sind in den Routinen zu implementieren, um valide Auslegungsschritte umzusetzen. Ein Ansatz zur Überprüfung besteht in der Abfrage des Fehlerstatus des CAD-Systems bei Objekterstellung. Diese Methode erlaubt eine deutliche Reduktion des Aufwandes zur Plausibilisierung geometrischer Operationen anhand von Automationswerkzeugen.

#### Anwendungsbeispiel zur durchgängigen Übermittlung der Lagengrenzen von Faserverbundbauteilen von CAD zu CAE

Für die Übergabe von Information von Materialeigenschaften sind für inhomogene Werkstoffe (z.B. Verbundwerkstoffe) neue Methoden für die Datenübermittlung erforderlich. Neben der Übergabe der geometrischen Ausprägung sind Informationen zu Materialeigenschaften, zur lokalen Materialverteilung und Begrenzung, sowie zur Materialausrichtung (Faserrichtung) zwischen Systemen auszutauschen. Im CAD-Modell können die einzelnen Faserlagen und Faserrichtungen eines Faserverbundbauteiles modelliert werden, um die geometrische Integration als auch fertigungsrelevante Faktoren zu beurteilen. In den Konstruktionsumfang fällt die Definition des Lagenaufbaues, der Lagengrenzen, des Fasertyps, der Faserausrichtung und des Harzsystems.

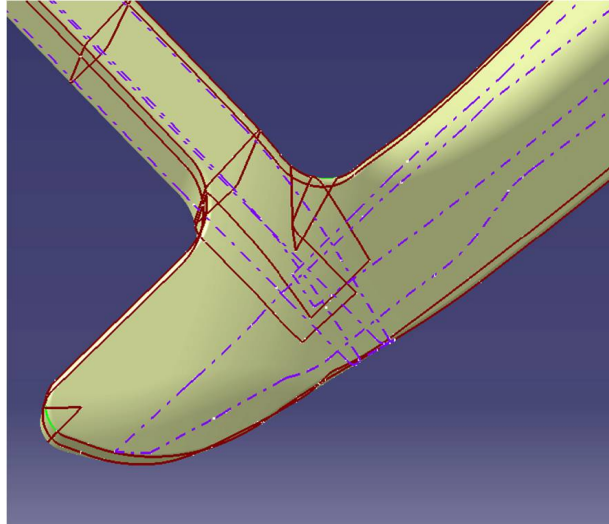


Abbildung 3.33: Flächenaufbau eines Faserverbundbauteiles und Randkurven von Lagen in 0° Faserrichtung (durchgängige Linien) und in 90° Faserrichtung (strichlierte Linien)

Die Modellierung des Faserverbundbauteiles erfolgt in der Regel über eine Flächenschale, auf welcher die einzelnen Lagen definiert werden. Eine Volumendarstellung über die nicht konstante Wandstärke wird in der Regel nicht aufgebaut, wobei diskret an Schnittpositionen die Wandstärke visualisiert werden kann, siehe Abbildung 3.34. Die Modellierung anhand einer Grenzlage ist zulässig, sofern der geometrische Abstand der Lagen nur geringen Einfluss auf Bauteileigenschaften wie die Bauteilsteifigkeit hat. Beispielsweise ist bei der Modellierung von Kernen in 'Sandwich'-Strukturen ('Honeycomb') eine Flächenmodellierung von beiden Seiten des Kerns erforderlich.

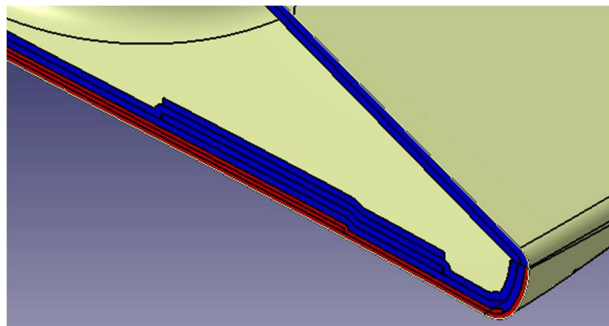


Abbildung 3.34: DMU-Schnitt zur Visualisierung einer lokalen Verstärkung im Lagenaufbau eines Faserverbundbauteils

Zur Abklärung der fertigungstechnischen Aspekte kommt in der Faserverbundmodellierung die Simulation der Drapierung zum Einsatz. Diese bewertet die geometrischen Eigenschaften zur Adaption eines planaren Lagenzuschnittes auf eine vorgegebene Bauteiltopologie, als auch die Ableitung des finalen Lagenbeschnittes in der Herstellung, siehe Abbildung 3.35. Die Ermittlung der Drapierung kann auf Basis geometrischer Algorithmen [167], [40] und durch Finite-Elemente-Methoden dargestellt werden

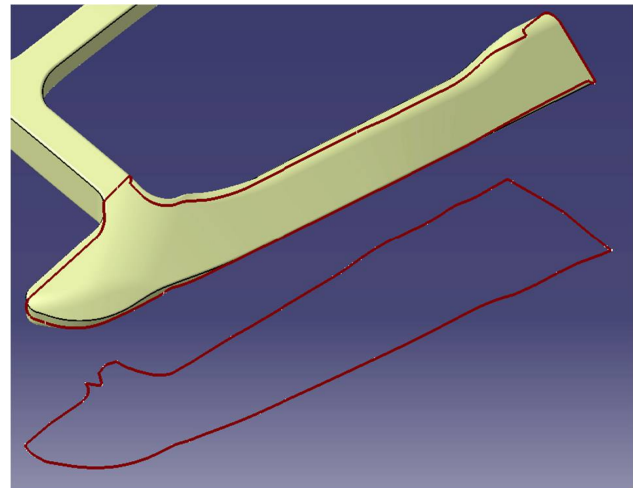


Abbildung 3.35: Ableitung eines Lagenzuschnittes einer einzelnen Faserlage

[66]. Der zugrundeliegende Aspekt des Drapierens besteht im maximalen Scherwinkel einer Lage, welche durch die Eigenschaften der Faser bestimmt wird. Eine Erläuterung dieses Aspekts wurde bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellt. Die Drapiersimulation ermöglicht eine erste Beurteilung, ob sich der Lagenaufbau in der Bauteilfertigung umsetzen lässt.

Die Beurteilung der mechanischen Eigenschaften in Bezug auf die Funktionserfüllung erfolgt für Faserverbundbauteile durch Finite-Elemente-Methoden [71, S. 419]. Durch Übergabeformate (z.B. hdf5) kann die Information des Lagenaufbaues zwischen CAD- und CAE-Systemen in Form der diskreten Drapierpositionen übergeben werden. Diese enthalten die einzelnen Lagen an der drapierten Position und die entsprechenden Faserrichtungen. Die Genauigkeit der diskreten Drapierpositionen kann im CAD-System in der Drapiersimulation eingestellt werden. Die Überführung der Konstruktion in CAE-Modelle bedingt eine Diskretisierung der Geometrie in FE-Knoten und Schalenelemente, welche mit den diskreten Positionen des Drapierens in der Regel nicht korrelieren.

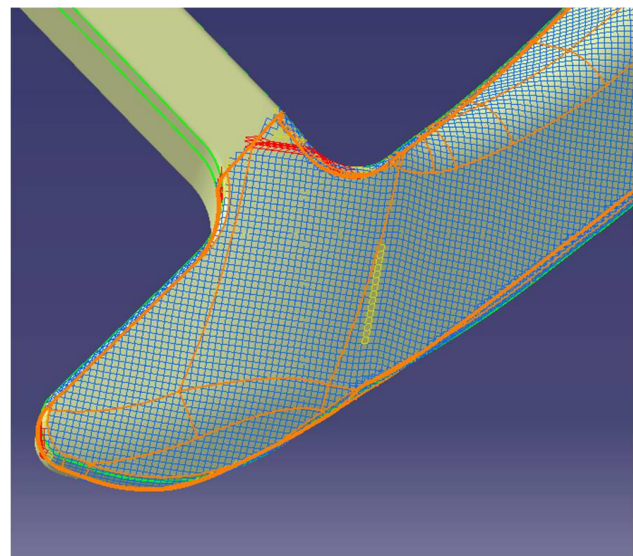


Abbildung 3.36: Drapierung einer Faserlage anhand von geometrischen Abwicklungsalgorithmen zur Definition der Faserrichtung

Sofern ein Faserverbundbauteil konventionell vernetzt wird, erfolgt die Lagenbegrenzung im FE-Modell anhand von FE-Knoten, welche von den Lagenkanten in der Regel abweichen, siehe Abbildung 3.37 links. Die Beurteilung eines Spannungsverlaufes kann durch den entstehenden unstetigen geometrischen Verlauf der Lagenrandkurven und nicht vollständig bedatete Lagen im FE-Modell beeinflusst werden und zu unplausiblen Resultaten führen. Eine durchgängige Datenübergabe der Lagen Grenzen zwischen CAD und CAE kann so zu einer verbesserten Datenqualität und funktionalen Aussage beitragen.

### **Automatisierter Algorithmus zur Aufbereitung der Lagenrandkurven im CAD**

Zur durchgängigen und korrekten Übertragung von Lagenbegrenzungen zwischen CAD und CAE-Systemen ist eine Vorgangsweise zu entwickeln, welche es ermöglicht diese Information in bestehenden Entwicklungslandschaften zu übermitteln. Ein Ansatz besteht darin, die Fähigkeit von FE Pre-Processoren zur Interpretation von Flächensegmenten in einem Bauteil zu nutzen. Teilflächen eines Bauteiles können hierbei als einzelnen Objekte, als auch als Verbund interpretiert werden. Sofern die Flächensegmente einzeln interpretiert werden, wird jedes Segment unter Berücksichtigung der Randkurven vernetzt. Die Netzpunkte am Rand der Segmente können zusammengeführt werden und ergeben einen vernetzten Verbund, wobei die Lagenbegrenzungen implizit über die Netzpunkte an den Randkurven dargestellt werden.

Um die segmentierte Vernetzung des Pre-Prozessors zu ermöglichen, ist eine Vorbereitung der Flächen im CAD-Modell vor der Bauteilübergabe erforderlich. Die gesamte Trägerfläche ist in geeigneter Weise zu teilen, sodass kein Flächensegment bestehen bleibt, welches durch eine Lagenrandkurve durchzogen wird. Das Ziel der Segmentierung besteht in einer Flächensammlung, welche dieselbe Größe der zugrundeliegenden Trägerfläche aufweist und jedes Flächensegment nur von Lagenrandkurven begrenzt ist. Das Kriterium zum Beenden der Segmentierung ist definiert durch den Umstand, dass kein Flächensegment vorliegt, welches durch eine Lagenrandkurve geteilt wird.

Die Umsetzung der Flächensegmentierung kann durch manuellen Beschnitt der Trägerfläche gelöst werden, wobei ein entsprechender Arbeitsaufwand anfällt. Die Anzahl der Flächensegmente für Faserverbundbauteile bewegt sich hierbei oftmals im dreistelligen Bereich, wodurch eine manuelle Bearbeitung mit geforderten Effizienzzielen im Widerspruch steht. Die Fragestellung kann alternativ anhand von Automatismen mit deutlich geringerem Aufwand gelöst werden, sofern eine geeignete Vorgangsweise gefunden werden kann. Die Anforderungen an die generische Vorgangsweise bestehen in der vollständigen Segmentierung der Trägerfläche auf Basis einer beliebigen Anzahl von begrenzenden Lagenrandkurven und deren Kombinationen.

Das hier vorgestellte Anwendungsbeispiel ist ein ablaufgesteuertes automatisiertes Werkzeug, welches die erforderliche Aufbereitung der Trägerfläche im CAD vornimmt. Die verwendeten Eingabeinformationen bestehen aus der Trägerfläche des Bauteils und den Randkurven des Lagenaufbaus. Die umgesetzte Methode besteht aus einem kombinatorischen Beschnitt der Trägerfläche anhand der Lagenrandkurven. Für jeden Durchlauf wird die Trägerfläche mit allen Lagenrandkurven beschnitten, sofern eine gültige Verschneidung existiert, bis keine weitere Beschnittoperation möglich ist. Das finale Flächensegment erfüllt die Anforderung für die Vernetzung und kann aus der initialen Trägerfläche herausgelöst werden. Die um das Flächensegment reduzierte Trägerfläche durchläuft nachfolgend erneut den Beschnittprozess, bis kein weiterer Beschnitt möglich ist und somit das Abbruchkriterium erreicht ist. Das finale Resultat besteht aus Einzelflächen, welche keine Beschneidung mit Lagenrandkurven aufweisen und deren Summe der Flächeninhalte exakt der Ausgangsfläche entspricht. Ein Vergleich der Vernetzungsergebnisse von segmentierter und nicht bearbeiteter Trägerfläche ist in Abbildung 3.37 angeführt.

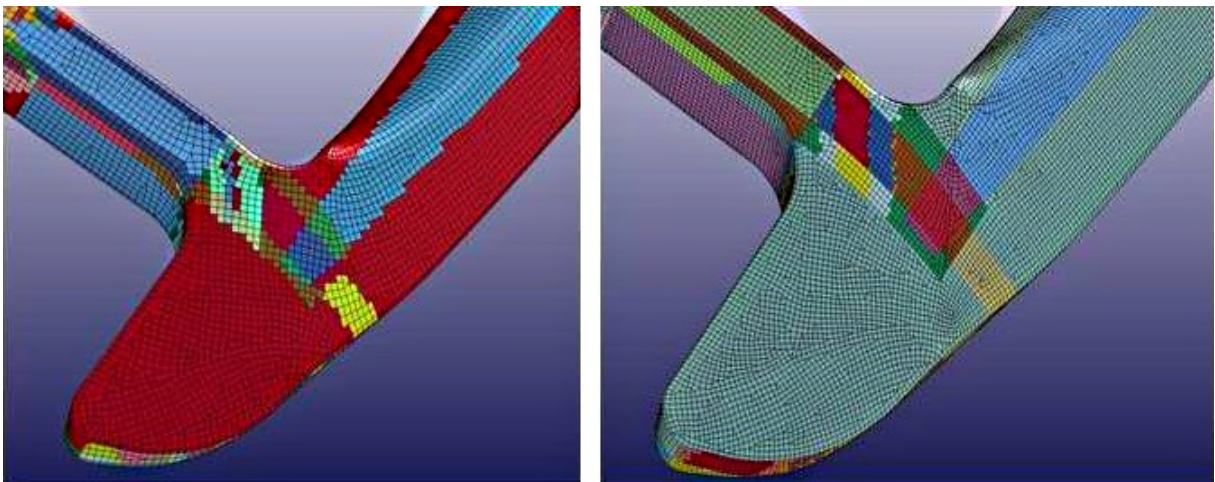


Abbildung 3.37: Vergleich des Vernetzungsergebnisses von lagenunabhängiger Vernetzung (links) und lagen-spezifischer Vernetzung (rechts)

Für den korrekten Durchlauf des Algorithmus ist die Erfassung der Beschnittseite erforderlich, um die zwei Möglichkeiten des Beschnittes zu steuern. Zusätzlich sind Fehlerbehandlungsprozeduren nötig, um die Prüfung der Gültigkeit der Beschnitte zu prüfen und entsprechend reagieren zu können. Zusätzlich wurde ein Kriterium zur Verbesserung der Performance implementiert. Sofern der Beschnitt der Trägerfläche mit der ersten gewählten Lagenrandkurve zu keinem validen Ergebnis führt, wird angenommen, dass diese Kurve für die noch verbleibende Trägerfläche keine Relevanz besitzt. Diese Kurve wird aus dem Beschnittprozess herausgenommen und reduziert somit die Bearbeitungszeit jeder nachfolgenden Schleife.

### Zusammenfassung und Vergleich zu bestehenden Vorgangsweisen

Konventionelle Übergabeprozesse anhand Standardschnittstellen von CAD zu CAE können die in der Konstruktion definierten Lagengrenzen eines Lagenaufbaus nicht explizit übermitteln. Dies führt zu abweichenden und diskontinuierlichen Lagengrenzen in CAE-Modellen. Die Übermittlung der Lagengrenzen findet nach dem Stand der Technik indirekt über die Bedatung der vernetzten Elemente im CAE-Modell statt, welche allerdings nicht mit den Lagengrenzen korrelieren. Es ist keine zusätzliche Anwendung bekannt, welche es ermöglicht, die affinen Lagengrenzen von Faserlagen zwischen CAD und CAE zu übermitteln. Anhand des vorgestellten Algorithmus ist es nun möglich, die in bestehenden Entwicklungslandschaften verfügbaren Geometrieschnittstellen auf effektive Weise zu nutzen, um die Lagenrandkurven implizit zu übermitteln.

Die Methode des lagenspezifischen Beschnittes beruht auf einem Verfahren, welches auf der Bauteilträgerfläche alle Begrenzungskurven der Lagen appliziert und separiert. Das Ergebnis der Routine ist eine Flächensegmentierung, welche für jede Lagengrenze eine Flächenrandkurve zur Verfügung stellt. Es entstehen durch den Beschnittalgorithmus kleinste Instanzen von Flächen, begrenzt durch die Kombination unterschiedlicher Lagenrandkurven. Der Durchlauf zur kompletten Segmentierung ist abhängig von der Anzahl der Lagen und deren räumlicher Ausprägung. Die Methode führt zu einer Reduktion des Aufwandes von rund 95 Prozent, verglichen zur manuellen Vorgangsweise. Die Bedatung des CAE-Modelles mit der Lageninformation findet nachfolgend, anhand der Übermittlung von Fasertyp und Faserrichtung in Form von diskreten Positionen der Drapiersimulation, statt. In Abbildung 3.37 auf der rechten Seite ist die korrekte Darstellung der Lagengrenzen im CAE-Modell optisch erkennbar, welche durch die vorgestellte Methode erreicht werden kann.

Ein kritischer Aspekt der lagenspezifischen Vernetzung ist der Einfluss der Elementkantenlänge auf die Korrektheit und Stabilität von expliziten Rechenverfahren. Die Festlegung der Elementkantenlänge im CAE-Modell wird beeinflusst durch die Rechengeschwindigkeit. Physikalische Eigenschaften, wie die Körperschallgeschwindigkeit, erfordern darüber hinaus eine durchgängige Anwendung der gesetzten Länge, wobei ein geringer Toleranzbereich für abweichende Elemente möglich ist. Bedingt geeignet ist diese Form der Vernetzung daher für Simulation in der Fahrzeugsicherheit, sofern die Elementkantenlänge größer ist als die Abstände der einzelnen Lagenrandkurven, beispielsweise durch kurz überlappende Lagenstapel. Sofern der Abstand von einzelnen Lagengrenzen größer ist als die gewählte Elementkantenlänge, ist eine Anwendung der Methode auch in der expliziten Simulation denkbar. Die lagenspezifische Vernetzung eignet sich daher im Allgemeinen für hochauflösende Analysen mit Fokus auf die Betriebs- und Dauerfestigkeit.

### 3.2.3 Kriteriengesteuerte generative Methoden

Neben rein ablaufsorientierten generativen Routinen, siehe Kapitel 3.2.2, ist es in programmierten Werkzeugen möglich, funktionale und fertigungstechnische Anforderungen, Zusammenhänge und Kriterien zu implementieren. Dieser Schritt ist vergleichbar mit der Weiterentwicklung von parametrisch assoziativen CAD-Modellen hin zu wissensbasierten Modellen. Besonders wiederkehrende Gestaltungsabläufe, welche über technische Auslegungskriterien gesteuert werden, können ebenso über programmgestützte Werkzeuge umgesetzt werden. Ein zusätzlicher Mehrwert bei der Erarbeitung von kriteriengesteuerten generativen Methoden kann durch eine systematische Analyse, Aufbereitung und Dokumentation von Wissen erreicht werden. Nach der Umsetzung kann das hinterlegte Wissen weiterentwickelt und auf effektive Weise angewendet werden.

In CAD-Systemen stellen automatisierte Ansätze der kriteriengesteuerten funktionalen Auslegung, sowie davon abgeleitete Optimierungsmethoden, eine Weiterentwicklung zu bestehenden Vorgangsweisen dar. Besonders Optimierungsverfahren und die erreichbare Verbesserung von technischen Lösungen im Vergleich zu manuellen Vorgangsweisen sind von Interesse, da der Lösungsraum auf systemgestützte Weise bearbeitet werden kann. Ein vertiefender Ansatz im CAD-System enthält integrierte Optimierungsmethoden, welche keinen Datenaustausch über Softwaresystemgrenzen erfordern. Methoden zur Optimierung nach Meywerk [131, S. 304] sind:

- Suchstrategien (Jacob, Simplex, Monte-Carlo)
- Newton- und Gradientenverfahren
- Verfahren der zulässigen Richtungen und SQP-Verfahren
- Evolutionäre Algorithmen
- Ganzzahlige Optimierung
- DOE und RSM
- Neuronale Netze
- Multikriterielle Optimierung

Der Ansatz der kriteriengesteuerten generativen Methoden kann genutzt werden, um einen erhöhten Lösungsspielraum anhand von systemgestützter Parametervariationen in Produktmodellen und iterativen Auslegungsschleifen zu erreichen. Die Implementierung von Lösungen nach diesem Ansatz in CAD-Systeme ermöglicht eine effektive Bearbeitung von gegenläufigen geometrischen Anforderungen. Vorgaben der geometrischen Optimierung sind beispielsweise geometrische Form, Position oder kinematische Randbedingungen. Ausgehend von einer Ausgangsgeometrie ('Baseline') kann auf Basis von gewählten Kriterien ein systemgestützter Vorschlag zur Zielerreichung generiert werden.

Zu beachten ist, dass Optimierungsalgorithmen für spezifische Fragestellungen konzipiert und eingesetzt werden. Die Auslegung der Optimierungsmethode wird hierbei von steuerbaren Eingabeinformationen und prüfbareren Kriterien bestimmt. Einstellbare Gewichtungen und Optionen des Algorithmus und die Gewichtung von Kriterien erlauben eine der Fragestellung angepasste Anwendung und erweitern den Einsatzbereich. Auf Basis der Funktionsdefinition sind Zusammenhänge zu erarbeiten und eine Zielfunktion zu entwickeln, welche für gegenläufige Anforderungen konvergente Optimierungsergebnisse liefern kann. Bei Vorliegen von lokalen Optima können unterschiedliche Startpunkte zu geänderten Ergebnissen führen. Der Startpunkt der Optimierung kann somit bei iterativen Optimierungsverfahren die Lösungsfindung beeinflussen. Zu überprüfen ist, ob gewählte Kriterien zumindest zu einem Optimum konvergieren können und die Anforderung einer kontinuierlichen und differenzierbaren Zielfunktion erfüllt sind [47, S. 183].

Bei der Integration von Optimierungsmethoden in CAD-Systeme sind verfügbare Ressourcen miteinzubeziehen. Die Ansteuerung von CAD-Funktionen ist in der Regel nicht als kompilierte Funktionsbibliothek verfügbar, sondern wird anhand von Automationschnittstellen ausgeführt. Dies erfordert für jeden Funktionsaufruf eine permanente Nutzung der Ressourcen des CAD-Systems und eine erhöhte Rechenleistung im Vergleich zur direkten Einbindung von kompilierten Funktionsdateien. Dieser Umstand wirkt sich entsprechend auf die Leistungsfähigkeit von programmierten Prozeduren aus, besonders für iterative Verfahren. Sofern für Optimierungsmethoden eine stete Rückkopplung der geometrischen Repräsentation anhand des CAD-Systems erforderlich ist, stellt die beschriebene Rahmenbedingung jedoch eine Notwendigkeit dar. Daraus lassen sich Einsatzgebiete der geometrischen Optimierung hinsichtlich Lage, Form und Kinematik ableiten. Ein weiterer Nutzen der immanenten Nutzung der CAD-Ressourcen besteht in der Möglichkeit zur Überprüfung der geometrischen Konsistenz anhand von vorhandenen Fehlerbehandlungsroutinen des CAD-Systems, anstatt zusätzlich erforderlichen Routinen in der Automationsanwendung.

### **Anwendungsbeispiel einer Formoptimierung von PKW-Seitenscheiben**

Die Verglasung von Fahrzeugen ist eine bauraumrelevante Randbedingung für die Strukturentwicklung. Die Bewertungen von Stylingflächen erfordert kurze Zyklen, um Aspekte der Machbarkeit zeitnah in das Produktdesign zu integrieren. Für die Strukturentwicklung ist es von Interesse, inwiefern die vorgegebene Stylingscheibe adaptiert werden muss, um geforderte Funktionen zu erfüllen und zu definieren welche Änderungen für die Strukturbauteile zu erwarten sind. Eine Änderung der Scheibenform kann beispielsweise Änderungen am Rohbau im Bereiche der A- und B- und C-Säule, als auch an der Türstruktur erfordern.



Im vorliegenden Lösungsbeispiel wird genauer auf die Form und Position von PKW-Seitenscheiben eingegangen, welche Teil eines Türmoduls sind. Die erste Formgebung und Position der Seitenscheibenflächen wird im Rahmen des Exterieurstylings erarbeitet. Nachfolgend sind in der technischen Auslegung funktionale und fertigungsrelevante Aspekte zu prüfen. Seitenscheiben, welche in Türen verbaut werden, sind in der Regel absenkbar auszuführen, um Lüftungsfunktionen und bei geschlossenen Türen und eine Zugänglichkeit zu außenliegenden Objekten aus dem Fahrzeug umzusetzen. Sofern absenkbare Scheiben gefordert sind, unterliegt die Form der Seitenscheibe speziellen Anforderungen:

- Zulässige Deformation der Dichtungen bei Absenkung
- Bauraumbedarf des überstrichenen Volumens und Freigänge
- Bauraumkonformität bezüglich weiterer Komponenten (z.B. Struktur, Schloss...)
- Einflüsse von Kosten und Fertigung auf Kinematik und Form der Scheibe
- Einflüsse der Kräftesituation auf die Anbindung der Scheibe

Die Anforderungen an die Flächenform ergeben sich durch die Einspannung der Seitenscheibe anhand der Fensterheberaufnehmer und der umlaufenden Dichtungen. Während der gesteuerten Absenkbewegung ist eine minimale Deformation der Dichtungen umzusetzen und zu überprüfen, siehe Abbildung 3.38. Hieraus ergeben sich geometrische Forderungen an die Form der Scheibe. Es müssen Regelflächen, welche bei definierter Bewegung keine Abweichung aus der Trägerfläche aufweisen, gefunden werden, um diese Anforderung zu erfüllen. Mögliche Flächen hierzu sind Schiebe-, Schraub- und Kugelflächen [74]. Erfahrungen in der Entwicklung zeigen, dass das vorgegebene Scheibenstyling diese Anforderung in der Regel nicht erfüllt. Aus diesem Grund ist die Stylingfläche, unter dem Kriterium der minimaler Änderung, in eine der zuvor klassifizierten Flächenformen überzuführen. Das Vorliegen einer Schraubfläche bedeutet nicht automatisch eine machbare Lösung gefunden zu haben. Zusätzlich Bedingungen bestehen in der Bauraumkonformität bei der Absenkung, als auch der gewünschten Bewegungsrichtung. Die Scheibe ist bei Absenkung in der Fahrzeugtüre kollisionsfrei und unter Berücksichtigung von Toleranzen an angrenzenden Bauteilen vorbeizubewegen. Kritische Stellen sind der Bereich zwischen Scheibe und Türschloss, Türbremse und dem Türinnenblech. Anforderungen der geometrischen Integration wirken auf die Flächenform, besonders hinsichtlich der Krümmung der Scheibenfläche. Stellhebel um die geforderten Bauraumvorgaben zu erfüllen bestehen in der Adaption der Krümmung der Scheibe und der Verschiebung der Scheibenfläche in X-Richtung während der Absenkung. Hierbei wird die Scheibe aus einer einfassenden Dichtungslinie herausbewegt und versetzt zur Flächenkante abgesenkt. Dies wird als Schrägabzug bezeichnet.

Weitere Randbedingungen stellen Fertigungsaspekte der Fensterheberkinematik dar, welche durch gewählte Produktionsverfahren beeinflusst werden. Die Kinematik ist unter gestellten Randbedingungen nicht nur ein Resultat der Scheibenform, sondern beeinflusst wechselseitig die Formfindung der Scheibe. Bei konventionellen Seitenscheiben wird aus fertigungstechnischen und Kostengründen eine möglichst einfache Form der Bewegung angestrebt. Dies sind beispielsweise Kreisbögen, welche durch Rollprofilformen hergestellt werden, oder Kurven höherer Ordnung, welche durch tiefgezogene Verfahren dargestellt werden können. Stand der Technik bei Hebersystemen bei Vordertüren ist die Bewegung der Scheibe auf zwei Bahnen und bei hinteren Türen auf einer Bahn. Bei Cabrios wird die Scheibenführung im Fond aufgrund der komplexeren Bewegung zumeist anhand einer tiefgezogenen Kulissenführung umgesetzt. Auf weitere Varianten von Hebersystemen (Armfensterheber, Rohrfensterheber, Seilfensterheber [78, S. 183]) wird im Rahmen des Optimierungsalgorithmus nicht vertiefend eingegangen.

Bei Hebersystemen, welche über zwei Führungsschienen verfügen, wird in aktuellen Fahrzeugen grundsätzlich ein zentraler Antrieb und ein umlaufender Bowdenzug verwendet. Dieser führt zu einer identen Geschwindigkeit auf den beiden Führungsbahnen und ist ein Aspekt, welcher in der Formfindung der Absenkbahnen und Scheibenfläche zu berücksichtigen ist. Sofern der zurückgelegte Weg der beiden Fensterheberanbindung pro Zeitschritt konstant ist, die Radien der Führungsbahnen sich jedoch unterscheiden, ergibt sich eine nicht gewünschte Änderung der Winkellage der Fensterheberanbindung zueinander. Diese Winkeländerung ist nur in einem definiertem Toleranzbereich zulässig und führt zur Forderung, dass die Radien der Führungsbahnen eine zulässige Differenz nicht überschreiten dürfen. Dieses Kriterium wird als Gleichlaufbedingung bezeichnet.

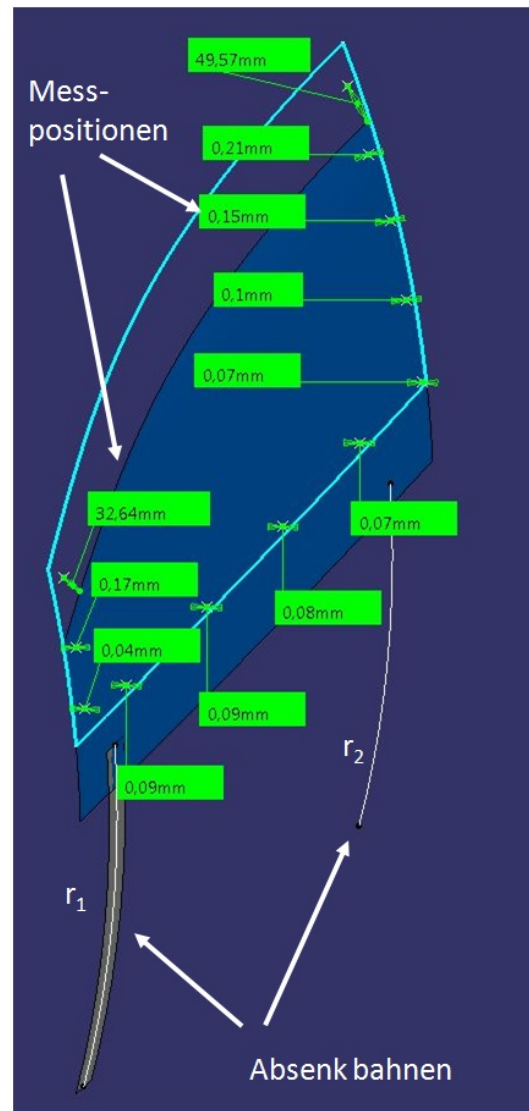


Abbildung 3.38: Messpunkte zur Detektion der Dichtungsdeformation einer allgemeinen Scheibenfläche

Verstärkt werden kann dieser Aspekt durch die Forderung einer kostengünstigen Gleichteilstrategie, welche versucht für beide Absenkbahnen dieselbe Führungsschiene zu verwenden ( $r_1 = r_2$ , siehe Abbildung 3.38). Die Fertigung der Absenkbahnen als Kreisgeometrie durch Rollprofilformen erfordert einen geringen Invest und wird aus Kostengründen, trotz Einschränkungen in der Bewegung, angestrebt. Alternativ können Tiefziehverfahren eingesetzt werden, welche größeren Freiraum in der räumlichen Bewegung ermöglichen, jedoch einen erhöhten Invest bedeuten. Weitere Elemente des Fensterhebersystems, wie Umlenkrollen oder der Antrieb, können standardisiert aus Baukastensystemen ergänzt werden.

Die Bewegung der Seitenscheibe führt zu unterschiedlichen Reibungskräften an den Dichtungen und somit zu keiner konstanten Kräfte- und Momentensituation.

Dies entsteht durch die sich ändernde Größe der Kontaktfläche zwischen Scheibe und Dichtungen in verschiedenen Positionen. Das Ziel der kräftebasierten Auslegung ist eine Anbindung, welche eine stabile Kipptendenz über den gesamten Weg zeigt. Bei labiler Änderung der Kipptendenz kann es aufgrund von Toleranzen in der Scheibenaufnahme zu akustischen Störgeräuschen kommen. Relevant ist dieses Kriterium für Einschienensysteme, da ein Kippen der Scheibe um die Y-Achse nicht durch einen zweiten Heber kompensiert werden kann. Die Lage der Anbindungspositionen ( $l_{FH}$ ) hat Einfluss auf das Kippverhalten und muss im Algorithmus im Rahmen der Gleichlaufbedingung berücksichtigt werden.

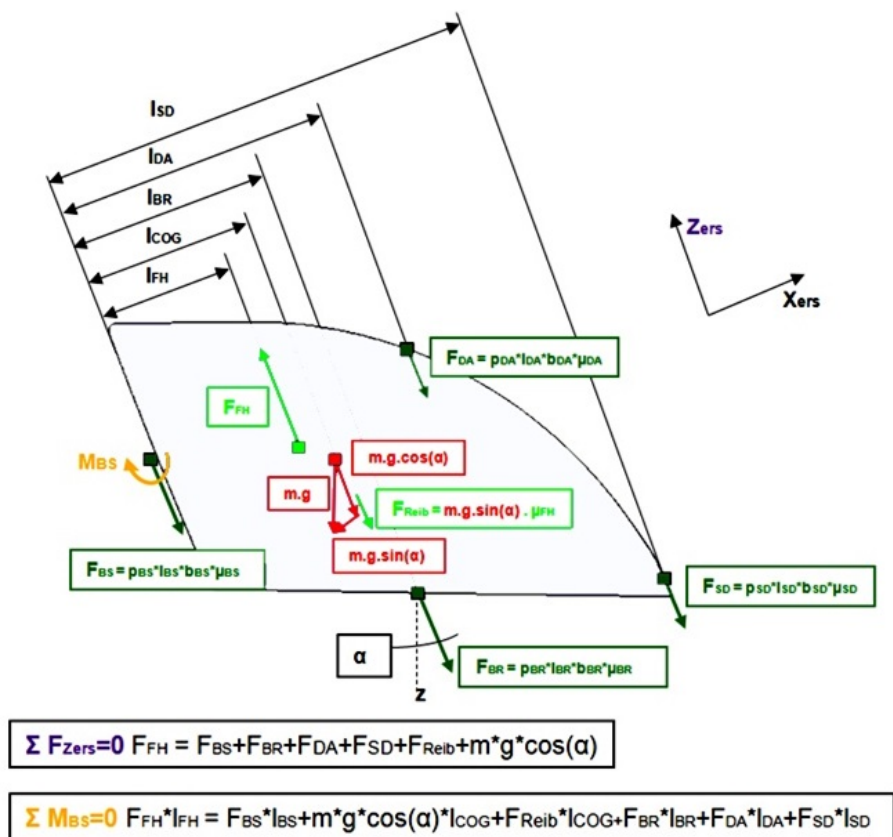


Abbildung 3.39: Zweidimensionale Darstellung der Kräfte- und Momentensituation an der Seitenscheibe

### Konzeption des funktionalen Optimierungsalgorithmus

Für die Konzeption eines Optimierungsverfahrens ist ein Systemverständnis erforderlich, welches die Einbeziehung aller Rahmenbedingungen und Anforderungen umfasst. Das Verfahren hat Kriterien der Formoptimierung hinsichtlich des vorgegebenen Stylings, der Dichtigkeit zwischen Scheibe und Dichtung, der Dichtungsdeformation als Eingangsparameter der Dichtungslebensdauer, dem Bauraumbedarf, sowie den Bewegungsrandbedingungen und der Kinetik einzubeziehen. Die einzelnen Faktoren sind in der Regel durch mehrfache Zielkonflikte geprägt. Aus diesem Grund ist eine Gewichtung der Faktoren zueinander ein weiterer Aspekt, welcher zu berücksichtigen ist. Der im folgenden vorgestellte Algorithmus ist ein mehrkriterielles Verfahren und zeigt Analogien zu genetischen Optimierungsalgorithmen [79, S. Y4]. Da das Verfahren auf geometrische Kriterien und Eingabegrößen aufbaut, und das Resultat wiederum geometrischer Natur ist, bietet sich eine Lösungsumsetzung im CAD-System an.

Der Algorithmus bedient sich Methoden der Parametrik, wissensbasierter Auslegung und automationsgestützter Methoden zur geometrischen Optimierung. Der geometrische Basiszusammenhang der Optimierung ist eine systematische Annäherung einer spezifizierten Zielgeometrie (Schraubfläche) an die Ausgangsfläche (Stylingfläche der Scheibe). Die Vorgangsweise wurde als iteratives Verfahren im CAD-System umgesetzt, wobei eine Schraubfläche aus der Brüstungskurve  $BR$  des Scheibenbeschnittes generiert wird. Während des iterativen Verfahrens wird eine generierte Schraubfläche systematisch bezüglich Form und Lage variiert und die Zielerfüllung fortlaufend geprüft. Die Formulierung der Zielerfüllung ist als Minimumproblem definiert und setzt sich aus den verschiedenen funktionalen Randbedingungen zusammen.

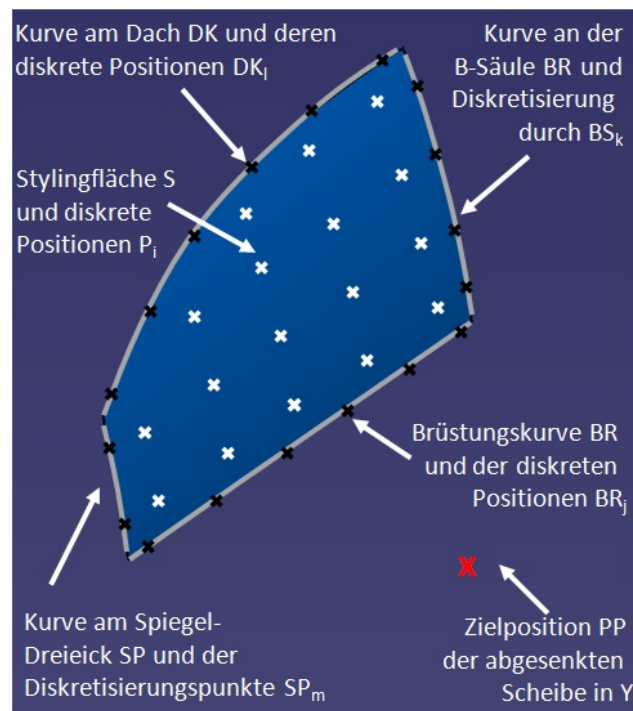


Abbildung 3.40: Geometrische Eingabegrößen der Seitenscheibenabsenkung und Ableitung der diskreten Positionen der Scheibenfläche  $P_i$  und der verschiedenen Randkurven

Das Kriterium des minimalen Abstandes von Stylingsscheibe und der zu erzeugenden Schraubfläche  $S$  kann im CAD-System CATIA V5 nicht als maximaler Flächenabstand automatisiert abgefragt werden. Aus diesem Grund wurde für den Algorithmus eine Diskretisierung der Stylingfläche durch eine repräsentative Anzahl von Punkten  $P_i$  vorgenommen, siehe Abbildung 3.40. Für jede Iteration wird die Summe der Abstände  $D_S$  der generierten Schraubfläche und den Diskretisierungspunkten ermittelt. Anhand des Faktors  $t$  kann die Relevanz der Stylingabweichung gewichtet werden.

$$D_S = \sum_1^i (\Delta P_i - S) \cdot t \quad (3.2)$$

Die Einbeziehung der Dichtungskurven wird analog zur Flächendiskretisierung vorgenommen. Die Kurven der Brüstung  $BR$ , der B-Säule  $BS$ , der Dachkurve  $DK$  und des Spiegeldreieckes  $SP$  sind für eine Seitenscheibe der Vordertür als Eingabeinformation verfügbar. Analog sind die Kurven der hinteren Seitenscheibe anwählbar. Die einzelnen Kurven werden durch Stützpunkte auf der Kurve  $BR_j$ ,  $BS_k$ ,  $DK_l$  und  $SP_m$  repräsentiert und der Summenabstand  $D_D$  zur Schraubfläche ermittelt. Jede Dichtungskurve kann durch die Faktoren  $u, v, w$  und  $x$  separat gewichtet werden. Die Summe der Abstände  $D_D$  der iterativen Schraubfläche geht wiederum in das Minimierungsverfahren ein.

$$D_D = \sum_1^j (\Delta BR_j - S) \cdot u + \sum_1^k (\Delta BS_k - S) \cdot v + \sum_1^l (\Delta DK_l - S) \cdot w + \sum_1^m (\Delta SP_m - S) \cdot x \quad (3.3)$$

Die kinematische Anforderung in Form der Gleichlaufbedingung wird ebenso über eine Differenzsumme gebildet. Hierbei werden die Führungsbahnen im Raum durch Kreisbögen approximiert und der absolute Betrag der Differenz der beiden Radien  $r_1$ , und  $r_2$ , siehe Abbildung 3.38, gebildet. Anhand des Gewichtungsfaktors  $y$  ist auch für diese Anforderung die Relevanz gegenüber anderen Faktoren einstellbar.

$$D_G = | r_1 - r_2 | \cdot y \quad (3.4)$$

Die gewünschte Positionen der abgesenkten Scheibe im Raum, besonders im Rahmen des Türpackages, wird durch den steuerbaren Positionierungspunkt  $PP$  umgesetzt. Auch dieser Abstand wird mit einer Gewichtung ( $z$ ) einbezogen. Die Lage der abgesenkten Position wird durch die Krümmung der Seitenscheibe um die X-Achse wesentlich beeinflusst. Anhand des Positionierungspunktes lässt sich indirekt die Krümmung der Seitenscheibe steuern, um eine bauraumkonforme Absenkbewegung zu erzielen.

$$D_P = | \Delta PP_n - S | \cdot z \quad (3.5)$$

Alle ermittelten Differenzsummenwerte ergeben addiert einen Bewertungsfaktor, welcher jede Iteration beschreibt. Gesucht wird nachfolgend das Minimum des Werts  $D$ . Die Umsetzung des Verfahrens setzt hierbei ein mögliches Optimum der Optimierung voraus.

$$D = D_S + D_D + D_G + D_P \tag{3.6}$$

Die Ermittlung einer optimal angenäherten Schraubfläche und Schraubbewegung erfolgt im vorliegenden Algorithmus implizit über die Variation der Richtung der Schraubachse und startet bei einer initialen Annahme der Richtung  $f_{start}$ , siehe Abbildung 3.43. Nach der ersten Vorgabe einer Richtung  $f_i = f_{start}$  werden auf der Kurve der B-Säule drei Ankerpunkte  $(a, b, c)$  im Verhältnis 0.16, 0.5 und 0.84 definiert. Diese werden auf eine Normalebene  $\varepsilon$  von  $r$  projiziert  $(a', b', c = c')$ . Aus

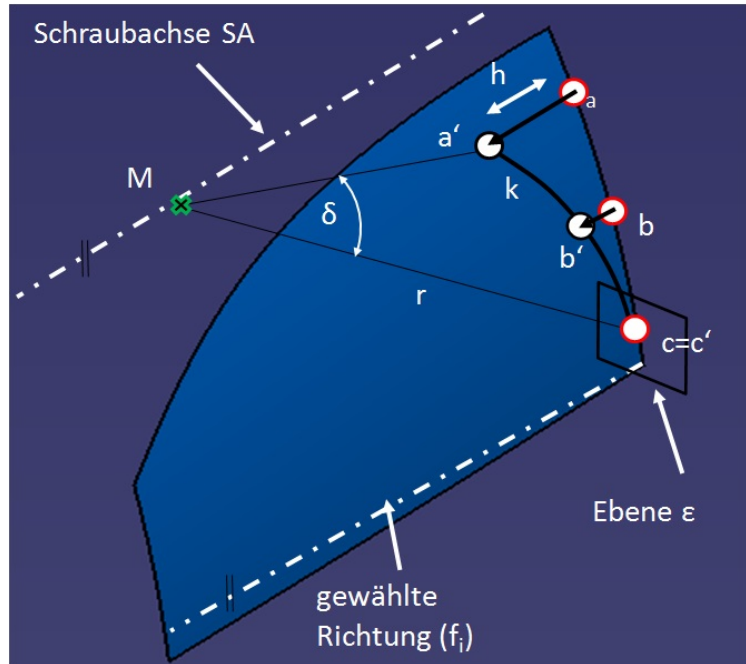


Abbildung 3.41: Ableitung der Schraubachse von einer gewählten Achsenrichtung und der Kurve an der B-Säule

den drei projizierten Punkten kann das Kreissegment  $k$  gebildet werden, welches Teil eines Schraubzylinders ist. Die Lage der Schraubachse  $SA$  kann im Raum durch den Mittelpunkt  $M$  des Kreissegments  $k$  und die Richtung  $r$  bestimmt werden. Über die Punkte  $a$  und  $c$  auf der B-Säule kann nachfolgend die Steigung  $s$  der Schraubung berechnet werden. Hierzu wird die Höhendifferenz  $h$  von  $a$  und  $a'$  entlang der Richtung  $f_i$  ermittelt. Zusätzlich wird der Winkel  $\delta$  zwischen  $c$  und  $a'$  in der Ebene  $\varepsilon$  gemessen. Die Berechnung der Steigung einer Schraublinie  $s = \frac{H}{2 \cdot \Pi \cdot r}$  lässt sich für das betrachtete Segment anpassen  $s = \frac{h \cdot \delta}{2 \cdot \Pi \cdot r}$ , wobei  $H$  die Ganghöhe der Schraublinie ist und  $r$  der Radius des Schraubzylinders für das Kreissegment  $k$ . Die Bewegung des Schrägabzuges kann hier durch eine Multiplikation größer 1 mit dem ermittelten Steigungsparameter eingebracht werden.

Durch den Punkt  $a$  kann somit die Schraublinie  $SL$  erzeugt werden. Anhand von  $SL$  wird die extrapolierte Brüstungskurve  $eBR$  zur iterativen Schraubfläche  $S$  verschraubt, welche zur Ermittlung des Bewertungsfaktors  $D$  dient. Die Brüstungskurve  $BR$  wurde aufgrund der qualitativ besseren  $c_1$  und  $c_2$  Stetigkeit im Vergleich zur Dachkurve in Stylingflächen gewählt. Für jede vorgegebene Richtung der Schraubachse wird die Schraubfläche  $S$  erzeugt und anhand von Messungen das Bewertungskriterium  $D$  ermittelt. Um eine systematische Variation der Schraubachsenrichtung zu erreichen, wurde ein kombiniertes Verfahren der Richtungsvariation angewendet, siehe Abbildung 3.43.

Die Adaption der Richtung orientiert sich fortlaufend am ermittelten Bewertungsfaktor  $D$ . Bei Start der Iteration, als auch bei einer Verschlechterung des Summenwertes, wird eine Adaption des Richtungsvektors über diskrete Positionen auf einem Richtungskegel geprüft (zirkuläre Variation). Sofern eine Verbesserung erzielbar ist, wird die Ausgangsrichtung und die neue Zielrichtung als lineare Verbesserung betrachtet und entlang dieser Richtung eine Adaption des Richtungsvektors vorgenommen, bis  $D$  wieder ansteigt (lineare Variation). Sofern anhand der zirkulären, als auch linearen Variation, keine Verbesserung erzielt werden kann, wird die Diskretisierung erhöht als auch der Radius des zirkulären Iteration verringert.

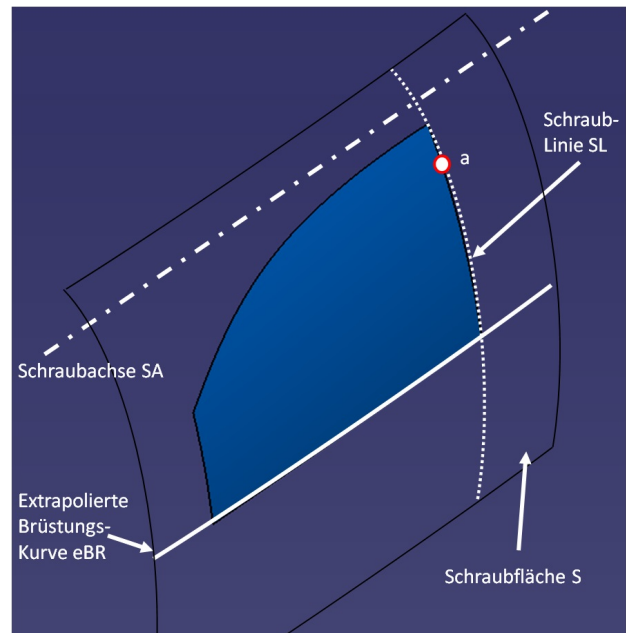


Abbildung 3.42: Erzeugung einer Schraubfläche  $S$  anhand der extrapolierten Brüstungskurve  $eBR$  und der Schraublinie  $SL$

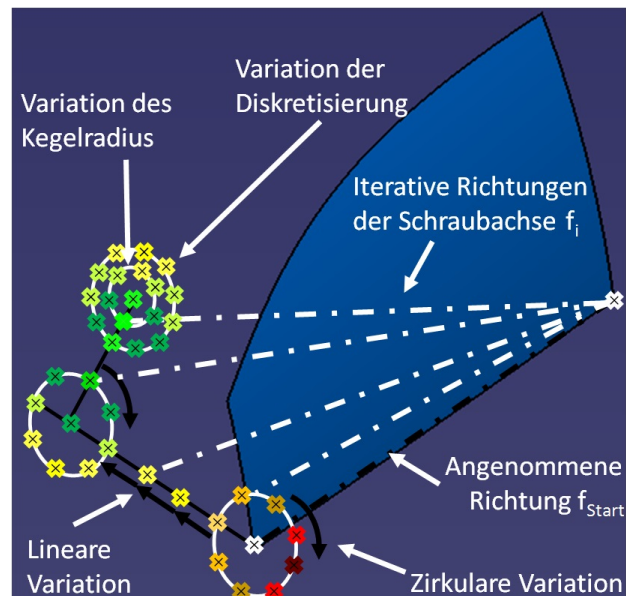


Abbildung 3.43: Systematische Variation der Richtung der Schraubachse unter Einbeziehung des ermittelten Bewertungskriteriums  $D$  (Visualisierung der Farben: hoher Wert  $D$ : rot, geringer Wert: grün)

Sofern eine Reduktion des Kegelradius nach dreimaliger Wiederholung zu keiner Verbesserung führt, wird angenommen, ein Optimum gefunden zu haben. Anhand der final ermittelten Schraubachse und Steigung, kann die Erstellung der Kinematik, und somit der Absenkbahnen als Schraublinien, vorgenommen werden. Die finale Scheibenfläche wird jedoch nicht von der erstellten Schraubfläche abgeleitet. Die optimale Erzeugende ist aus der gesamten Stylingfläche abzuleiten. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Verfahren zur Ermittlung einer optimierten Brüstungskurve  $BR_{opt}$  erarbeitet. Auf die konkrete Umsetzung dieses Mittelungsverfahrens wird im Rahmen der Arbeit jedoch nicht genauer eingegangen. Nachfolgend wird  $BR_{opt}$  entlang der Schraublinie  $SL$  verschraubt und ergibt eine optimal angenäherte Trägerfläche. An der Dach- und Brüstungskurve werden extrapolierte Beschnittflächen normal zur Trägerfläche erzeugt und die Trägerfläche beschnitten. Im Bereich der A- und B-Säule werden die Beschnittflächen von Schraublinien an den Randkurven extrapoliert und ergeben somit die finale Form der idealen Scheibe.

Zur Qualitätsüberprüfung kann der maximale Abstand von abgesenkten Scheibenpositionen mit der Trägerfläche geprüft werden. Der Abstand sollte bei der Verwendung von Schraublinien als Absenkbahnen den Wert Null nicht überschreiten. Die Erfüllung dieses Kriteriums kann auch visuell durch die schattierte Abbildung der übereinanderliegenden Flächen geprüft werden, siehe Abbildung 3.44. Sofern die Schraublinien der Absenkbahnen durch kostengünstigere Kreisbögen approximiert werden, kann es bei der Absenkbewegung zu geringfügigen Abweichungen kommen.

Für das entwickelte Verfahren ist ein Einfluss der Startrichtung auf die Konvergenzgeschwindigkeit und die gefundenen Optima zu beobachten. Mehrfache Analysen haben gezeigt, dass eine initiale Richtung entlang der Sehne der Brüstungskurve eine beschleunigte Konvergenz im Vergleich zu anderen Richtungen, beispielsweise die X-Richtung, ermöglicht. Die mathematisch-geometrische Beschreibung des Optimierungsverfahrens ist im Anhang in Kapitel 4.2 ausführlicher beschrieben.

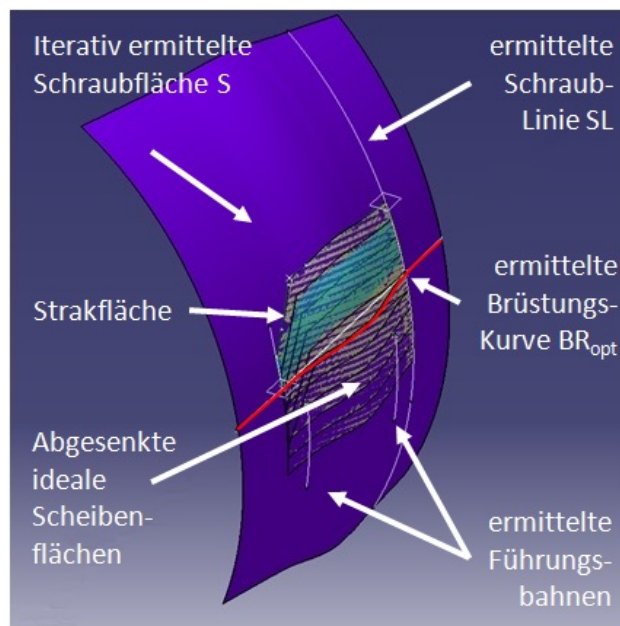


Abbildung 3.44: Darstellung der Eingabefläche (Strak) und der ermittelten Geometrien des Algorithmus



### **Vergleich zu bestehenden Vorgangsweisen und Zusammenfassung**

Anhand der vorgestellten Lösung kann die Leistungsfähigkeit eines im CAD-System integrierten, mehrkriteriellen, iterativen Optimierungsalgorithmus demonstriert werden. Der mögliche Lösungsraum kann anhand von programmgestützten, wissensbasierten Auslegungsmethoden effektiv genutzt werden, um qualitativ verbesserte funktionale Lösungen unter reduziertem Ressourceneinsatz zu generieren. Die Performance der Lösungsfindung von Optimierungsmethoden in CAD-Systemen zeigt Einschränkungen in der Handhabung von großen Datenmengen. Neben dem erforderlichen Zeitaufwand in der Lösungsgenerierung spielen Ressourcengrenzen des CAD-Systems eine Rolle. In der Konzeption sind diese Randbedingungen zu beachten, um Lösungen zu gestalten, welche im Rahmen von CAD-Infrastrukturen abgebildet werden können. Trotz der beschränkten Leistungsfähigkeit von CAD-Optimierungsmethoden kann eine deutliche Reduktion des Arbeitsaufwandes im Vergleich zur manuellen Durchführung von Prozessschritten erreicht werden. Die Gültigkeit der systemgestützten Auslegung ist durch den Bauteilverantwortlichen zu prüfen und gegebenenfalls zu bestätigen. Die fortlaufende Validierung von wissensbasierten Auslegungsmethoden ist als Mehrwert anzusehen, da Ergebnisse reproduzierbar nach einer geprüften Vorgangsweise ermittelt werden, und einer fortlaufenden Verifikation unterliegen.

Das umgesetzte Lösungsbeispiel zeigt eine systemgestützte funktionale Formfindung von PKW-Seitenscheiben unter der Einbeziehung von mehrkriteriellen Anforderungen. Diese sind Flächenform, Minimalabweichung zur Ausgangsfläche, Bauraumrandbedingungen, Zielposition in abgesenkter Lage und kinematische Aspekte. Das Resultat der Optimierung sind Parameter einer Schraublinie und dessen Lage im Raum, sowie eine ermittelte angenäherte erzeugende Kurve, welche zu einer Schraubfläche kombiniert werden kann. Die Umsetzung des Algorithmus in der CAD-Produktumgebung ermöglicht die explizite Nutzung von vorliegenden Eingabeinformationen (Strak) im CAD, direkte Definition der Bauraumrandbedingungen und eine integrierte Visualisierung von funktional optimierten Lösungsvorschlägen. Anhand der Steuerung von Gewichtungsfaktoren kann der Entwickler verschiedene Lösungsvarianten generieren und bewerten. Durch die frühzeitige Bewertung von Stylingvorgaben ('Front-Loading') und das Rückspielen von funktionalen Scheibenformen wird eine kurze Durchlaufzeit und hohe Reife im Styling-Technik-Konvergenzprozess erreicht, und sekundäre Änderungen im Entwicklungsprozess werden reduziert. Insbesondere der Vergleich verschiedener Stylingvarianten verdeutlicht die beschleunigten Reaktionszeiten zwischen Stylingfindung und Bauteilauslegung.

Das erarbeitete Lösungskonzept ist primär mit konventionellen Auslegungsprozessen zu vergleichen. Aktuelle Auslegungsschritte zur Bewertung der Scheibenfläche und Auslegung der Fensterheberkinematik finden bisher anhand von Analyseschnitten und manuellen Näherungsverfahren statt. Die Bewegung der Scheibe wird durch nicht exakt definierte Verschiebungs- und Rotationsbewegungen im Raum vorgenommen, wobei die Strakfläche als Referenz für die Bewegungskurven dient. Zu beachten ist, dass es hierbei vorkommen kann, dass die Strakfläche den geforderten Formkriterien nicht entspricht und somit die Absenkung prinzipiell nicht machbar ist. Der Vorschlag einer technisch machbaren Scheibenfläche geht aus manuellen Untersuchungen nicht direkt hervor und erfordert zusätzliche Aufbereitungsschritte zur Darstellung von erforderlichen Änderungen.

Eine Adaption der Form der Strakfläche wird zumeist erst durch den Beweis der Nichterfüllung von Anforderungen vorgenommen. Diese Analyse- und Aufbereitungsphase wirkt sich auf die Agilität des Styling-Technik-Konvergenzprozesses aus. Die nicht exakt definierte und geprüfte Vorgangsweisen in der manuellen Auslegung verringern in diesem Prozess die Argumentationsmöglichkeiten in der Einforderung von Änderungen. Klare und belastbare Vorgangsweisen können den Bauteilverantwortlichen hier zusätzlich im Entwicklungsprozess unterstützen.

Im Vergleich zu strukturierten und publizierten Auslegungsmethoden, beispielsweise eines mathematischen Minimumverfahrens im R5 [74],[88], [98, S. 235], bestehen spezifische Unterschiede. Eine grundsätzliche Differenz besteht im Einsatz eines im CAD implementierten Minimumverfahrens, welches auf geometrisch ermittelte Abweichung aufbaut, anstatt von mathematischen Verfahren in einer zusätzlichen Applikation (MATLAB). Der Entwickler hat hierbei über das CAD-System, Schnittstellenformate und weitere Anwendungen die Lösung zu generieren und in das CAD-System zurückzuführen. Ergebnisse der mathematischen Auslegung bestehen in den ermittelten Parametern der Schraublinie. Hieraus kann die Bewegung (Absenkung) der Strakfläche vorgenommen werden. Die Generierung einer optimal angenäherten idealen Schraubfläche geht aus dem publizierten Verfahren nicht hervor. Weitere Faktoren, wie die Einbeziehung von Bauraumrandbedingungen, sowie der direkte Abgleich des Ergebnisses im Produktmodell, werden durch das mathematische Verfahren nicht abgedeckt. Die Berücksichtigung dieser Punkte kann anhand eines CAD-Systems effektiv vorgenommen werden, sodass die Darstellung als CAD-integrierte Lösung aus Sicht des gesamten Entwicklungsprozesses deutliche Vorteile zeigt.

### 3.2.4 Fortführender Ansatz einer Multi-CAD-Automation

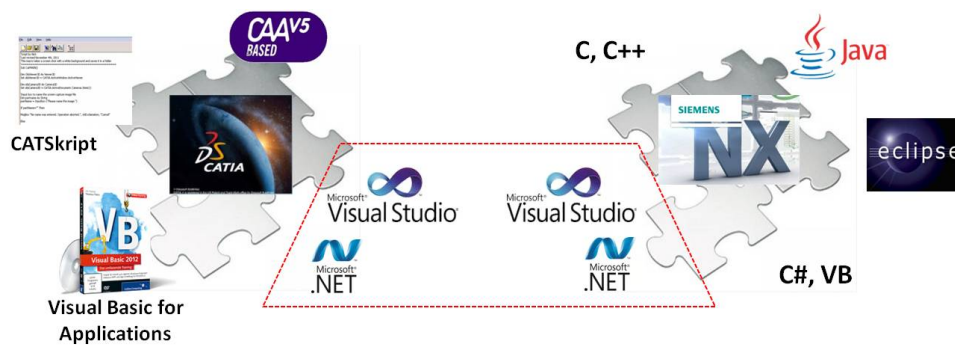


Abbildung 3.45: Automationsschnittstellen unterschiedlicher CAD-Systeme innerhalb einer einheitlichen CAD-Automationsinfrastruktur

Durch eine CAD-System-unabhängige Konzeption von Methoden kann ein Einsatz in unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen ermöglicht werden. Dies ist insbesondere für Zulieferbetriebe, welche für unterschiedliche Kunden Dienstleistungen anbieten, von Interesse. Durch eine CAD-systemübergreifende Konzeptionsmethodik wird eine weitere Ebene der Funktionsabstraktion erreicht, um unabhängig von spezifischen CAD-Funktionsumfängen und Rahmenbedingungen Lösungen zu gestalten. Kern der Tätigkeit ist die konsequente Kapselung von Funktionsmodulen, welche in einer allgemeinen Softwareinfrastruktur aufgebaut werden. Zur Versorgung verschiedener CAD-Systeme ist eine Konzeption auf Basis des Betriebssystems notwendig, welche auf die Funktionsbibliotheken der jeweiligen CAD-Systeme zugreifen kann [109, S. 401].

Im Kern des Konzeptes steht die gekapselte Realisierung funktionaler Zusammenhänge als abgeschlossene Kernmodule, welche über Schnittstellen von unterschiedlichen CAD-Systemen bedatet werden können. Die Kapselung der Module kann durch eine objektorientierte Vorgangsweise und dezidierte Definition von Eingabe- und Ausgabewerten dargestellt werden. Dies erfordert den Aufbau einer Lösungsmethode für eine technische Fragestellung ohne CAD-System und die Gestaltung von Informationsschnittstellen. In der Softwareentwicklung kann dies ebenfalls durch Funktionsbibliotheken für verschiedene CAD-Systeme umgesetzt werden. Vorteile ergeben sich aus der zentralen Pflege von Kernalgorithmen und einem durchgängigen Einsatz von Entwicklungsmethoden. Grenzen für eine übergeordnete Konzeption zeigen sich in der Verfügbarkeit von äquivalenten Basisfunktionalitäten unterschiedlicher CAD-Systeme. Die Anforderungen bestehen in der Kompatibilität von funktionalen CAD-neutralen Lösungsbausteinen und der CAD-Schnittstelleninfrastruktur, um Informationen aus dem CAD-System zu extrahieren und finale Resultate wieder zu integrieren.

## 3.3 Rahmenkonzept zur Gestaltung von wissensbasierten CAD-Methoden

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Rahmenkonzept umgesetzt, welches die systematische und zielgerichtete Bearbeitung von wissensbasierten Lösungsansätzen in der Konstruktion unterstützen soll. Besonders die Auswahl zwischen wissensbasierten Konstruktionsmodellen und programmgestützten Methoden erfordert zusätzliche Bearbeitungsschritte. Ergänzend zur methodischen Realisierung von Werkzeugen spielen die Lösungsspezifikation, die Erhebung von Rahmenbedingungen in den Entwicklungslandschaften, als auch notwendige Prozessschritte der Implementierung und Wartung eine wesentliche Rolle. Der gesamtheitliche Prozess von der Potentialanalyse bis hin zur Wartung von wissensbasierten Lösungen in der Konstruktion ist in Abbildung 3.46 dargestellt. In den folgenden Kapiteln wird auf die Spezifikation, Methodenentwicklung sowie Implementierung eingegangen.

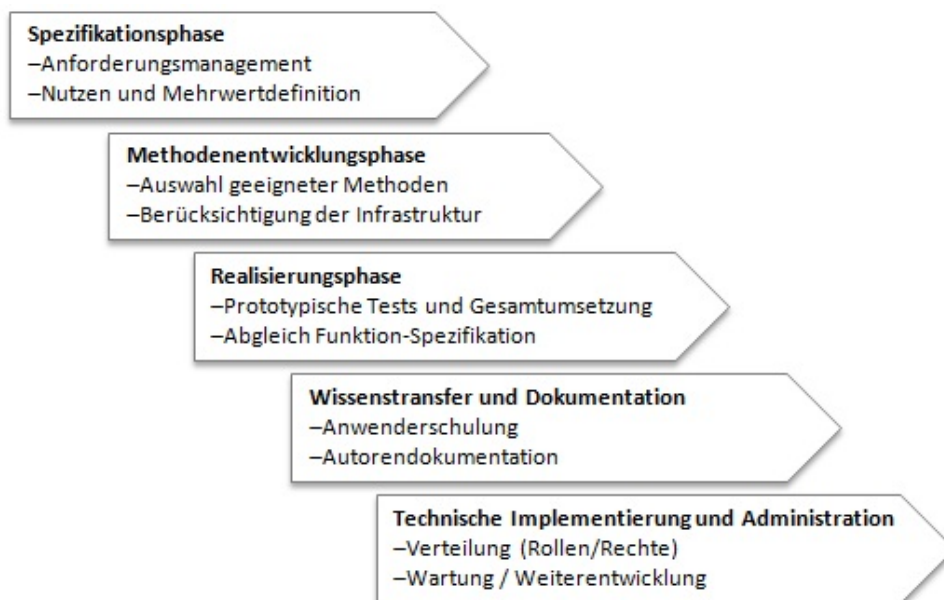


Abbildung 3.46: Exemplarischer Ablauf zur Erstellung von wissensbasierten Lösungen

Die Erfolgsfaktoren zur Umsetzung von wissensbasierten Lösungsmethoden sind:

- Eindeutige und vollständige funktionale Spezifikation
- Mehrwert zu bestehenden Lösungsmethoden
- Theoretisch verfügbarer Lösungsraum
- Transparenz in der Umsetzung und Rückkoppelung zur Spezifikation
- Anwenderakzeptanz und klares Rollenbild der Anwenderverantwortung
- Berücksichtigung von Anforderungen zur Wartung und Weiterentwicklung

Im Vergleich zu ähnlichen Entwicklungsprozessen, beispielsweise zur konventionelle Softwareentwicklung, unterliegt die Umsetzung von konstruktionsnahen Lösungen spezifischen Anforderungen. Darunter zählen funktionale Aspekte des Produktes Automobil, zugrundeliegende Entwicklungsprozesse und Entwicklungsumgebungen, sowie eine hohe Granularität von einzelnen Themen. Erarbeitete Lösungen können aus Konstruktionsmethoden im Produktmodell, erarbeiteten Softwareprodukten und der kombinatorischen Interaktion der beiden Methoden bestehen. Ein besonderer Aspekt ist die Rolle des Ingenieurs [60, S. 9], welcher als Nutzer, Spezifikateur und als Entwickler von Informationstechnologien in Erscheinung treten kann.

Die Gestaltung von wissensbasierten Lösungen findet zumeist in multidisziplinären Teams statt. Teil dieser Entwicklungsmannschaften sind Anwender aus der Produktentwicklung zur Spezifikation, Methodiker zu Konzeption, sowie Softwareentwickler sofern programmierte Lösungen umgesetzt werden. Oftmals kommt es auch zu einer Bearbeitung in Personalunion, sodass beispielsweise Methodiker gleichzeitig die Umsetzung übernehmen. Auch bei der Realisierung von Lösungen in Personalunion sind weitere Anwender und Experten in die Konzeption einzubeziehen, um allgemeingültige Lösungen zu generieren. Unterschiedliche Sichtweisen bezüglich der Leistungsfähigkeit einer Lösung sind zusammenzufassen und auf eine allgemeine Lösungsbeschreibung [177, S. 71] überzuführen.

### **3.3.1 Spezifikation von wissensbasierten Methoden**

#### **Analyse von bestehenden Lösungsmethoden und mögliche Potentiale**

Ausgangspunkt einer Konzeption sind die Darstellung der Ist-Situation, Analyse der Problemstellung und die Definition der gewünschten Zielsituation. Die Darstellung der Ist-Situation beinhaltet aktuelle Entwicklungsabläufe, eingesetzte Methoden, verfügbare Infrastruktur und Ressourcen, sowie Randbedingungen des Entwicklungsprozesses. Eine systematische Analyse von Anforderungen wurde bereits im Kapitel für wissensbasierte Konstruktionsmodelle 3.1.2 vorgestellt. Diese beinhaltet bereits wesentliche Randpunkte und kann für die generelle Konzeption von wissensbasierten Lösungen weiterverwendet werden. Zur Ableitung einer Verbesserung sind die erforderliche Leistungsfähigkeit, das gewünschte Arbeitsmodell, sowie dessen Einbettung in bestehende Prozesse und Verantwortlichkeiten in der Anwendung zu beschreiben. Die Definition der Anforderungen dient als Basis zur späteren Auswahl von einsetzbaren Methoden in der Konzeptionsphase. Ein wesentlicher Punkt in der Spezifikationsphase ist eine neutrale Problembetrachtung, wobei mögliche Lösungsmethoden im Spezifikationsprozess nicht berücksichtigt werden sollten.

Das Anforderungsmanagement für wissensbasierte Lösungen ist situativ einzusetzen. Die Charakteristika zweier Lösungskonzepte, welche auf unterschiedliche Weise zu spezifizieren sind, werden nachfolgend kurz dargestellt.

#### **Integratives Anforderungsmanagement für interoperable Konzepte**

Für Lösungen, welche Auslegungsschritte über verschiedene Arbeitsbereiche und Entwicklungssysteme abbilden müssen, sind gesamtheitlich konzipierte Spezifikationsprozesse erforderlich. Zur Umsetzung dieser Anforderungen kann ein integratives Anforderungsmanagement, welches unterschiedliche funktionale Zieldefinitionen und prozessbedingte Sichtweisen berücksichtigt und gewichtet, zum Einsatz kommen. In der Lösungskonzeption ist auf den übergreifenden Nutzen von Werkzeugen zu achten. Eine Verlagerung von Tätigkeiten zwischen verschiedenen Entwicklungsbereichen stellt hierbei einen kritischen Umstand dar, welcher durch neue übergreifend eingesetzte Entwicklungswerkzeuge eintreten kann. Die Darstellung eines übergeordneten Nutzens einer neuen Methode unabhängig von Verantwortlichkeiten kann hier den erforderlichen Freiraum in der Konzeption schaffen. Übergreifend konzipierte Lösungen zeigen oftmals eine geringere Anwenderakzeptanz als Werkzeuge, welche durch Anwender initiiert werden. In der Lösungsumsetzung sind daher die Beteiligten aus allen Themenbereichen fortlaufend einzubeziehen, um in der Umsetzung eine bestmögliche Anwendungsakzeptanz zu erreichen.

#### **Objektiviertes Anforderungsmanagement für gekapselte Konzepte**

Konzepte für spezifische und in sich abgeschlossene Fragestellungen zeigen eine geringe Wechselwirkung mit weiteren funktionalen Disziplinen und Systemen der Entwicklungslandschaft. Für die Lösungsgestaltung dieser Methoden ist ein Anforderungsmanagement erforderlich, welches die Überführung einer spezifischen Problemdefinition in ein allgemeingültiges und in die Entwicklungslandschaft integrierbares Konzept ermöglicht. Dies ist erforderlich, um Lösungen langfristig und unabhängig von der Tätigkeit der Initiatoren in die Entwicklungslandschaft zu verankern. Die Spezifikation kann anhand von Anwendern und Fachexperten vorgenommen werden. Die erhobenen Anforderungen und Zielvorstellungen sind durch weitere Anwender, Fachliteratur und Publikationen auf eine breitere Basis zu stellen. Erfahrungen zeigen, dass Lösungen welche durch Schlüsselanwender in einer Arbeitsgruppe erarbeitet werden, die Gefahr einer unzureichenden Dokumentation, Verteilung und Integration in gesamtheitliche Prozesse bergen. Die Ausrollung der Werkzeuge hat daher nachfolgend einem standardisierten Prozess zu unterliegen, welcher Teil einer systematischen Sammlung und Dokumentation von Methoden ist.

### 3.3.2 Methodenentwicklung und Auswahl geeigneter Ansätze

Die Vielzahl von Möglichkeiten in der Konstruktion erfordern eine ganzheitliche Betrachtung von Lösungsansätzen und eine übergreifende Methodik. In der Konzeption von wissensbasierten Lösungen ist die erhobene Spezifikation im Kontext weiterer Faktoren zu betrachten, siehe Abbildung 3.47. Von den Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt lassen sich funktionale Zielwerte ableiten. Das Anforderungsmanagement, die Produktfunktionalität und zugrundeliegende Entwicklungsprozesse können einer jeweiligen Verantwortlichkeit zugeordnet werden. Der Prozess, welcher zur Erarbeitung einer funktionalen Auslegung angewendet wird, hängt wiederum von verfügbaren Methoden und der Infrastruktur ab. Die einsetzbaren Methoden werden von der Funktion, dem Auslegungsprozess und der verfügbaren Infrastruktur beeinflusst. Ergänzend sind Anforderungen an die Anwendung der Methoden zu berücksichtigen.

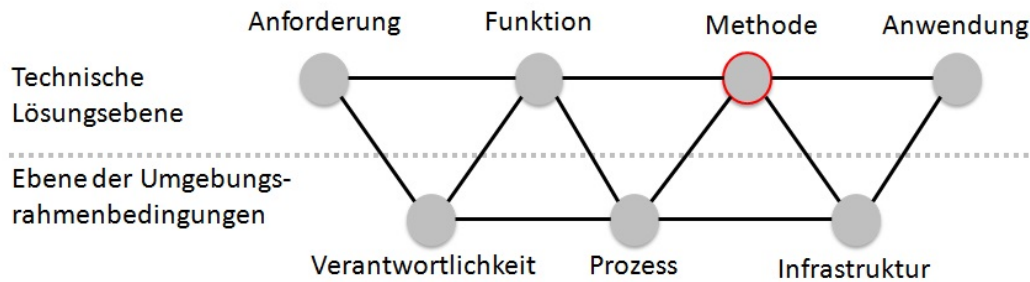


Abbildung 3.47: Einflussgrößen und Wechselwirkungen in der Konzeption von Methoden

Die technische Ebene von Anforderung zu Anwendung ist Kern der technisch methodischen Konzeption, wobei aus gesamtheitlicher Entwicklungssicht die Ebene der Rahmenbedingungen als Grundlage einzubeziehen ist, um eine erfolgreiche Umsetzung zu ermöglichen. Die verfügbare Infrastruktur stellt eine nur bedingt änderbare Grundlage dar. Der eingesetzte Entwicklungsprozess, als auch die festgelegten Verantwortungen, sind ebenfalls als Rahmenbedingung anzusehen, welche jedoch durch neue Entwicklungsmethoden angepasst werden können. Anforderungen als auch Funktion werden generell als variable, jedoch systematisch ähnliche Fragestellungen angenommen.

Wesentlicher Teil des vorgestellten Rahmenkonzeptes ist die systematische Bewertung von verfügbaren Methoden in der Konstruktion. Hier sind die zwei Typen der wissensbasierten Konstruktions- und Automationsmethoden in Bezug auf Funktionalität, sowie ihre Vor- und Nachteile hervorzuheben und zu analysieren. Zur fundierten Betrachtung verschiedener Lösungsansätze werden die umgesetzten Anwendungsbeispiele der Kapitel 3.1 und 3.2 herangezogen und optimale Einsatzgebiete abgeleitet. Erweitern lässt sich die Analyse durch die Kombination beider Ansätze und einer Abschätzung des realisierbaren Potentials.

CAD-Systeme beinhalten eine Vielzahl von Funktionen, welche zur Gestaltung von Bauteilen für unterschiedliche Branchen anwendbar sind. Zur Bearbeitung von spezifischen Fragestellungen sind die generellen Funktionen eines CAD-Systems in definierter Abfolge zu kombinieren. Dazu zählen beispielsweise wissensbasierte Module und Modelle, Automationswerkzeuge, Auslegungsalgorithmen und geometrische Optimierungsmethoden, sowie Standardisierungsrichtlinien und definierte Vorgangsweisen. Die vorgestellten Anwendungsbeispiele zeigen oftmals eine mehrfache Ausprägung und Kombination von einzelnen Methoden und leiten die Notwendigkeit von übergeordneten Vorgangsweisen ab. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit durch die Erweiterung der VDI Richtlinie 2209 umgesetzt, siehe Kapitel 3. In den folgenden Kapiteln werden die Charakteristika von konstruktiven Lösungsmethoden und spezifischen Erweiterungen durch programmgestützte Werkzeugen in Bezug auf unterschiedliche Kriterien gegenübergestellt. Die Beurteilung der Methoden kann nach Erlenspiel [57, S. 347] anhand folgender Kriterien erfolgen:

- Leistung der Methode
  1. Zweck
  2. Gültigkeitsbereich
  3. Eingangsinformation
  4. Ausgangsinformation
  5. Genauigkeit
- Anwendbarkeit
  1. Eingangsinformation vorhanden
  2. einfach zu erreichen
- Verfügbare Zeit, Kosten
  1. Zeit zum Lernen der Methode
  2. schnellere Methoden am Markt
- Betriebliche Eignung
  1. Im Unternehmen bekannt
  2. Einzel- oder Gruppenarbeit
- Persönliche Voraussetzungen:
  1. Persönliche Eignung der Anwender
- Verfügbare Hilfsmittel
  1. Was ist notwendig zum Einsatz der Methode



### **Charakteristika konstruktiver Methoden**

Konstruktionsmethoden werden genutzt, um konzeptionelle als auch detaillierte Produktmodelle zu erstellen, beliebig zu strukturieren und zu modifizieren. Durch zusätzliche Funktionen kann Wissen in Bibliotheken [98, S. 366] geschützt abgelegt werden. Anhand des breiten Funktionsspektrums kann auf individuelle Projektanforderungen reagiert werden, im Insbesondere für die zeitnahe Darstellung neuer technischer Konzepte. Umfassende Bearbeitungsmöglichkeiten ermöglichen zudem eine individuelle Fehlerbearbeitung. CAD-Systeme beherrschen hier die Plausibilisierung von objektbasierten Eigenschaften, welche direkt im geometrischen Modell bearbeitet werden können.

Nachteile von wissensbasierten Konstruktionsmodellen bestehen im hohen Aufwand, hinterlegtes Wissen zu schützen, zentral zu verteilen und weiterzuentwickeln. Die Hinterlegung von Wissen wird in Form von logischen und physikalischen Abhängigkeiten vorgenommen. Die Komplexität des Modelles nimmt hierbei rasch Größenordnungen an, welche nicht einfach zu beherrschen und zu dokumentieren sind. Der Schutz des geistigen Eigentums in CAD-Modellen ist nur durch zusätzliche Maßnahmen und erweiterter Funktionspakete von Autorensystemen umsetzbar. Die Möglichkeit der Revisionierung von CAD-Bibliotheken wird unterstützt, Änderungen von Wissensvorlagen können jedoch erheblichen manuellen Aufwand zur Nachbearbeitung bereits eingesetzter Modelle nach sich ziehen. Das hinterlegte Wissen in CAD-Modellen ist nicht zwingend einheitlich strukturiert, da Entwickler individuelle Modelle und Vorlagen erstellen können.

### **Charakteristika programmgestützter Methoden**

Wesentliche Vorteile von programmgestützten Methoden bestehen in der performanten und reproduzierbaren Abarbeitung von technischen Fragestellungen und der kopiergeschützten Kapselung von Wissen. Verfügbares Wissen der Auslegung wird aufbereitet und vom Autorensystem in eine skriptbasierte Methode übergeführt. Damit verbunden ist die Möglichkeit einer systematischen Wissensaufbereitung. Die Leitungsfähigkeit von softwaregestützten Methoden basiert auf der Abarbeitung von definierten Arbeitsschritten und deren Interpretation im Maschinencode. Hierbei ist es möglich verschiedene Konditionen anhand strukturierter Verzweigungen in Prozeduren (If-Then-Else, Select Case, Do-Until...) zu berücksichtigen und einen erweiterten Lösungsraum durch iterative Verfahren darzustellen. Die Beherrschung der Komplexität kann in diesen Werkzeugen durch spezifische Konzepte, beispielsweise objektorientierte Programmierung [79, S. Y7] und Vererbung, unterstützt werden. Softwaregestützte Werkzeuge zeigen Stärken in der zentralen Pflege und agilen Weiterentwicklung einer Anwendung nach der initialen Verteilung.

Nachteilig erweisen sich bei der Gestaltung von softwaregestützten Werkzeugen der erhöhte Aufwand, konstruktives Wissen in Prozeduren überzuführen und die Erfordernis von interdisziplinären Entwicklungsteams. Die Flexibilität zur Adaption auf bestimmte Projektanforderungen ist durch die hinterlegten Konfigurationseinstellungen beschränkt und kann bei neuen Anforderungen eine Programmänderung erfordern. Hieraus resultieren verlängerte Entwicklungszyklen, um Softwareumfänge zu erstellen, zu erweitern und Fehler zu korrigieren. Die automatisierte Geometrieerstellung kann als überlagerte Ebene der geometrischen Steuerung beschrieben werden. Durch programminterne Routinen werden Funktionen und Zusammenhänge bearbeitet, welche durch den Anwender nicht direkt nachvollziehbar sind. Dies kann das Vertrauen in die erarbeiteten Funktionen beeinträchtigen. Zur stabilen Bearbeitung von unterschiedlichen Eingaben ist eine programminterne Fehlerbehebungslogik erforderlich, welche auf nicht plausible Eingabeinformation reagieren kann. Der Lösungsraum einzelner Operationen und dessen Abhängigkeiten sind in der Programmlogik zu implementieren. Aus einer Vielzahl von Eingaben entsteht in automatisierten Werkzeugen ein erhöhter Aufwand zur Absicherung verschiedener Kombinationen von Eingabewerten und Fehlerkombinationen. Im Vergleich zu konstruktiven Modellen sind Modellvarianten und Vorlagen in programmierten Methoden mit deutlich erhöhtem Aufwand zu überprüfen und zu verwalten. Die Wartung von programmiert erstellten Modellvarianten und deren Werkzeugen ist aufwändig, da jede Änderung in Routinen für alle Varianten geprüft werden muss.

#### **Gegenüberstellung von konstruktiven und programmgestützten Methoden**

Grundsätzlich zeigen programmgestützte Methoden bei wiederkehrenden Arbeitsschritten und standardisierten Routinen Vorteile. Diese sind besonders in einer frühen Auslegungsphase mit geringerer Granularität und Detaillierung von Vorteil. Eine abstrahierte Bearbeitung und Speicherung von Wissen, sowie standardisierte Prozesse zum Revisionsmanagement und zur Verteilung können durch programmgestützte Methoden besonders effektiv bewerkstelligt werden. In der projektspezifischen Detaillierung und Steuerung des finalen Produktmodelles sowie in der Ableitung von wissensbasierten Startmodellen sind konstruktive Methoden besonders geeignet. Die einfache Erweiterung und direkte Korrektur von geometrischen Fehlern im Modell, ohne die Notwendigkeit eines Softwarerevisionszyklus, sprechen für die Nutzung von konstruktiven Methoden in der wissensbasierten BauteilAuslegung. Die Bewertung von Konstruktionsmethoden und programmgestützten Methoden zeigt spezifische Vor- und Nachteile, siehe Tabelle 3.4. Ein systematischer Einsatz von unterschiedlichen wissensbasierten Methoden ermöglicht es, effiziente und abgestimmte Entwicklungsumgebungen zu konzipieren.

Tabelle 3.4: Vergleich von konstruktiven und skriptbasierten Methoden

Methode	konstruktiv	skriptbasiert
Lösungsmanifest	- detailliertes CAD-Modell - finale Repräsentation	- in der Regel vereinfachte Geometrie
Lösungsspektrum	- CAD-Funktionsumfang	- entsprechend der Skriptfunktionalität
geeignete Lösungsmethoden	- analytisch - geometrisch - relational	- analytisch - geometrisch - relational - iterativ
Steuerung von Abhängigkeiten	durch CAD-Objekte - Assoziativität - Funktionen (Ketten) - Regeln - Parameter - Reaktionen	durch logische Prüfungen - If-Then-Else - Select-Case - Do-Until - Ansteuerung von CAD-Funktionen
Modellstruktur	- beliebig (Startmodell)	- definiert in Routine
Anwendung	- manuelle Gestaltung - Instanzierung von Modulen - Adaption	- Funktionsabruf - dienstbasierte Routinen
Vorgangsweise in der Realisierung	- funktionsorientiert - konstruktiv	- methodisch orientiert - abstrakt
Transparenz der Methode	- durch Modellrelationen - evtl. Dokumentation	- Dokumentation
Individuelle Projektanpassung	- flexibel	- begrenzt im Rahmen der Lösungsroutine
Plausibilisierung	- Modell- & Ergebniskontrolle	- Ergebniskontrolle
Kopierschutz	- zusätzliche Maßnahmen	- Teil von SW-Umfängen
Verteilung	- initial zentral - dezentral	- zentral
Weiterentwicklung	- dezentral in Modellen - differentielle Anpassung von CAD-Modellen	- zentral in Applikation - neues SW-Release
Fehlerkorrektur	- Bearbeitung im Modell - alternative Funktionen - kurze Zyklen	- Error-Handling Prozeduren - evtl. Entwicklungsschleife - längere Durchlaufzeit
Beherrschung von Modellvarianten	- zentrale Steuerkonzepte (z.B. Skelette) - Ausleitung von separaten Variantenmodellen	- objektorientierte Module - Vererbung
Datenvolumen des CAD-Modelles	- Intelligenz im Modell - speicherintensiv	- Resultat im Modell - speicherarm

#### **Integrale Verknüpfung von Methoden**

Die Gegenüberstellung von wissensbasierten Konstruktionsmodellen und wissensbasierten programmgestützten Werkzeugen zeigt deutliche Unterschiede in den abgeleiteten Einsatzgebieten, siehe Kapitel 3.3.2. Dies führt nicht zu einer 'Entweder-Oder' Situation, sondern zur Frage, wie die unterschiedlichen Ansätze optimal kombiniert werden können. Die folgenden Punkte stellen beispielhafte Möglichkeiten zur Verknüpfung von skriptbasierten Methoden mit nativen CAD-Konstruktionsfunktionen dar:

- Automatisierte Erstellung von Basisstrukturen, Geometrie, Parameter, Formeln und Funktionen für nachfolgende wissensbasierte Konstruktionsschritte
- Ausschreiben von Strukturen und Eigenschaften (wissensbasierter) Modelle
- Automatisierte Analysen (z.B. Messungen) von Konstruktionsmodellen
- Kriterienbasierte Adaption von Stellparametern und Adaption von Geometrie

Der Mehrwert einer abgestimmten Anwendung von Methoden besteht darin, dass unterschiedliche Anforderungen im Rahmen eines Gesamtkonzeptes systematisch bearbeitet und integriert werden können. Das Gesamtkonzept hat hierbei aufzuschlüsseln, welche Methode für welche Anforderung einsetzbar ist und wie die Kombination der Methoden zueinander erfolgt. Dies erfordert die Definition der Adapter anhand welcher beide Methoden miteinander Informationen austauschen können. Unter Adapter wird in dieser Arbeit ein im Bauteil hinterlegtes Objekt verstanden, welches eine Relevanz für das wissensbasierte Modell besitzt und in programm-basierten Werkzeugen bekannt ist. Kriterien zu Definition der Adapter sind:

- Eindeutige Identifikation (z.B. Nomenklatur, Position in der Struktur)
- Fähigkeit die erforderliche Information anhand des Adapters zu transportieren (Typ)

Die Objekttypen, welche als Adapter eingesetzt werden können, sind nicht beschränkt, wobei ein Schwerpunkt in Form von Geometrieobjekten, Parametern und Bauteilmetadaten zu erwarten ist. Konstruktionsstandards beschreiben die definierte Nutzung und Kombination von verfügbaren Methoden im CAD. Im Rahmen dieser Spezifikation können auch die gewählten Adapter zwischen Konstruktionsmodell und programm-basierten Methoden hinterlegt werden. Die gesetzten Adapter können in unterschiedlicher Ausprägung genutzt werden. Zum Einen kann über externe Automationsschnittstellen auf die implementierten Adapter eines Bauteils zugegriffen werden. Zum Anderen besteht in CAD-Modellen die Möglichkeit, Routinen als Teil des wissensbasierten Modelles zu hinterlegen, welche auf diese Adapter zugreifen. Diese Möglichkeit eignet sich z.B. für kleine Prozeduren welche keine grafische Oberfläche erfordern.

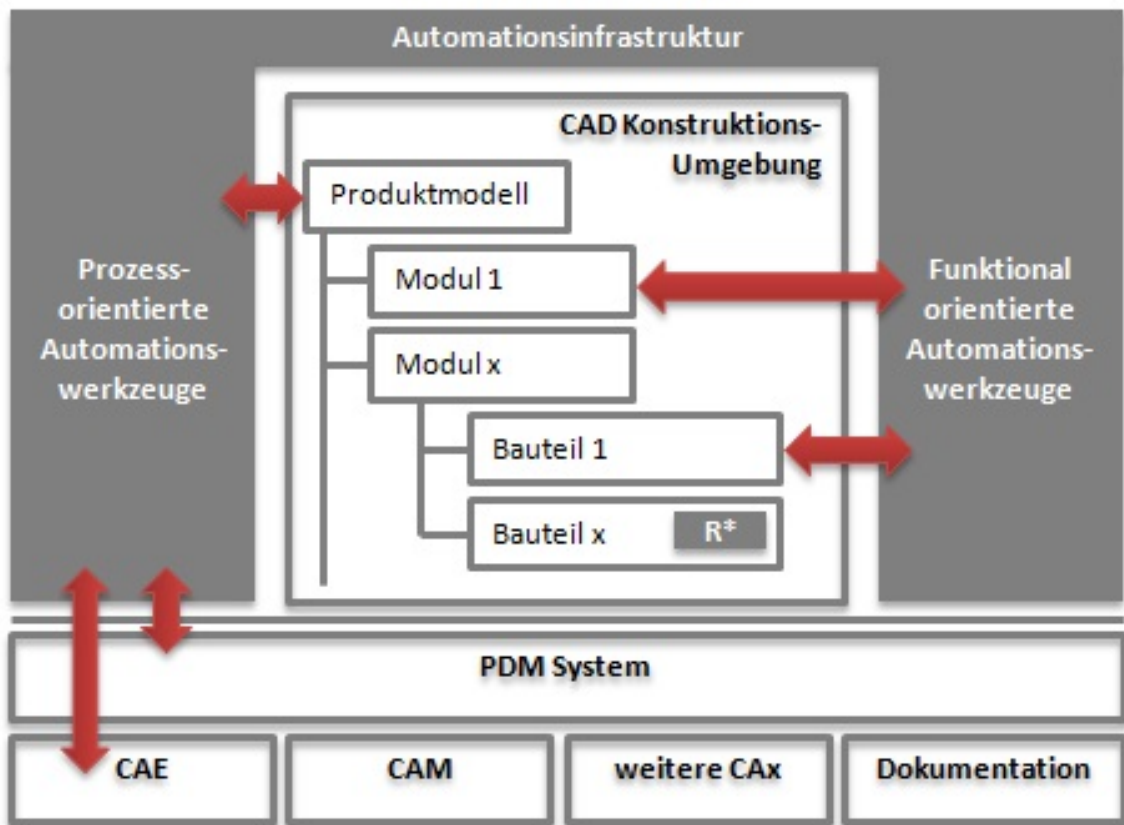


Abbildung 3.48: Interaktion von Automationsmethoden mit der nativen CAD-Umgebung und beispielhaften weiteren Systemen

Abbildung 3.48 zeigt eine mögliche Interaktion von Automationsmethoden und dem Produktmodell in der Konstruktion, als auch von weiteren Systemen der Entwicklungslandschaft. Automationsmethoden können im Rahmen eines gesamtheitlichen Ansatzes in einer Automationsarchitektur standardisiert aufgebaut werden, siehe Kapitel 3.3.5. Zwei Ausprägungen der Automation können unterschieden werden. Zum einen sind dies prozessorientierte Automatismen, welche beispielsweise zur Datenversorgung weiterer Prozesse eingesetzt werden können. Diese Methoden besitzen eine globale Ausprägung, da eine standardisierte Verarbeitung des Produktmodelles und dessen Bauteile adressiert werden. Auf der anderen Seite stehen spezifische Werkzeuge, welche die funktionale Auslegung und Überprüfung von Modulen und Bauteilen zum Ziel haben. Ergänzend können in den einzelnen Bauteilen implementierte Routinen (R\*) zum Einsatz kommen, welche Automatismen auf einer granularen Ebene innerhalb eines Bauteils abbilden, [203, S. 28]. Der Vorteil dieser implementierten Routinen besteht darin, dass keine externe Automationsinfrastruktur oder Automationsschnittstelle erforderlich ist. Nachteile dieser Routinen bestehen in der eingeschränkten Leistungsfähigkeit, fehlendem Kopierschutz und grafischen Oberflächen, sowie einer dezentraler Wartung.

Das gesamtheitliche Automationskonzept zielt auf eine effiziente Arbeit mit dem CAD-System, als auch auf die nachgelagerte Datenversorgung weiterer Entwicklungssysteme ab. In bestehenden Entwicklungslandschaften ist dies besonders das PDM-System, welches zur Datenhaltung und Datenversorgung weiterer Systeme dient. Die zentrale Rolle von PDM- und darüber hinaus von PLM-Systemen soll im Rahmen der durchgeführten Methodenentwicklung nicht geschmälert, sondern gestärkt werden. Dies bedeutet die Vorbereitung der CAD-Daten auf nachfolgende Prozesse. Sofern das PDM-System bestimmte Formate der Datenversorgung und Informationsübergabe nicht beherrscht, beispielsweise durch eine Einschränkung erlaubter Datentypen, ist eine alternative Datenversorgung erforderlich. Dies sollte jedoch ein dezidiertes Nicht-Ziel eines PDM-Konzeptes sein, wobei es in der Projektbearbeitung dennoch erforderlich sein kann.

#### Anwendungsbeispiel der automatisierten Ableitung von Bauteildatenblättern

Ein Beispiel der integralen Verknüpfung von (wissensbasierten) Konstruktionsmodellen und programmierten Werkzeugen ist die automatisierte Generierung von Bauteildatenblättern. Zur Gestaltung der Bauteildatenblätter kann eine Automationslösung die erforderlichen Informationen aus einem strukturierten Bauteil auslesen, ergänzen und exportieren. Die geometrische Repräsentanz wird auf unterschiedliche Arten,

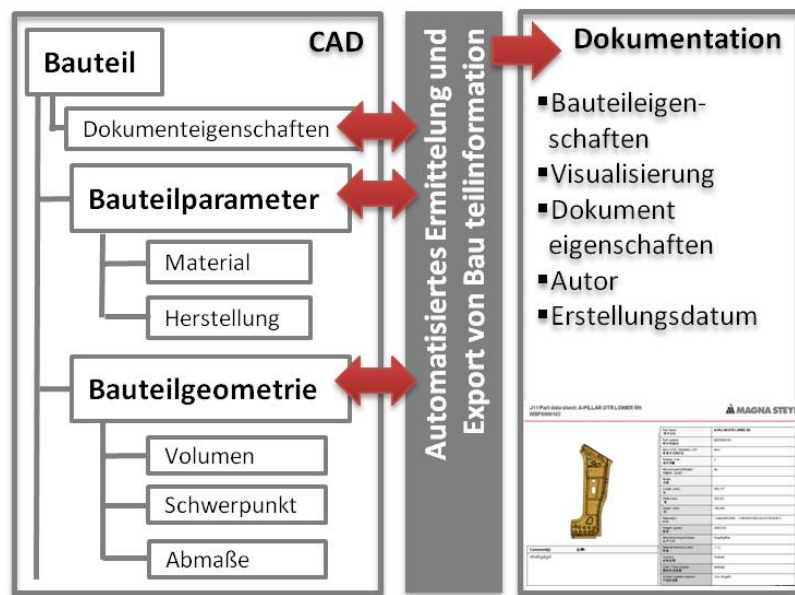


Abbildung 3.49: Automatisierte Ableitung von Bauteildatenblättern aus dem CAD-Modell

zum Beispiel durch den finalen Volumenkörper, eine definierte Fläche, oder die sichtbare Geometrie im Konstruktionsbereich, ermittelt. Diese Geometrieigenschaften können hierbei als Steuerungsparameter vorliegen, oder alternativ anhand von Automatismen vermessen werden. Die Adapter der Bauteilmetadaten, sowie technologische Daten werden als Bauteilparameter abgefragt und Dokumenteigenschaften werden direkt von der Bauteildatei ausgelesen. Die ermittelten Informationen werden nachfolgend über die Automationschnittstelle an Textverarbeitungs- oder Präsentationsprogramme übergeben.

### 3.3.3 Implementierung von wissensbasierten Lösungen

Erfolgsfaktoren in der Implementierung sind aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten. Dies ist angelehnt an die Einflussfaktoren in Abbildung 3.47:

- Mehrwert in der technischen Auslegung (höhere Qualität, reduzierter Aufwand...)
- Konformität mit Entwicklungsprozessen
- Konformität mit der Entwicklungslandschaft
- Zufriedenstellende Interaktion des Anwenders mit der Methode

#### **Mehrwert durch die wissensbasierte technische Auslegung**

Die Leistungsfähigkeit und Funktionalität, welche im Spezifikationsprozess erarbeitet wurde, ist während der Realisierung und Implementierung zu überwachen und gegebenenfalls zu adaptieren. Sofern es ersichtlich ist, dass die erforderlichen Funktionsumfänge nicht erreicht werden können, ist zu entscheiden ob der geplante Lösungsweg weiter beschritten werden soll. Um dies während der Lösungsgestaltung bis hin zur Implementierung zu ermitteln, ist eine fortlaufende Funktionsüberprüfung erforderlich. Die Rückkoppelung des Erfüllungsgrades des Funktionsumfangs, sowie der Berücksichtigung von Verbesserungsvorschlägen kann durch agile Entwicklungsschleifen zeitnah umgesetzt werden. Sofern gesteckte Verbesserungsziele erreicht werden können, ist die Grundlage für eine erfolgreiche Anwendung geschaffen.

#### **Konformität mit den Entwicklungsprozessen und der Entwicklungslandschaft**

Die Konformität mit bestehenden Entwicklungsprozessen, als auch der bestehenden Entwicklungslandschaft, bietet den Vorteil, dass auf evolutionäre Weise die bestehenden Auslegungsschritte weiterentwickelt werden können. Die Erfüllung dieses Punktes ermöglicht eine Einbettung in bestehende Entwicklungsumgebungen unter geringem Aufwand. Eine revolutionäre Änderung der zugrundeliegenden Infrastruktur und Prozesse kann anhand von innovativen Methoden erforderlich werden. Dies zieht in der Regel einen höheren Aufwand zur Einführung und Umstellung der Systeme und Prozesse nach sich. Hierfür ist in der Regel eine deutlich intensivere Auseinandersetzung mit dem Mehrwert der neuen Methode und deren Demonstration erforderlich. Dies kann beispielsweise durch eigene Entwicklungsumgebungen als auch parallel durchgeführte Entwicklungsprozesse getestet werden, um die Auswirkungen fundiert beurteilen zu können. Nicht änderbare Richtlinien oder sekundäre Effekte, wie geänderte Verantwortlichkeiten, können Herausforderungen darstellen, welche den erfolgreichen Einsatz neuer Methoden einschränken können.

#### **Zufriedenstellende Interaktion des Anwenders**

Der Erfolg von neuen Werkzeugen und Methoden wird neben funktionalen Aspekten von der Anwenderakzeptanz beeinflusst. Zentraler Punkt ist die Vermittlung des Vorteiles, welcher generiert werden kann. Einschränkungen in der Auslegung bezüglich der Adaption auf unterschiedliche Fragestellungen stellen ein Risiko der gewünschten Akzeptanz dar. Sofern zur Anwendung der Methode eine Vielzahl von Eingaben, redundanten Vorgängen und Wartezeiten in der Bedienung erforderlich sind, reduziert sich die Akzeptanz trotz eines möglichen Zeitgewinns oder einer qualitativ verbesserten Auslegung.

Bei der Umsetzung von programmgestützten Automationslösungen kann die Verwendung von intuitiven Benutzeroberflächen, beispielsweise Windows Forms [203, S. 20], [109, S. 173], die Anwendungsakzeptanz steigern. Diese ermöglichen eine übersichtliche Strukturierung von Bedienelementen und Eingabegrößen und reduzieren die Komplexität in der Anwendung. Eine logische Verknüpfung von Eingabefenstern kann durch die Gestaltung von Arbeitsprozessen ('Workflows') umgesetzt werden. Durch eine nachvollziehbare Bedienlogik kann der Schulungs- und Arbeitsaufwand reduziert werden. Ein direkter Abruf von Dokumentation und Projekteinstellungen, sowie eine Visualisierung der Funktionsweise eines Werkzeuges tragen ebenso zur Benutzerakzeptanz bei. Eine anwendergerechte Gestaltung von Benutzeroberflächen unterliegt einer subjektiven Einschätzung, daher ist eine Beurteilung von mehreren Anwendern anzustreben.

Eine weitere Anforderung besteht in der direkten Verfügbarkeit von Werkzeugen in der Arbeitsumgebung. Die Einbindung von individuellen Lösungen wird von modernen CAD-Systemen unterstützt und stellt eine Möglichkeit zur integrierten Entwicklungsumgebung dar, beispielsweise die Einbettung von benutzerdefinierten Symbolleisten in CATIA V5 [85, S. 55ff], [203, S.31] oder NX [92, S. 10ff]. Denkbar ist auch eine externe Verwaltung von Werkzeugen über konstruktionsnahe Systeme, siehe Kapitel 3.3.4

Eine grundsätzliche Herausforderung besteht im Aufbau von substituierenden Lösungen zu aktuell eingesetzten Methoden erfahrener Entwickler. Eine gewonnene Effizienzsteigerung zeigt sich durch einen reduzierten Aufwand in der Entwicklung. Dies kann zu einer verminderten Zahl von Entwicklern führen, aber auch zu gesteigerten Projektumfängen bei konstanter Personalkapazität. Zusätzlich kann es zu einer Änderung der Wertigkeit von Entwicklungsaufgaben und Schlüsselkompetenzen führen, welche in einer Entwicklungsmannschaft nicht zwangsläufig positiv gesehen werden muss. Um diesem Umstand zu begegnen, können Experten durch die Anwendung von wissensbasierten Werkzeugen die Entwicklungsgeschwindigkeit erhöhen und als Schlüsselanwender die Verankerung im Unternehmen verstärken.



### 3.3.4 Anwendungsbeispiel einer Automationsplattform

Die Entwicklung von modularen und automatisierten Lösungen für unterschiedliche Fragestellungen in der automobilen Produktauslegung, erfordert eine fortlaufende Rückkopplung in der Realisierung mit den späteren Anwendern, siehe Kapitel 3.3.3. Agile Methoden [115, S. 65ff] sind ein Ansatz, diese Vorgangsweise systematisch umzusetzen. Wesentlicher Bestandteil von agilen Entwicklungsmethoden ist eine schnelle Interaktion zwischen Spezifikation und prototypischer Umsetzung, sowie Bestätigung und Abnahme von Modulen des Gesamtkonzeptes [87, S. 9]. Eine geeignete Entwicklungsumgebung kann diese zeitnahe Beurteilung von Konzepten und Funktionsmustern durch Anwender in der laufenden Entwicklung vereinfachen.

Zur Verteilung von programmierten Werkzeugen, als auch wissensbasierten Konstruktionsmodellen innerhalb von CAD-Systemen, stehen keine kommerziellen Anwendungen zur Verfügung. Aktuell eingesetzte Vorgangsweisen bestehen in einer individuellen Einrichtung von Lösungen, welche einen hohen Aufwand zur Administration nach sich ziehen. Besonders in der fortlaufenden Verteilung von neuen Arbeitsständen stellt dies ein Hemmnis dar. Die Anforderungen an die Lösungsplattform bestehen in folgenden Punkten:

- Verteilung von Lösungen je nach Projekt
- Verteilung von Lösungen je nach Anwender
- Individuelle Konfigurationen je nach Projekt
- Bereiche zum Hochladen von Lösungen unterschiedlicher Autoren
- Effiziente Handhabung der Kombination 'Lösungsrelease-Projekt-Anwender'
- Kopierschutz
- Ankopplung an die firmeninterne Anwenderdatenbank (z.B. Active Directory)
- Ankopplung an die firmeninternen Projektumgebungen und Environmentvariablen
- Konstruktionsnaher Zugangspunkt
- Aufzeichnungen von Anwendungsstatistiken
- Filtern der Statistik je nach Projekt und Anwendung
- Bereiche zur Sammlung von Feedback

Die Entwicklungsplattform ist als abgestimmtes Zusammenspiel zwischen Lösungserstellung, Verwaltung und Anwenderverfügbarkeit umzusetzen. Im Fokus des Architekturkonzeptes steht die effiziente und systematische Administration von Lösungen zwischen Ersteller und Anwender. Diese inkludiert die gesamte Entwicklungsphase von prototypischen  $\beta$ -Tests hin zur finalen Implementierung auf dieser Automationsplattform.

### 3.3. RAHMENKONZEPT ZUR GESTALTUNG VON WISSENSBASIERTEN CAD-METHODEN

Die konzipierte Entwicklungsarchitektur teilt sich in zwei interagierende und abgestimmte Arbeitsbereiche. Der initiale Bereich umfasst die Umfänge der Lösungserstellung, Aufbereitung und strukturierten Verwaltung von Lösungen. Hierzu zählen des weiteren auch Konfigurationsdateien und Dokumentationen. In Abbildung 3.50 ist dieser gekapselte Entwicklungsbereich auf der rechten Seite in Form der KBE-Entwicklung, Administration bis hin zur Lösungsdatenbank zu finden (Schritte 1-3 in Abbildung 3.50). In diesem Bereich wird ebenso das Rechtemanagement der einzelnen Lösungen definiert, welches auf den Import der Firmendatenbanken von Anwendern und Projekten aufbaut. In konventionellen Softwareentwicklungsprozessen wird ein Programmschutz grundsätzlich spezifisch für einzelne Lösungen umgesetzt. Dies führt zu erhöhtem Entwicklungsaufwand für jede einzelne Lösung. Durch die Integration des Kopierschutzes in den Administrationsbereich wird der erforderliche Aufwand zum Schutz des geistigen Eigentums je Lösung reduziert. Umgesetzt wird der Kopierschutz anhand der automatischen Kapselung der Lösungen in eine Datei und dessen Verschlüsselung ('Obfuscate'). Zusätzlich wurde eine spezielle Methode zur Verteilung umgesetzt, auf welche hier nicht genauer eingegangen wird. Final wird vom Administrationswerkzeug die konfigurierte und gekapselte Lösung und deren Freigaben bezüglich Anwender und Projekt an die Lösungsdatenbank übermittelt. Bereits hinterlegte Lösungen in der Datenbank können durch den Administrator analog weiter bearbeitet werden.

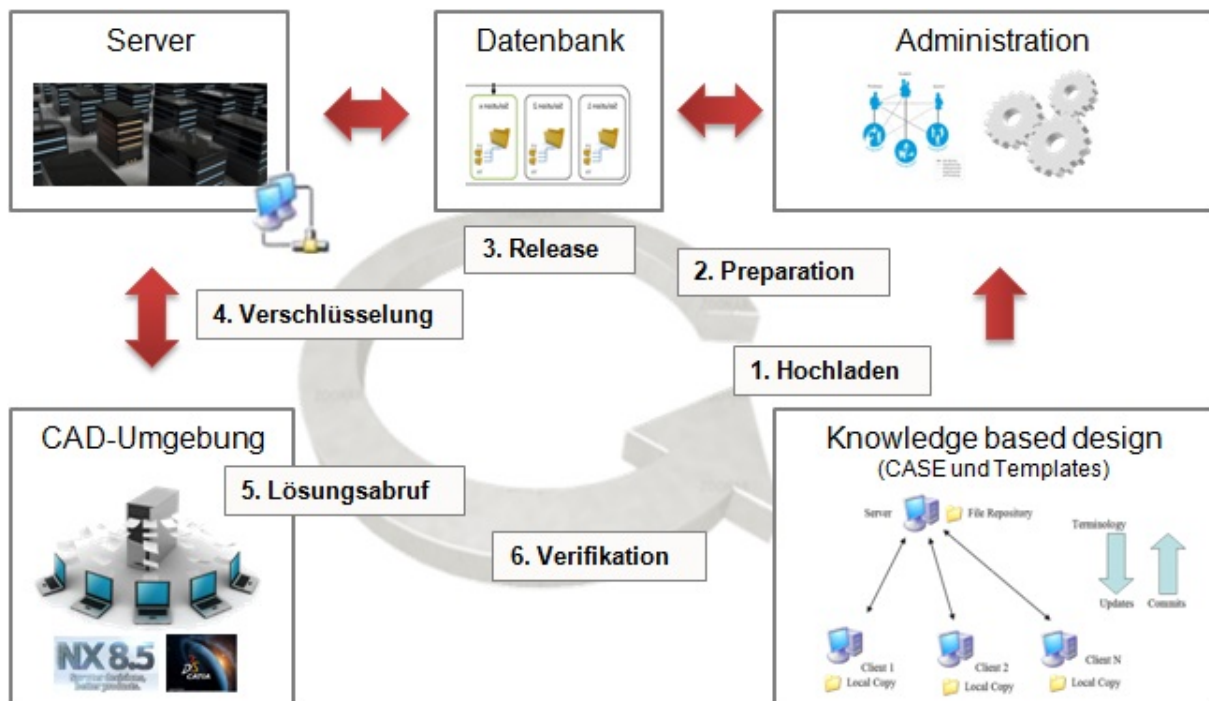


Abbildung 3.50: Funktionsmodule der Automationsplattform und der Prozess zur Aufbereitung, Verwaltung und Verteilung von wissensbasierten Softwarelösungen und Bibliotheksmodellen

Die abgestimmte Schnittstelle zwischen Lösungserstellung und Lösungsanwendung wird durch eine Lösungsdatenbank umgesetzt, siehe Schritt 3 in Abbildung 3.50. Diese ermöglicht die Speicherung und den Zugriff auf Lösungen und erfordert die synchrone Konzeption von Autoren- und Anwenderseite. Die Trennung zwischen Entwicklungs- und Zugriffsbereich bringt Vorteile in Bezug auf den Schutz der Lösungen, da der Quellcodebereich von der Anwenderseite getrennt wird.

Auf Anwenderseite, von der Abfrage an den Server bis hin zum Client (Schritte 4 und 5 in Abbildung 3.50), wird der Zugriff auf die hinterlegten Lösungen gestaltet. Hierbei werden verfügbare Lösungen je nach Projekt und Anwender gefiltert. Die Auflistung und der Abruf der Lösungen, Dokumente, Konfigurationsdateien und Basismodelle wurde über eine weitere softwaregestützte Lösung umgesetzt und ist direkt in der Projektumgebung eingebettet. Der Zugangspunkt wurde jedoch ausserhalb der CAD-Systeme gewählt, da dies weitere Vorteile nach sich zieht. Ein CAD-neutraler Zugriff auf die Lösungsdatenbank ermöglicht einen Abruf von Lösungen unabhängig vom gewählten CAD-System. So können auch automatisierte Werkzeuge, welche nicht durchgängig Ressourcen eines CAD-Systems erfordern, ebenso gestartet werden. Dazu zählen beispielsweise Automatismen anderer Anwendungen (z.B. Excel, Powerpoint, div. Pre-Processoren...). Darüber hinaus kann eine externe und dienstbasierte Ansteuerung des CAD-Systems umgesetzt werden. Auch die Versorgung der Anwender mit neuen Versionen einer Lösung ist ohne Neustart des CAD-Systems möglich. Sofern eine direkte Implementierung in das CAD-System erforderlich ist, können die Lösungen aus der Datenbank auch in Form von Werkzeugleisten und Icons verknüpft werden. Der Anwenderbereich ist so konzipiert, dass die Anwendungen nach einer Erweiterung auch web-basiert abgerufen werden können. Neben der Verteilung von Lösungen wurde auch ein Bereich für Rückmeldungen der Nutzer konzipiert, um die Überprüfungsschleife durchgängig und systembasiert umzusetzen (Schritt 6 in Abbildung 3.50). Die Ergebnisse von qualitativen Überprüfungen aus fachspezifischer und Anwendersicht, sowie detektierte Fehler, können in diesem Bereich hinterlegt und dem Autor übermittelt werden.

Der Mehrwert durch die Gestaltung dieser Verwaltungsplattform für wissensbasierte Methoden ergibt sich aus reduziertem Aufwand zur Aufbereitung und Verteilung, und dem integrierten Kopierschutz für alle Softwarelösungen. Es werden nicht nur die Verteilung von programm-basierten Werkzeugen, sondern auch Startmodelle, wissensbasierte CAD-Modelle, Vorlagen und Systemdokumentation unterstützt. Anhand der Entwicklungsplattform kann eine agile Methodenentwicklung in der Konstruktion auf systemgestützte Weise ermöglicht werden. Dies trägt maßgeblich zur Entwicklung von zielgerechten Lösungen bei. Darüber hinaus können spezifische Programmiererweiterungen von unterschiedlichen CAD-Systemen zentral konzipiert, administriert und gewartet werden.

#### 3.3.5 Fortführender Ansatz einer skalierbaren Automationsinfrastruktur

Das Konzept einer modularen und skalierbaren Automationsinfrastruktur setzt sich mit der Fragestellung auseinander, inwiefern über verschiedene Lösungen gemeinsame Lösungsbausteine zentral entwickelt und eingesetzt werden können. Erforderlich ist dieser Ansatz, um den Aufwand zur Wartung und Weiterentwicklung für die sehr spezifischen Werkzeuge in der Konstruktion zu reduzieren. Ansätze zur Erreichung dieses Zieles sind hierzu:

- Standardisierungen
- Modularisierung
- Adapter für verschiedene Schnittstellen und Systeme
- Lösungsübergreifende Anwendung der Module

Eine Standardisierung der Softwareerstellung kann durch ein durchgängiges Quellcodemanagement umgesetzt werden. Die Gestaltung von mehrfach verwendbaren Lösungsbausteinen erfordert die Konformität für unterschiedliche Lösungen. Hieraus erfolgt, dass eine Standardisierung unabdingbar ist, um Änderungen der wiederkehrend eingesetzten Programmbibliotheken aufwärtskompatibel zu gestalten. Durch eine zentrale Quellcodeverwaltung und die Wiederverwendung von bestehenden Lösungsbausteinen können Redundanzen in verschiedenen Programmen reduziert werden. Der Aufbau eines Lösungsbaukastens von Softwaremodulen ist ein Beitrag zur effizienten Lösungserstellung, da Basisfunktionen nicht erneut aufgebaut werden müssen und die Realisierung einer programmgestützten Lösung beschleunigt wird. Bausteine im Rahmen der CAD-Automation sind beispielsweise:

- Externe Ansteuerung des CAD-Systems
- Automation von Funktionen zum Dokumentenmanagement, Selektion, etc.
- Schnittstellen zu weiteren Applikationen (z.B. Excel, Powerpoint...)

Zur Spezifikation der Softwarestandards für Automationslösungen ist eine Analyse der bestehenden Softwareprodukte, sowie deren Erweiterungsmöglichkeiten und der Abschätzung einer langfristigen Verfügbarkeit durchzuführen. Softwarestandards umfassen eine spezifizierte Programmiersprache, Automationsschnittstellen, Vorgaben zur Codegestaltung und Dokumentation, sowie die spezifizierte Einbindung von Ressourcen. Um den Ansatz einer CAD-übergreifende Automation zu ermöglichen, sind Programmiersprachen, welche von unterschiedlichen CAD-Systemen interpretiert werden können, gefordert, siehe Kapitel 3.2.4.

# Kapitel 4

## Zusammenfassung und Ausblick

### 4.1 Zusammenfassung

Die Entwicklung von modernen Fahrzeugen unterliegt einem stetig steigenden Grad der Komplexität. Zusätzliche Anforderungen und Funktionen des Fahrzeuges sind im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen. Durch den Auf- und Ausbau rechnergestützter Methoden kann die Bearbeitung und Lösungsfindung der gestiegenen Anforderungen wesentlich unterstützt werden. Das Spektrum von kommerziell verfügbaren Softwarelösungen stellt das Rückgrat der rechnergestützten virtuellen Entwicklung dar. Durch eine überschaubare Anzahl von Anbietern unterschiedlicher Softwaremethoden (CAx) kann von einer Teilstandardisierung gesprochen werden. Durch am Markt verfügbare Softwarewerkzeuge wird dem Entwickler die Basis der Entwicklungsumgebung bereitgestellt, welche oftmals eine Ausrichtung von Branchen- und Produktübergreifenden universell einsetzbaren Funktionen und Methoden aufweist, jedoch keine nahtlose Einbindung zu weiteren Systemen und Methoden aufweist. Die durchgängige Bearbeitung von Bauteilen, Modulen und gesamten Systemen wird in der Praxis durch individuelle Zusatzpakete ('Add-On') und firmeneigene Programmiererweiterungen, sowie intelligente Konstruktionsmodelle verbessert. Aus Sicht des Geschäftsfeldes der automobilen Fahrzeugentwicklung ist die Erarbeitung von diesen Methoden und Softwarelösungen nicht als Kern- sondern als unterstützender Prozess zu sehen. Besonderer Wert bei der Entwicklung dieser Methoden und Werkzeuge wird auf den erreichbaren Nutzen und die enge Interaktion von Lösungsersteller und Anwender gelegt.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Methoden in der CAD-basierten Konstruktion anhand von Beispielen demonstriert, welche in dieser Form bisher nicht verfügbar waren. Der Lösungsraum von Methoden in der Konstruktion konnte anhand der erarbeiteten Ansätze und Strategien erweitert werden.

Die Anwendungsbeispiele starten bei einem hierarchisch strukturierten, voll parametrisierten und wissensbasierten automobilen Strukturmodell, welches auf die spezifische Prozessdynamik in der Konzeptphase und nachgelagerte Simulationsdisziplinen eingeht (Kapitel 3.1.1). Im Rahmen der Konstruktionsmethoden wurden wissensbasierte, bibliotheksgestützte Modelle, sowie eine zulässige funktionsaffine Abstraktion anhand des Beispiels des Fahrzeugvorderwagens beleuchtet (Kapitel 3.1.2). Die hierarchische Methode der Strukturentwicklung wurde hierbei auf das Anwendungsbeispiel der Klappenkonstruktion übergeführt. Skriptbasierte Methoden in der Konstruktion werden in deskriptive und generierende Methoden unterschieden. Deskriptive Methoden wurden im Rahmen des multidisziplinären simultanen Entwicklungsprozesses, am Beispiel eines Informationsübertrages von Verbindungstechnik zwischen Konstruktion und Struktursimulation umgesetzt (Kapitel 3.2.1). Generative programmgestützte Methoden wurden in routinebasierte Abläufe und kriterienbasierte Ansätze unterschieden. Am Beispiel der Faserverbundmodellierung konnte gezeigt werden, dass aufgrund neuer Technologien innovative methodische und systemgestützte Ansätze erforderlich sind. Zur Demonstration wurde ein Algorithmus zur lagen-spezifischen Flächenzerlegung im CAD umgesetzt, welcher eine affine Darstellung der Lagen in FEM-Modellen erlaubt (Kapitel 3.2.2). Eine kriterienbasierte Optimierung hinsichtlich Flächenform und kinematischer Auslegung von Fahrzeugseitenscheiben im Rahmen der Stylingabsicherung in einer frühen Phase rundet die Demonstration von CAD-integrierten Skriptmethoden ab (Kapitel 3.2.3).

Im Rahmen eines Gesamtkonzeptes zur wissensbasierten Konstruktion wurden die unterschiedlichen Ansätze von Konstruktionsmethodik und programmgestützten Methoden systematisch strukturiert. Die spezifischen Vor- und Nachteile von parametrisch assoziativen und programmierten Methoden wurden gegenübergestellt und jeweilige Einsatzbereiche abgeleitet. Über eine integrale Verknüpfung von Konstruktionsmodell und programmierten Routinen kann ein zusätzlicher Mehrwert erzielt werden. Fundierend auf der systematischen Betrachtung wurde Entwicklungsrichtlinien erarbeitet. Zusätzlich wurde eine Plattform für wissensbasierte Softwarewerkzeuge und Bibliotheksmodelle aufgebaut und in die Systemumgebung eines automobilen Zulieferbetriebs implementiert (Kapitel 3.3.4).

Der Stand der Technik, dargestellt durch die Richtlinie VDI-2209, wurde in der Kaskade durch programmierte CAD-Methoden ergänzt und anhand eines übergeordneten Planungskonzeptes für wissensbasierte Lösungen erweitert (Kapitel 3). Durch die vorliegende Arbeit konnte ein Beitrag zu Weiterentwicklung von wissensorientierten CAD-basierten Methoden und verbesserter Durchgängigkeit der interdisziplinären Datenversorgung in der Automobilentwicklung geleistet werden.

## 4.2 Ausblick zur Weiterentwicklung der wissensbasierten Konzeption

Die Arbeitsweise in der Konstruktion wird in Zukunft durch eine verstärkte Vernetzung unterschiedlicher Disziplinen, sowie eine effizientere Bauteilgestaltung mit gesteigertem Reifegrad geprägt sein. Es werden fortlaufend innovative Technologien in bestehende Teilsysteme Einzug halten und in Kombination mit einer Vielzahl von Produktvarianten zu einer höheren Produktkomplexität führen. Durch die Vorverlagerung der Funktionsabsicherung anhand von virtuellen Methoden und frühzeitigem Rückfluss von Erkenntnissen in die Produktauslegung, wird ein steter Beitrag zum erhöhten Produktreifegrad in der Entwicklung geleistet. Der Arbeitsaufwand von administrativen Tätigkeiten wird in Zukunft durch leistungsstarke, einfach zu bedienende Entwicklungsumgebungen, abgestimmten Schnittstellen und Automatismen reduziert werden. Im Entwicklungsprozess werden relevante Bauteildaten durchgängig über verschiedenste Entwicklungssysteme und Standorte ohne zusätzliche Aufwände für den Entwickler synchronisiert. Die Arbeit am Produktmodell wird durch intuitive Bedienungsverfahren vereinfacht und erlaubt eine interaktive Bearbeitung durch verschiedene Disziplinen. In der Entwicklung werden agile Vorgangsweisen Eingang finden, um eine schnellere Konvergenz der funktionalen Auslegung zu erreichen. Anhand wissensbasierter Werkzeuge werden technische Fragestellungen verstärkt systematisch erarbeitet, in anwenderorientierten Lösungen übergeführt und unter einem gesamtheitlichen Ansatz auf übergeordnete Weise verknüpft. Der Bauteilentwickler als Integrator unterschiedlicher Anforderungen wird in der Zukunft somit durch intuitiv anwendbare, multidisziplinär orientierte, leistungsstarke Methoden und Werkzeuge unterstützt und hat somit deutlich mehr Freiraum zur innovativen und funktional optimierten Lösungsfindung.

# Literaturverzeichnis

- [1] ABELE, E. et. al.: *EcoDesign - Von der Theorie in die Praxis*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-75437-4
- [2] AHLEMANN, F. ; (HRSG.), C. E.: *Strategisches Projektmanagement - Praxisleitfaden, Fallstudien und Trends*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-3-642-34760-3
- [3] ALTAIR: *HyperMesh and Teamcenter Integration Using Standard PLMXML Interface*. – <http://altairatc.com/%28S%28utrgbnsw24xjgpcie2oif35%29%29/europe/ehtc2011-abstracts/day1/session-7/boot-siemens.html> (28.12.2014)
- [4] ALTAIR: *Altair Hyperstudy, Softwareprogramm*. Handbuch, 2011. – Version 11.0
- [5] ALTAIR: *Altair OptiStruct, Softwareprogramm*. September 2014. – Version 13.0
- [6] ALVAREZ, A. A. et. al.: Architecture-Centric Design Approach for Multidisciplinary Product Development. In: *Advances in Product Family and Product Platform Design: Methods and Applications*. Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-1-4614-7937-6
- [7] ANDERL, R. : *Virtuelle Produktentwicklung / Technische Universität Darmstadt*. 2007. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-540754374
- [8] ANDERL, R. et. al.: STEP, Standard for the Exchange of Product Model Data / ISO. 2000. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-322-89096-2. – Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303
- [9] ANSYS: *ANSYS Fluent, Softwareprogramm*. August 2013. – Version 15.0
- [10] APFALTER, G. et. al.: Past, Presence, Future- of an interesting path to go for Magna Steyr. In: *Automobil Forum Graz*, 2010
- [11] APPELRATH, H. J. ; (HRSG.) others: *Future Energy Grid: Migrationspfade ins Internet der Energie*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-27863-1. – acatech Studie



- [12] AVK ; (HRSG.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Vieweg + Teubner Verlag, 2010. – ISBN 978-3-8348-0881-3
- [13] BACKES, A. ; U SCHWANECKE U, C. G.: Automatic Mid-Surface Generation as a Basis for technical Simulation. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 116. Jahrgang. Springer Verlag, Februar 2014. – ISSN 0001-2785
- [14] BALZERT, H. : *Lehrbuch der Softwareentwicklung: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung*. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 1998. – ISBN 3-8274-0065-1
- [15] BARLOW, T. J. et. al.: A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions / TRL Limited. 2009. – Forschungsbericht. – Published Project Report 354
- [16] BARTELS, A. : Vision und Möglichkeiten des automatischen Fahrens. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. 15. Ausgabe. Springer Verlag, Februar 2014. – ISBN 978-3-937655-31-4
- [17] BERNASCH, J. et. al.: Simulationswerkzeuge domänenübergreifend verknüpft / ATZ Extra, Springer Verlag. 15. 2010. – Forschungsbericht. – ISSN 2195-1454
- [18] BERTSCHE, B. : *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Springer Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-33969-4
- [19] BLAU, K. : *Das Automobil - Eine Einführung und Bau von modernen Kraftwagen (1911)*. Salzwasser Verlag, 2010. – ISBN 978-3-861-95248-0
- [20] BOCH, R. : *Geschichte und Zukunft der deutschen Automobilindustrie*. Steiner Verlag, 2000. – ISBN 3-515-07866-5
- [21] BOEHM, B. W.: Guidelines for verifying and validating software requirements and specifications / EURO IFIP 79. 1979. – Forschungsbericht
- [22] BOEHM, B. W.: Verifying and Validating Software Requirements and Data Specifications. In: *Proceedings of the IEEE*. IEEE Software, January 1984
- [23] BÖGE, A. et. al.: *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-83482-479-0
- [24] BRAESS, H. H.: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 978-3-8348-1011-3

- [25] BRAESS, H. H. ; (HRSG.), U. S.: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Springer Vieweg Verlag, 2013 (7. Auflage). – ISBN 978-3-658-01691-3
- [26] BRAID, I. : The synthesis of solids bounded by many faces / Comm. ACM. 1975. – Forschungsbericht. – ISSN 0018-9162
- [27] BREH, W. ; (HRSG.), K. S.: *Chancen der Energiewende*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013. – ISBN 978-3-86644-985-5. – Wissenschaftliche Beiträge des KIT zur 1. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie am 19.06.2012
- [28] BRILL, M. : *Parametrische Konstruktion mit CATIA V5: Methoden und Strategien für den Fahrzeugbau*. Carl Hanser Verlag, 2006. – ISBN 978-3-446-40705-3
- [29] BROCK, T. et. al.: *Lehrbuch der Lacktechnologie*. Vincentz Verlag, 2000. – ISBN 3-87870-569-7
- [30] BULLINGER, H. J. ; (HRSG.), J. W.: *Forschungs und Entwicklungsmanagement*. B.G. Teubner Verlag, 1997. – ISBN 3-519-06370-0
- [31] BURKERT, A. : WLTP heizt die CO2-Debatte an. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 116. Jahrgang. Springer Verlag, Juli-August 2014. – ISSN 0001-2785
- [32] BURR, H. : Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau / Universität des Saarlandes. 2008. (Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 44). – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-930429-73-8. – Dissertationsschrift
- [33] BYRNE, E. J.: A Conceptual Foundation for Software Re-Engineering / IEEE Computer Society. 10. 1977. – Forschungsbericht. – ISSN 0-8186-2980-0
- [34] C-NCAP: *The official site of China new car assessment*. Website, . – [http://www.c-ncap.org.cn/c-ncap\\_en/index.htm](http://www.c-ncap.org.cn/c-ncap_en/index.htm) (14.11.2014)
- [35] CHEN, X. et. al.: Research on Parameterized Structural Modeling for Carbody Lightweighting. In: *Proceedings of the FISTIA World Automotive Congress 2012*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-33738-3
- [36] CHEN, Y. et. al.: The 19th International Conference on Engineering Design. In: *IECD 2013-Proceedings*, The Design Society and the Creative Design Institute (CDI), August 2013. – ISBN 978-1-904670-54-4
- [37] CONTACT SOFTWARE: *FCM - Fast Concept Modeller, Softwareprogramm*. – Version V2.0

- [38] DAIMLER AG: PLM2015 NX Einführung DXWeld. 2013. – Forschungsbericht
- [39] DALMAU, J. ; CATALÀ, A. ; BOLTSHAUSER, S. : Active Safety Assessment by Consumer Organizations - Euro NCAP Approach / Insurance Institute for Highway Safety (IIHS). 2011. – Forschungsbericht. – SAE International Technical Paper
- [40] DASSAULT SYSTEMS: *CATIA - Composites Design 3 (CPD), Softwareprogramm; Sonderlizenz.* Website, . – [http://www.3ds.com/products-services/catia/portfolio/catia-v5/all-products/domain/Mechanical\\_Design/product/CPD/](http://www.3ds.com/products-services/catia/portfolio/catia-v5/all-products/domain/Mechanical_Design/product/CPD/) (28.12.2014)
- [41] DASSAULT SYSTEMS: *CATIA - Product Knowledge Template Definition 2 (PKT), Softwareprogramm, Sonderlizenz.* – [http://www.3ds.com/products-services/catia/products/v5/portfolio/domain/Product\\_Synthesis/product/PKT/?cHash=80ad5dcb79d4b8a6ffbbc93094fdff7a](http://www.3ds.com/products-services/catia/products/v5/portfolio/domain/Product_Synthesis/product/PKT/?cHash=80ad5dcb79d4b8a6ffbbc93094fdff7a) (28.12.2014)
- [42] DASSAULT SYSTEMS: *CATIA - Weld Design 1 (WD1), Softwareprogramm; Sonderlizenz.* Website, . – [http://www.3ds.com/products-services/catia/portfolio/catia-v5/all-products/domain/Mechanical\\_Design/product/WD1/?cHash=6e7d0639e628a74a6ce21a8eeb0fb282](http://www.3ds.com/products-services/catia/portfolio/catia-v5/all-products/domain/Mechanical_Design/product/WD1/?cHash=6e7d0639e628a74a6ce21a8eeb0fb282) (28.12.2014)
- [43] DASSAULT SYSTEMS: *CATIA Composites Fiber Modeler, Softwareprogramm; Sonderlizenz.* Website, . – <http://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/portefeuille/catia-v6/portefeuille-v6/d/digital-product-experience/s/catia-engineering/p/composites-fiber-modeler/?cHash=2a1e3e81d3dba92590190b1ff753bfce> (09.06.2014)
- [44] DASSAULT SYSTEMS: *Abaqus Unified FEA, Softwareprogramm.* Januar 2011. – Version 6.10
- [45] DASSAULT SYSTEMS: *ENOVIA, Softwareprogramm.* November 2012. – Version V6R2013X
- [46] DASSAULT SYSTEMS: *CATIA V5, Softwareprogramm.* Website, November 2014. – Version R19
- [47] DAVIM, J. P.: *Modern Mechanical Engineering.* Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-3-642-45176-8

- [48] DIETRICH, W. et. al.: Conceptual automotive development by integration of functional aspects into parametric associative design methods. In: *3. Symposium Virtuelles Fahrzeug*, 2010
- [49] DOKE, P. et. al.: Advanced Concept Modeling Method for Automotive Structural Optimization. In: *Sustainable Automotive Technologies 2012*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-24145-1
- [50] DUDDECK, F. : New Approaches for Shape and Topology Optimization for Cras-hworthiness. In: *NAFEMS World Congress 2011*, 2011 (A World of Engineering Simulation, Proceedings). – ISBN 978-1-874376-53-8. – Keynote lecture
- [51] DUDDECK, F. ; ZIMMER, H. : Modular Car Body Design and Optimization by an Implicit Parameterization Technique via SFE CONCEPT. In: *Proceedings of the FISTIA World Automotive Congress 2012*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-33738-3
- [52] DYNAMORE: *LS-DYNA, Softwareprogramm*. August 2012. – Version R.6.1.0
- [53] ECKSTEIN, L. : *Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen*. fka - Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2010. – ISBN 978-3-940374-29-5
- [54] ECKSTEIN, L. : Sicherheit, Effizienz und Fahrerlebnis – von der Vision zur Wirklichkeit. In: *16. VDA Technischer Kongress*. 16. Ausgabe. VDA Verband der Automobilindustrie, Berlin, März 2014
- [55] ECKSTEIN, L. et. al.: Leichtbau-Bodengruppe mit Verstärkungen aus CFK und GFK. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 113. Jahrgang. Springer Verlag, April 2011. – ISSN 0001-2785
- [56] ECKSTEIN, L. : *Strukturentwurf von Kraftfahrzeugen*. fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2008
- [57] EHRENSPIEL, K. : *Integrierte Produktentwicklung*. Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-42013-7
- [58] EICHBERGER, A. et. al.: Potentiale von Systemen der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 113. Jahrgang. Springer Verlag, Juli 2011. – ISSN 0001-2785
- [59] EIGNER, M. : 3. PLM Future Workshop am 7. November 2011 an der TU Kaiserslautern, 2011. – Vortrag

- [60] EIGNER, M. et. al.: *Informationstechnologie für Ingenieure*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-24893-1
- [61] EIGNER, M. et. al.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-3-662-43815-2
- [62] EIGNER, M. ; STELZER, R. : *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-44373-5
- [63] :EM ENGINEERING METHODS AG: CAD-Datenbestand auf Herz und Nieren geprüft. In: *Economic Engineering 05/2013*. Göller Verlag GmbH, Mai 2013
- [64] :EM ENGINEERING METHODS AG: CATIA V5 Programmierung Möglichkeiten und Grenzen von CATSkrips, VBS, VBA und CAA / :em engineering methods AG. 2013. – Forschungsbericht. – Whitepaper, available online at [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_at/](http://www.plm.automation.siemens.com/de_at/); 18. Februar 2014.
- [65] ERNST, M. ; HIRZ, M. et. al.: Methods of CAD Based Automation and Simulation by the Example of Virtual Stone Chipping Testing. In: *CAD Conference and Exhibition*, 2013. – ISSN 2291-1987
- [66] ESI GROUP: *PAM-QUIKFORM for CATIA V5, Softwareprogramm*. 2007. – Version 5
- [67] EURO-NCAP: *The official site of the european new car assessment*. Website, . – <http://de.euroncap.com/de/home.aspx> (14.11.2014)
- [68] FILZEK, B. : Schlüsseltechnologien zum Automatisierten Fahren. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. 15. Symposium. Springer Verlag, Februar 2014. – ISBN 978-3-937655-31-4
- [69] FISCHER-WOLFARTH, J. : *Advanced MircoSystems for Automotive Applications 2013*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-3-319-00475-4
- [70] FORD: *FIDES - Fixture Design and Evaluation System, Softwareprogramm*. Februar 2007. – Version R4.40
- [71] FRIEDRICH, H. E. ; (HRSG.): *Leichtbau in der Fahrzeugentwicklung*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-3-8348-1467-8
- [72] FRITZ, H. ; SCHULZE, G. : *Fertigungstechnik*. Bd. 10. Auflage. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-29785-4

- [73] FRITZ, W. et.al.: Leichtbaukonzept für ein CO<sub>2</sub>-armes Fahrzeug. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 115. Jahrgang. Springer Verlag, September 2013. – ISSN 0001–2785
- [74] GFRERRER, A. et.al.: Car Side Window Kinematics / University of Technology. 2011. – Forschungsbericht
- [75] GIRDAUSKAITE, L. et.al.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Modellierung und Simulation. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978–3–642–17992–1
- [76] GLANZ, A. ; BÜSGEN, M. : *Machine-to-Machine-Kommunikation*. Campus Verlag, 2013. – ISBN 978–3–593–39896–9
- [77] GLOBAL CAR MANUFACTURERS INFORMATION EXCHANGE GROUP: Description of the Package Drawings and Dimension List. 2005. – Forschungsbericht
- [78] GRABNER, J. : *Konstruieren von PKW-Karosserien*. 3. Auflage. Springer Verlag, 2005. – ISBN 978–3–540–23884–3
- [79] GROTHE, K. H.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschninenbau*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978–3–642–17305–9
- [80] GUSIG, L. O. ; KRUSE, A. : *Fahrzeugentwicklung im Automobilbau*. Hanser Verlag, 2010. – ISBN 978–3–446–41968–1
- [81] GÄNSSLER, R. : *Technisches Zeichnen mit CATIA V5*. Carl Hanser Verlag, 2008. – ISBN 978–3–446–41509–6
- [82] HACKL, H. ; BRUCKNER, J. : Auswirkungen des Multimaterial-Leichtbaus auf die Fügetechnik. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 115. Jahrgang. Springer Verlag, Oktober 2013. – ISSN 0001–2785
- [83] HAGER, F. : Produktionsanlauf einer neuen Technologie am Beispiel des BMW i3. In: *4. VDI Leichtbaukongress Automobilindustrie*, VDI Wissensforum, Juli 2014
- [84] HAIBACH, E. : *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer Verlag, 2006. – ISBN 3–540–29363–9
- [85] HANSEN, J. : *Kochbuch CATIA V5 automatisieren: Von Powercopy bis zur C-Programmierung*. Carl Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978–3–446–41621–5

- [86] HANSEN, P. ; GORES, S. ; MATTHES, F.-C. : *Politiksznarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030: Advances in Systems Analysis 5*. Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, 2014 (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment). – ISBN 9783893369324
- [87] HANSER, E. : *Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP*. Springer Verlag, 2010. – ISBN 978-3-642-12312-2
- [88] HARRICH, A. ; MAYR, J. ; HIRZ, M. et. al.: CAD-based synthesis of a window lifter mechanism. In: *SAE 2010 World Congress and Exhibition*, SAE International, April 2010
- [89] HARRICH, A. ; SINZ, W. et. al.: CAD-basiertes Werkzeug zur Vorauslegung der Crashstruktur eines Frontendmoduls. In: *Kongress SIMVEC Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Baden-Baden*, VDI Verlag, November 2010. – ISBN 978-3-18-092107-5
- [90] HARVARD BUSINESS SCHOOL: Review Automobilentwicklung. Harvard Business School Press, 2005. – Forschungsbericht
- [91] HASLAUER, R. : Der Entwicklungsprozess Karosserie in der Konzept- und Serienphase. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 108. Jahrgang. Springer Verlag, Dezember 2006. – ISSN 0001-2785
- [92] HBB ENGINEERING GMBH: *Unigraphics / NX: Tipps und Tricks aus der Praxis NX5 / NX6*. OrtmannTeam GmbH, 2009. – ISBN 978-3-00-028364-2
- [93] HEHENBERGER, P. : *Computerunterstützte Fertigung*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978-3-642-13475-3
- [94] HENTATI, N. : Auswirkungen von Displays und Touchscreens auf Fahrzeug-HMI. In: *14. Internationales CAR-Symposium 2014*, CAR - Car Center Automotive, Jänner 2014
- [95] HETTERICH, J. : *Integration von ökologischer Nachhaltigkeit als Kundenbedürfnis. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung von Fahrzeuginnenraumkomponenten*, Leuphana Universität Lüneburg, Diss., 2013
- [96] HILLEBRAND, A. ; HIRZ, M. et. al.: Concept Car: A tool for early development phases supporting conceptual vehicle design and evaluation. In: *5. Symposium Virtuelles Fahrzeug*, 2012

- [97] HIRZ, M. et. al.: Advanced computer aided design methods for integrated virtual product development processes. In: *CAD Conference 2011*, 2011
- [98] HIRZ, M. et. al.: *Integrated Computer Aided Design in Automotive Development*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978–3–642–11939–2
- [99] HIRZ, M. : An approach of multi disciplinary collaboration in conceptual automotive development. In: *Special Issue on Collaborative Technologies and Applications*. 2. Volume. International Journal of Collaborative Enterprise, 2011. – DOI: 10.1504/IJ-CENT.2011.040664
- [100] HOFFMANN, M. ; HACK, O. ; EICKENBERG, S. : *CAD/CAM mit CATIA V5: NC-Programmierung, Postprocessing, Simulation*. Springer Verlag, 2005. – ISBN 978–3–642–12312–2
- [101] HOPPE, H. ; ZIMMER, H. et. al.: Multidisziplinäre Optimierung paramterischer Fahrzeugkomponenten. In: *Entwicklung im Karosseriebau*. 1833. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Mai 2004. – ISSN 0001–2785. – Tagung, VDI-Bericht
- [102] HUCHO, W. H.: *Aerodynamik des Automobils*. 5. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2005. – ISBN 3–528–03959–0
- [103] HUMAN SOLUTIONS ASSYST AVM: *RAMSIS AUTOMOTIVE, Softwareprogramm*. Dezember 2012. – Version 3.8.34-1.20
- [104] IIHS: *Insurance Institute for Highway Safety*. Website, . – <http://www.iihs.org/> (14.11.2014)
- [105] JAWAHIR, I. S. et. al.: *Treatise on Sustainability Science and Engineering*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978–94–007–6228–2
- [106] KHALDI, F. : Vorteile des virtual Prototyping als gesamtheitlicher CAE - Asatz. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 113. Jahrgang. Springer Verlag, Jänner 2011. – ISSN 0001–2785
- [107] KLEIN, B. : *FEM*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978–3–8348–2134–8
- [108] KORNPORST, P. : *CATIA V5: Volumenmodellierung*. Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978–3–446–41138–8
- [109] KOTZ, J. : *Erfolgreich Visual Basic 2010 programmieren*. Addison-Wesely Verlag, 2011. – ISBN 978–3–8273–2951–6



- [110] KRAUS, W. : Fahrzeugdesign und alternative Antriebskonzepte. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 111. Jahrgang. Springer Verlag, Juni 2009. – ISSN 0001–2785
- [111] KRISHNA, B. M.: Engineering Design: A System Approach. In: *Handbook of Performance Engineering*. Springer Verlag, 2008. – ISBN 978–184800–130–5
- [112] KUNZFELD, O. M. et. al.: Strukturwandel in der Automobilindustrie – Chancen und Risiken CAx basierter Konzeptentwurfsmethoden im interdisziplinären Spannungsfeld zwischen zunehmender Komplexität und Wettbewerbsdruck. In: *3. Symposium Virtuelles Fahrzeug*, 2010
- [113] KÖHLDORFER, W. : *Finite-Elemente-Methoden mit CATIA V5*. Carl Hanser Verlag, 2005. – ISBN 3–446–40214–4
- [114] KÖHLDORFER, W. : *CATIA V5: Volumenmodellierung, Zeichnungen*. Carl Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978–3–446–41724–3
- [115] LARMAN, C. : *ML 2 und Patterns angewendete-objektorientierte Softwareentwicklung*. Hüftig Jehle Rehm GmbH Verlag, 2005. – ISBN 978–3–8266–1453–8
- [116] LASHIN, G. et.al.: Konstruktionslehre: Hilfsmittel für die Entwicklungs und Konstruktion. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978–3–642–29569–0
- [117] LEHMHUS, D. et. al.: *Structural Material and Processes in Transportation*. Wiley-VCH Verlag, 2013. – ISBN 978–3–527–32787–4
- [118] LEON-ROVIRA, N. : *Trends in Computer Aided Innovation*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 978–0–387–75455–0
- [119] LI, Y. et. al.: Development of Concept Analysis and Multiple - Objective Optimization Platform for Body-In-White Structure. In: *Proceedings of the FISTIA World Automotive Congress 2012*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978–3–642–33738–3
- [120] LINDEMANN, U. : *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978–3–642–01422–2
- [121] LMS: *Statistical Energy Analysis, Softwareprogramm*. 2014. – Version 13.1
- [122] LOBENWEIN, U. ; QUADBECK, M. : Multidisziplinäre Optimierung einer Motorhaube. In: *5. LS-DYNA Anwenderforum*, 2006

- [123] MAIK, H. : *CATIA V5 Flächenmodellierung*. Carl Hansa Verlag, 2006. – ISBN 3-446-40326-4
- [124] MATHES, J. ; BARTH, H. : Weiterentwicklung der Assistenzsysteme aus Endkundensicht. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 116. Jahrgang. Springer Verlag, Februar 2014. – ISSN 0001-2785
- [125] MAYR, J. : Datenbankgestützte parametrisierte Geometrieerstellung und Methodenentwicklung am Beispiel eines PKE-Türinnenblechs / Institut für Fahrzeugtechnik TU Graz. 2009. – Forschungsbericht. – Diplomarbeit
- [126] MAYR, J. ; HIRZ, M. : Ein integrierter Ansatz zur ganzheitlichen Systembetrachtung am Beispiel der konzeptionellen Karosserieentwicklung. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Springer Verlag, Juli 2012. – ISSN 0001-2785
- [127] MAYR, J. ; HIRZ, M. : Integrated approach for geometric and functional validation of vehicle concepts in initial automotive development. In: *NAFEMS World Congress 2013*, 2013 (Proceedings of NAFEMS World Congress). – ISBN 978-1-874376-91-0
- [128] MCMILLAN, M. : *Object-Oriented Programming with Visual Basic.NET*. Cambridge University Press, 2004. – ISBN 978-0-521-53983-8
- [129] MEDYNA, G. ; COATANEA, E. : Decision Making and Value Consideration During the Early Stages of Engineering Design. In: *Global Product Development*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978-3-642-15973-2
- [130] MEERKAMM, H. et.al.: Design for X. In: *Handbuch Konstruktion*. Carl Hanser Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-33738-3
- [131] MEYWERK, M. : *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-49866-7
- [132] MILLER, A. et.al.: 2020 Roadmap / European New Car Assessment Programme. 2014. – Forschungsbericht
- [133] MITSCHKE, M. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag, 2004. – ISBN 3-540-42011-8
- [134] MORELLO, L. et.al.: *The automotive Body*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978-94-007-0516-6
- [135] MSC SOFTWARE: *Adams/Car - Dynamische Berechnung der Fahrzeugkonstruktion, Softwareprogramm*. 2014. – Version 2014)

- [136] MUELLER, N. : Lightweight, heavy Impact. In: *13th Stuttgart International Symposium*, Springer Vieweg Verlag, 2013 (Automotive and Engine Technology 26 and 27 February 2013). – ISBN 978-1-874376-91-0. – McKinsey Company Inc.
- [137] NEITZEL, M. ; MITSCHANG, P. : *Handbuch Verbundwerkwerkstoffe*. Hanser Verlag, 2004. – ISBN 3-446-22041-0
- [138] OSTROSI, E. ; CHOULIER, D. ; KURTH, M. : Decision Making and Value Consideration During the Early Stages of Engineering Design. In: *Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-1-4471-4426-7
- [139] OVTCHAROVA, J. : Informationssysteme in der Produktions- und Konstruktionstechnik (IDPK), Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion (RPK), Universität Karlsruhe (TH), 2003. – Vorlesungsskript
- [140] PAHL, G. et.al.: Konstruktionslehre: Gestaltungsrichtlinien. In: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-3-642-29569-0
- [141] PICKETT, A. K. ; PAYEN, F.-N. : Status and challenges for predictive crash simulation of textile composites. In: *Automotive CAE Grand Challenge 2012*, carhs, April 2012
- [142] PIERALLINI, M. : Alfa 4C: Concept and development of an affordable sporty car. In: *4. VDI Leichtbaukongress Automobilindustrie*, VDI Wissensforum, Juli 2014
- [143] PIRCHER, M. : MAGNA STEYR Development System / MAGNA STEYR Engineering AG und Co KG. 2010. – Forschungsbericht. – Group Standard G10250-1
- [144] PONN, J. ; LINDEMANN, U. : *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-68562-3
- [145] POTTHOFF, J. : *Wegbereiter der modernen Kraftfahrtechnik*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-20302-2
- [146] RIEFLER, B. : Standardisierung von Produktdaten in der Automobilbranche. 2009. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-89936-878-9. – Dissertation
- [147] RIEL, A. et.al.: Integrated Engineering Skills: Improving your System Competence Level. In: *Software Process Improvement*, Springer Verlag, 2008 (15th European Conference, EuroSPI 2008, Dublin, Ireland, September 3-5, 2008, Proceedings). – ISBN 978-3-540-85934-5. – Communications in Computer and Information Science

- [148] ROGALL, H. : *Ökologische Ökonomie: Eine Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008. – ISBN 978-3-531-19058-0
- [149] ROHDE-BRANDENBURGER, K. : Was bringen 100kg Gewichtsreduzierung im Verbrauch - Eine physikalische Berechnung. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 115. Jahrgang. Springer Verlag, Juli 2013. – ISSN 0001-2785
- [150] ROSS, E. : *VB Scripting for CATIA V5*. 3. Auflage. Amazon Distribution, 2013
- [151] ROY, R. ; BAGULEY, R. ; REEVE, L. : Understanding the Link between Aesthetics and Engineering in Product Design. In: *The Future of Product Development*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-69819-7
- [152] ROYCE, W. W.: Managing the Development of Large Software System. In: *IEEE WESCO*, 1970. – ISSN 0018-9235
- [153] SAE INTERNATIONAL: Taxonomy and Definitions of Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. 2014. – Forschungsbericht. – J3016 201401
- [154] SAHR, C. et. al.: Systematische Werkstoffauswahl für die Karosserie des Superlight-Car. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*. 112. Jahrgang. Springer Verlag, Mai 2010. – ISSN 0001-2785
- [155] SCHMID, T. : FCM - Fast Concept Modeller - Fast Parametric Concept Model Development with Direct Interfacing to CAE using Altair HyperMesh Batch Meshing and Batch Assembling. In: *3rd HyperWorks Technology Conference 2009*, 2009
- [156] SCHMID, T. : FCM - Fast Concept Modeller - Optimization of full vehicle concepts using Beam models: New possibilities for model creation with Fast Concept Modeller. In: *7th Weimar Optimization and Stochastic days 2010*, 2010
- [157] SCHOLBER, K. : Markenmanagement der Volkswagen AG: Dargestellt am Modell Phaeton. 2006. – Forschungsbericht. – ISBN 978-3-8324-9211-3. – Diplomarbeit
- [158] SCHUMACHER, A. : *Optimierung Mechanischer Strukturen: Grundlagen und Industrielle Anwendungen*. Springer Verlag, 2005. – ISBN 978-3-5402-6773-7
- [159] SEIFFERT, U. ; (HRSG.), R. G.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. – ISBN 978-3-8348-0345-0
- [160] SFE GMBH: *SFE CONCEPT, Softwareprogramm*. November 2014. – Version 4.5.0

- [161] SHERWOOD, C. : Small Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation Crash Test Protocol (Version II) / Insurance Institute for Highway Safety (IIHS). 2012. – Forschungsbericht. – [www.iihs.org](http://www.iihs.org)
- [162] SHERWOOD, C. : Assessment Protocol - Pedestrian Protection / European New Car Assessment Program (Euro NCAP). 2014. – Forschungsbericht. – [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com)
- [163] SIEBERTZ, K. et. al.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Springer Verlag, 2010. – ISBN 978-3-642-05492-8
- [164] SIEMENS PLM: *NX Weld Assistent, Softwareprogramm; Sonderlizenz*
- [165] SIEMENS PLM: *Teamcenter, Softwareprogramm*. April 2012. – Version 9
- [166] SIEMENS PLM: Automotive Supplier Seminar. 2013. – Forschungsbericht
- [167] SIEMENS PLM AUTOMATION: *FIBERSIM, Softwareprogramm*. März 2012. – Version 2012
- [168] SIEMERS, C. ; SIKORA, A. : *Taschenbuch Digitaltechnik*. Carl Hanser Verlag, 2014. – ISBN 978-3-446-43990-0
- [169] SINZ, W. ; HOSCHOPF, H. ; KASSEGGGER, H. : KasKo – Ein Werkzeug für die Fußgängerschutz-Konzeptauslegung. In: *3. Symposium Virtuelles Fahrzeug*, 2010
- [170] SPUR, G. ; KRAUSE, F. L.: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. Hanser Verlag, 1997. – ISBN 3-446-19176-3
- [171] STADLER, S. ; HIRZ, M. : A contribution to advanced knowledge-based design in the development of complex mechanical products. In: *IECD 2013-Proceedings*, The Design Society and the Creative Design Institute (CDI), August 2013. – ISBN 978-1-904670-54-4
- [172] STAPELBERG, R. F.: *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-1-84800-175-6
- [173] STROUD, I. ; NAGY, H. : *Solid Modelling and CAD Systems*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978-0-85729-259-9
- [174] STRYCZEK, R. ; KEMPINGER, K. : Die Karosserie des BMW i8. In: *4. VDI Leichtbaukongress Automobilindustrie*, VDI Wissensforum, Juli 2014

- [175] TECKLENBURG, G. : Design of Automotive Body Assemblies with Distributed Tasks under Support of Parametric Design (PAD) / University of Hertfordshire. 2010. – Forschungsbericht
- [176] TECKLENBURG, G. et. al.: *Die digitale Produktentwicklung*. Expert Verlag, 2008. – ISBN 978-3-8169-2776-1. – Haus der Technik Fachbuch
- [177] TECKLENBURG, G. et. al.: *Die digitale Produktentwicklung II*. Expert Verlag, 2010. – ISBN 978-3-8169-2961-1. – Haus der Technik Fachbuch
- [178] THUM, K. ; HIRZ, M. ; MAYR, J. : An integrated approach supporting design, simulation and production engineering of connection techniques in automotive body-in-white development. In: *CAD Conference and Exhibition, 2013 (Computer-Aided Design and Applications)*. – ISSN 2291-1987
- [179] TRANSCAT: *CAVA - CATIA V5 Automotive Extensions Vehicle Architecture, Softwareprogramm*. Oktober 2014. – Version 1.25.2
- [180] TRANSCAT: *Q-Checker, Softwareprogramm*. Juli 2014. – Version 5.2.3
- [181] VAN BASSHUYSEN, R. ; SPICHER, U. : *Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial*. Springer Vieweg, 2013 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-658-01408-7
- [182] VANJA, S. et. al.: *CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-36038-4
- [183] VANJA, S. et. al.: *Integrated Design Engineering*. Springer Vieweg Verlag, 2014. – ISBN 978-3-642-41104-8
- [184] Norm VDI2209 März 2009. *3-D-Produktmodellierung Technische und organisatorische Voraussetzungen Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis*
- [185] Norm VDI2218 Mai 1993. *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung: Feature-Technologie*
- [186] Norm VDI2221 Mai 1993. *Methodik zu Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Module*
- [187] Norm VDI2235 Oktober 1987. *Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren. Methoden und Hilfsmittel*

- [188] Norm VDI5610 März 2008. *Wissensmanagement im Engineering; Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*
- [189] VERSACE, J. : A review of the Severity Index. In: *Stapp Car Crash Conference*, 1971 (SAE Paper)
- [190] VÖLKER, R. et.al.: *Wissensmanagement im Innovationsprozess*. Physica-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-7908-1692-1
- [191] WALKER, A. J. ; COX, J. J.: Virtual Product Development Models: Charakterization of Global Geographic Issues. In: *Computer Aided Innovation CAI*. 227. Jahrgang. Springer Verlag, 2008. – ISBN 978-3-387-09697-4
- [192] WALLISER, S. : Lightweight Design in new Dimensions - The Plug-In Hybrid Supersportscar 918 Spyder. In: *4. VDI Leichtbaukongress Automobilindustrie*, VDI Wissensforum, Juli 2014
- [193] WANSART, J. : *Analyse von Strategien der Automobilindustrie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen und zur Markteinführung alternativer Antriebe: Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der kalifornischen Gesetzgebung*. Springer Verlag, 2012 (Produktion und Logistik). – ISBN 978-3-834-94498-6
- [194] WEBER, C. : What is a Feature and What is its Use? In: *29th International Symposium on Automotive Technology and Automation 1996 (ISATA 96)*. ISATA 96, June 1996. – Results of FEMEX Working Group I
- [195] WEBER, J. : *Automotive Development Process*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-642-01253-2
- [196] WEISBERG, D. E.: *The Engineering Design Revolution*. ebook, 2008
- [197] WERDICH, M. : *FMEA - Einführung und Moderation*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-8348-1787-7
- [198] WILDEMANN, H. : Simultaneous Engineering als Baustein für Just-In-Time in Forschung, Entwicklung und Konstruktion. In: *VDI-Z Fachzeitschrift*. VDI, 1992
- [199] WINNER, H. ; HAKULI, S. ; WOLF, G. : *Handbuch Fahrassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-8348-0287-3
- [200] WINNER, H. ; WACHENFELD, W. : Absicherung automatischen Fahrens. In: *6. FAS-Tagung*, 2013 (Der Weg zum automatischen Fahren)

- [201] ZHANG, J. et. al.: Study on Lightweight of Vehicle Body Structure based on Implicit Parametric Model. In: *Proceedings of the FISTIA World Automotive Congress 2012*. Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-642-33738-3
- [202] ZIEHTEN, D. R.: *CATIA V5 Makroprogrammierung mit Visual Basic Skript*. Hanser Verlag, 2006. – ISBN 978-3-446-40325-3
- [203] ZIEHTEN, D. R.: *CATIA V5 Makroprogrammierung mit Visual Basic Skript*. Hanser Verlag, 2011. – ISBN 978-3-446-42494-4
- [204] ZIMMER, H. : A Parametric and Modular Approach Towards the Simulation-Driven Seamless Design Process. In: *NAFEMS World Congress 2013*, 2013 (Proceedings of NAFEMS World Congress). – ISBN 978-1-874376-91-0



# Anhang

## Anhang A: Evaluierung des Modellierungswerkzeuges FCM

In der initialen Geometrierstellung führen parametrisch assoziative Definitionen zu einem erhöhten Zeitaufwand, welcher in der Konzeptphase nachteilig ist, siehe Abbildung 2.15. Dies ist bei modernen CAD-Systemen zu beobachten und führt zu zusätzlichen Lösungsansätzen. Um diese methodische Ansätze für die Konzeptphase zu beurteilen, wurde das native CAD-System CATIA V5 und ein konzeptionelles Modellierungswerkzeug (FCM 'Fast Concept Modeler' [37]) im Rahmen der Karosseriekonstruktion verglichen. Die Modellierung des FCM basiert auf der Funktionalität des Programmes CATIA V5 und erweitert diese anhand spezieller Geometriefunktionen, der Vergabe von Bauteileigenschaften in CAD-Modell, der Definition von Verbindungstechnik und einer automatisierten Übergabe an verschiedene FE-Solver. Der FCM zielt besonders auf die Durchgängigkeit von der Geometrierstellung zur Strukturbewertung anhand Finite-Elemente-Methoden ab. Die Erstellungsmethode und Strukturierung des FCM im Modell, siehe Kapitel 2.4.3, wurde im Rahmen der Strukturkonstruktion eines Fahrzeuges im A-Segment angewendet, siehe Abbildung A.1.

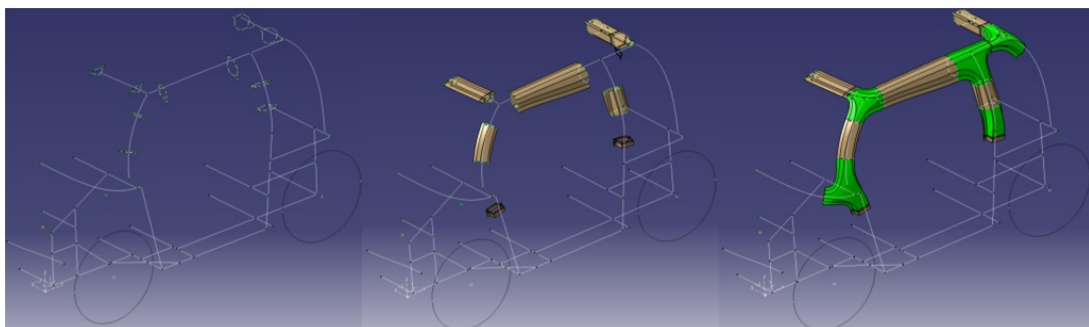


Abbildung A.1: Aufbau des FCM Strukturmodelles anhand eines Skeletts, 2D-Schnitte und vereinfachten Flächen

Die Anforderungen zur Gestaltung der beiden konzeptionellen Strukturmodelle bestand in einer deckungsgleichen Lage von Anbindungsflächen und Stylingflächen, sowie der bauraumkonformen Lage zu weiteren Komponenten und dem Innenraum. Abbildung A.2 zeigt die optische Gegenüberstellung der beiden Strukturmodelle.

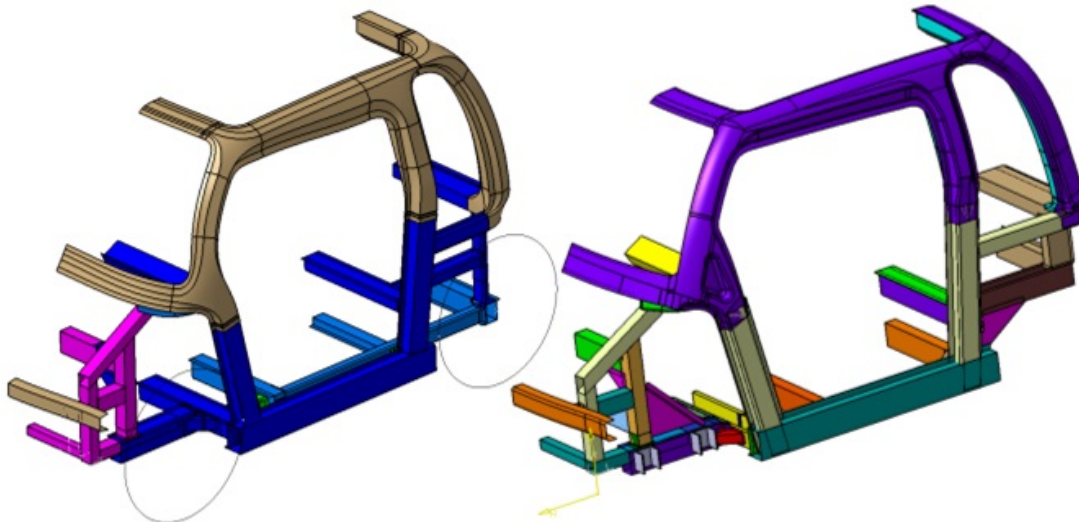


Abbildung A.2: Vergleich eines Konzeptmodelles in FCM (740 Flächensegmente) zur nativen CATIA V5 Konstruktion (1276 Flächensegmente)

Vorteile des Konzeptmodellierungsprogrammes ergeben sich aus der Notwendigkeit zur Abstraktion der Geometrie und der Konzentration auf geometrische Objekte, welche für den Einsatz in der Konzeptphase besonders geeignet sind. Die geometrischen Funktionen des Programmes FCM zeigen in der getesteten Konfiguration Potential in Bezug auf Stabilität in der Modellierung, beispielsweise bei Änderung von Skizzenlagen und Abstandsdarstellung von Anlageflächen ('Flange', 'Map'). Flächen des FCM basieren auf CATIA V5 Skizzen. Flächen der Konzeptmodellierung zeigen Redundanzen zu bestehenden Flächenfunktionen in CATIA V5 ('Junction') bei teilweise reduzierten Funktionsumfang und geringerer Stabilität. Durch eine reduzierte Auswahl von Funktionen kann ein erhöhter Erstellungsaufwand entstehen, falls komplexere Problemstellungen (Auslaschungen von Flanschflächen, Übergangsbereich A-Säule, Übergangsbereich C-Säule) durch aufwändige Hilfskonstruktionen umgesetzt werden müssen. Positiv zu bewerten ist die vereinfachte Struktur der geometrischen FCM-Objekte im Strukturbaum, da Referenzelemente eines geometrischen Objektes an diesem aggregiert sind. Daraus ergibt sich eine vereinfachte logische Struktur im Bauteil. Erzeugte geometrische Module und Prinzipschnitte können anhand von integrierten Funktionen datenbankbasiert anhand des Modellierungswerkzeuges abgelegt und wiederverwendet werden. Eine Ansteuerung von geometrischen Elementen über Automationsschnittstellen wird nicht unterstützt.

Der Aufbau eines Rohbaus im FCM bringt geringe Zeitvorteile im Vergleich zu nicht parametrisch konstruierten Modellen in CATIA V5 und deutliche Vorteile bei nachfolgenden Modifikationen. Ein stärkerer Zeitgewinn ist durch die Nutzung von Templates möglich, welche durch geeignete Strukturierung auf neue Anforderungen reagieren können. Eine Anforderung im Entwicklungsprozess ist die Darstellung eines durchgängigen geometrischen Datenstandes im Autorensystem. Dies impliziert die Überführung von Konzeptgeometrie in die Serienentwicklung. Die erstellte Konzeptgeometrie kann durch Funktionen des nativen Autorensystems weiter detailliert werden. Um freigabefähige Bauteile zu generieren ist jedoch eine neue Modellierung von Komponenten erforderlich. Die integrierten Schnittstellen zur Übergabe an Vernetzungsprozeduren inklusive der Bauteileigenschaften stellen eine Vereinfachung zur durchgängigen Übergabe der Daten an die Berechnungsschnittstelle dar. Bestehende Übergaberoutinen zwischen CAD und Pre-Processing müssen durch die FCM-CAE Interaktion durch weitere Prozesse erweitert werden, dazu zählen Methoden für netzunabhängige Verbindungstechnik.

Um Aussagen bezüglich des Erstellungs- und Anwendungsaufwandes von geometrischen Modellen treffen zu können, wurde im ersten Schritt ein Modellierungswerkzeug für die Konzeptphase und die native Konstruktion im CAD-System verglichen. Beide Werkzeuge bieten als Erweiterung zur geometrischen Modellierung Methoden zur Verwaltung wissensbasierter Modelle. Der Vergleich der Modellierungswerkzeuge zeigt, dass der zeitliche Modellierungsaufwand anhand konzeptioneller Werkzeuge im Vergleich zu einer nicht parametrisch, hierarchisch aufgebauten Modellierung ähnlich ist. Die Erstellung von schematisch ähnlichen Bauteilen wie Profilbauteilen, wird durch spezielle Funktionen des Konzeptmodellierers deutlich beschleunigt. Die Erstellung von Formbauteilen, Gußknoten und Bauteilübergängen hingegen ist aufgrund des reduzierten Umfangs von Modellierungsfunktionen im Konzeptmodellierer nur bedingt möglich. Dies führt teilweise zu erheblichen Aufwänden in der Darstellung der gewünschten Bauteile oder lässt die Modellierung der gewünschten Lösung nicht zu. Ein Mehrwert von Konzeptmodellierungsprogrammen im Vergleich zur konventionellen Konstruktion (siehe Kapitel 2.4.2), ergibt sich aufgrund einer vereinfachten Parametrik und stabilen Verknüpfung von geometrischen Objekten, welche zu einem reduzierten Änderungsaufwand führen. In Bezug auf die schnelle Gestaltung von Produktmodellen zeigen daher die native Konstruktion im CAD-System als auch Konzeptmodellierungsprogramme Vor- und Nachteile. In Tabelle A.1 sind die Evaluierungsergebnisse des Vergleich des nativen Strukturmodelles mit dem FCM-Modell zusammengefasst.

Tabelle A.1: Vor- und Nachteile des Konzeptmodellierungsprogrammes FCM im Vergleich zur nativen Konstruktion in CATIA V5

Funktionsgruppe	Vor- und Nachteile
Funktionsumfang der Geometriegestaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ schnelle Erstellung vereinfachter Geometrie</li> <li>+ Weiterverarbeitung anhand nativer Funktionen</li> <li>- zentrales Modell (nur ein Anwender)</li> <li>- eingeschränkte Möglichkeiten für Details</li> <li>- Redundanzen zu nativen CAD-Funktionen</li> <li>- reduzierte Anzahl von Funktionen</li> <li>- Keine Steuerbarkeit der Flächenqualität</li> <li>- Keine Einbeziehung von Stylingflächen</li> <li>- reduzierte Stabilität (z.B: Flange-Offset)</li> <li>- nicht eindeutige Lage der 2D-Schnitte im Raum</li> <li>- keine Definition spezifischer Formen (z.B: Planarität)</li> <li>- keine Einbeziehung von Fertigungsaspekten</li> <li>- eingeschränkte Definition der Flanschbereiche im 2D</li> <li>- aufwändige Darstellung von 3D-Übergangsbereichen</li> </ul>
Methodisches Steuerungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ zentrales Konzept zur Systemsteuerung</li> <li>+ Eingebettet in Styling und Fahrzeugarchitekturprozesse</li> <li>- keine alternative Steuerungsmöglichkeiten</li> </ul>
Eignung für technische Bauweise	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ vereinfachte Gestaltung Stahl-Schalenbauweise</li> <li>- erhöhter Aufwand für alternative Konzepte bzw.</li> <li>- keine Lösung für neue Technologien (z.B: FVK)</li> </ul>
Aufwand zur Geometrieerstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gering für vereinfachte Modelle</li> <li>- hoch für komplexe Modelle</li> </ul>
Parametrisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringer Aufwand für einfache Modelle</li> <li>- geringe Möglichkeiten für komplexe Modelle</li> </ul>
Flexibilität des Modelles	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gute Eignung für globale Systemänderungen</li> <li>+ hohe Adaptionsfähigkeit der geometrischen Objekte</li> </ul>
Modellstruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Vereinfachte Baumstruktur</li> <li>- nicht individuell anpassbar</li> <li>- hoher Aufwand zum Aus/Einblenden von Sub-Elementen</li> </ul>
Automation der FCM-Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine verfügbare Automationsschnittstelle</li> </ul>
Integration nachfolgender Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Definition der Lastsituation im CAD</li> <li>+ Integrierte FEM-Vernetzung</li> <li>+ Visualisierung des FE-Netzes im CAD</li> <li>+ Methoden zur Verbesserung der Netzqualität</li> <li>+ Verwaltung von Bauteilmetadaten</li> <li>+ Updateroutinen für Verbindungstechnik (VT)</li> <li>- Eingeschränkte Definition der Kontaktflächen</li> <li>- Aufwand zur Definition der VT-Trägerflächen</li> <li>- Eingeschränkte Metadatenzuweisung zur VT</li> <li>- Zusätzliche Schnittstellen für VT erforderlich</li> </ul>

## Anhang B: Optimierungsalgorithmus Scheibenabsenkung

Im folgenden Kapitel wird das Konzept des Optimierungsalgorithmus der Seitenscheibenabsenkung, siehe Kapitel 3.2.3 erläutert.

### Zielgeometrie

S Schraubfläche mit minimalem Abstand zur Stylingfläche unter Einbeziehung von kinematischen Anforderungen und Bauraumrandbedingungen

### Eingangsinformation

$S_i$	Stylinginput der Seitenscheibe
$PP(x/y/z)$	Bauraumzielpositionen in abgesenkter Position als Punktdefinition
$PA_1(x/y/z)$	Anbindungspunkt 1 des Hebersystems
$PA_2(x/y/z)$	Anbindungspunkt 2 des Hebersystems
$BR$	Begrenzende Kurve von $S_i$ an der Dichtungslinie der Brüstung
$BS$	Begrenzende Kurve von $S_i$ an der Dichtungslinie B-Säule
$DK$	Begrenzende Kurve von $S_i$ an der Dichtungslinie der Dachkurve
$SP$	Begrenzende Kurve von $S_i$ an der Dichtungslinie des Spiegeldreiecks

### Aufbereitung der Eingabeinformation

$P_i$	Diskretisierungspunkte von $S_i$
$BR_j$	Diskretisierungspunkte von $BR$
$BS_k$	Diskretisierungspunkte von $BS$
$DK_l$	Diskretisierungspunkte von $DK$
$SP_m$	Diskretisierungspunkte von $SP$
$P_1$	Extrempunkt von $BS$ in positiver Z-Richtung
$P_2$	Teilungspunkt von $BS$ im Verhältnis 0.5
$P_3$	Extrempunkt von $BS$ in negativer Z-Richtung
$P_4$	Extrempunkt von $BR$ in negativer X-Richtung
$t$	Gewichtung von $P_i$
$u$	Gewichtung von $BR_i$
$v$	Gewichtung von $BD_i$
$w$	Gewichtung von $DK_i$
$x$	Gewichtung von $SP_i$
$y$	Gewichtung der Gleichlaufbedingung
$z$	Gewichtung der Bauraumrandbedingungen

### Allgemeine Parameter

$I$	fortlaufende Nummer der Iteration
$K$	Optimierungskriterium

### Geometrische Objekte und Steuerkriterien der Iteration der Schraubachse

$F$	$= P_3 + d \cdot t$ : Geradengleichung der Iterationsgerade ( $\parallel$ zur $S_A$ )
$f$	$= P_{I(x/y/z)} - P_{3(x/y/z)}$ : Basisvektor der Iterationsgerade
$E_4$	Ebene normal zu $d$ durch $P_4$
$a$	Skalar zur zirkularen variation der Iterationsrichtung von $P_I$
$b$	Skalar zur linearen Variation des Iterationsabstandes von $P_I$ mit $b_0 = 5mm$
$\vec{e}(\rho, \phi, d)$	Richtungsvektor in Zylinderkoordinaten, Pol ist $P_3$
$\vec{e}(\rho, \phi, d)_0$	Startvektor bestimmt durch die Projektion der Z-Achse auf $E_4$
$P_I$	Variationspunkt zur Durchführung der Iteration
$P_{I0}$	$= P_4$ Startpunkt der Iteration
$P_{Im}$	Variationspunkt eines gefundenen Minima einer Iterationsschleife
$P_{Icircular}$	$= P_4 + e(\rho_{const}, \phi_{\neq 0} \cdot a_{var}) \cdot b_{const}$ zirkulare Variation von $P_I$
$P_{Ilinear}$	$= P_4 + e(\rho_{const}, \phi_{const} \cdot a_{const}) \cdot b_{var}$ lineare Variation von $P_I$

### Geometrische Objekte zur Ermittlung der Schraubparameter

$E_{3(d,P_3)}$	Ebene normal zu $f$ durch $P_3$
$P_{1n(x/y/z)}$	Normalprojektion von $P_1$ auf $E_3$
$P_{2n(x/y/z)}$	Normalprojektion von $P_2$ auf $E_3$
$K$	Kreis auf $E_3$ festgelegt durch $P_{n1}, P_{n2}, P_3$
$P_{K(x/y/z)}$	Kreismittelpunkt von $K$
$r$	Radius von $K$
$S_A$	$= P_K + c \cdot f$ generierte Schraubachse mit dem Skalar $c$
$P_{1A}$	ist die Normalprojektion von $P_1$ auf $S_A$
$P_{3A}$	ist die Normalprojektion von $P_3$ auf $S_A$
$L_1$	ist die Verbindungslinie von $P_1$ und $P_{1A}$
$L_3$	ist die Verbindungslinie von $P_3$ und $P_{3A}$
$\delta$	ist der gemessene Winkel in Grad zwischen $L_1$ und $L_3$
$h$	ist der Normalabstand von $P_1$ zu $E_3$
$p$	$= h/(2r\Pi \cdot \delta/360)$ Steigung der Schraublinie und dessen Berechnung

**Generierte Kriterien**

- $r_1$  Radius der ersten Führungsbahn, basierend auf der Verschraubung von  $PA_1$   
 $r_2$  Radius der ersten Führungsbahn, basierend auf der Verschraubung von  $PA_1$

**Optimierungskriterium**

$$D = \sum_1^i (\Delta P_i - S) \cdot t + \sum_1^j (\Delta BR_j - S) \cdot u + \sum_1^k (\Delta BS_k - S) \cdot v + \sum_1^l (\Delta DK_l - S) \cdot w + \sum_1^m (\Delta SP_m - S) \cdot x + |r_1 - r_2| \cdot y + |\Delta PP_n - S| \cdot z \quad (\text{A.1})$$

- $D_m$  Gefundenes Minima des Optimierungskriteriums einer Iteration  
 $D_{last}$  Bisher gespeichertes Minima des Optimierungskriteriums  
 $A_{Kabs}$  Absolutes Abbruchkriterium der Iteration

**Optimierungsablauf**

- Start des Algorithmus
  1. Automatisierte Aufbereitung der Eingabeinformation
  2. Automatisierte Vermessung der abzusenkenden Weglänge
  3. Erzeugen der Schraubfläche  $S$  welche für jede Iteration aktualisiert wird
- Iteration
  1. Generierung der Baseline-Geometrie der Iteration 0 mit  $P_{Im} = P_{I0}$
  2. Prüfen ob  $D < A_{Kabs}$  und Abbruch der Optimierung bei Erfüllung
  3. Setzen von  $D_m = D$
  4. Start der zirkularen Iteration mit  $0 < \phi < 360$ Grad in 10-Grad Schritten
  5. Hinterlegen des geringsten Kriterienwerts  $D_m$ 
    - (a) Falls  $D_m < D_{last}$ 
      - i. Prüfen ob  $D_m < A_{Kabs}$  und Abbruch der Optimierung bei Erfüllung
      - ii.  $D_{last} = D_m$ ;  $P_{Im} = P_I$
      - iii. Es folgt eine lineare Iteration mit  $b = b + b_0$  in der Schleife
        - A. Falls  $D < D_{last}$  folgt  $D_{last} = K$ ;  $P_{Im} = P_I$  und  $b = b + b_0$
        - B. Falls  $D > D_{last}$  Start einer weiteren zirkularen Iteration mit Neuberechnung von  $f$  mit  $P_{Im}$
    - (b) Falls  $D_m > D_{last}$ 
      - i. Reduktion des Winkelbereiches mit  $b = b/2$
      - ii. Start einer weiteren zirkularen Iteration

iii. Sofern drei zirkuläre Iterationen mit einer Halbierung von  $b$  nicht zu  $Km < K_{last}$  führen wird die Optimierung abgebrochen

- Erzeugung der finalen Schraubfläche
  1. Erzeugung einer Schraublinie  $SL$  anhand der ermittelten Schraubparameter
  2. Mittelungsverfahren zur Generierung einer optimal angenäherten erzeugenden Kurve  $EK$
  3. Generierung der Trägerfläche  $TF$  durch Verschraubung von  $EK$  entlang  $SL$
  4. Erzeugung der neuen Scheibenfläche  $S_n$  durch Beschnitt von  $TF$  wahlweise mit den Stylingrandkurven oder den Schraublinien im Bereich von  $BS$  und  $SP$
- Absenkung der Scheibenpositionen
  1. Definition der Verschraubungshöhe über den erforderlichen Absenkweg
  2. Erzeugung von Schraublinien  $SL_1$  und  $SL_2$  an den Befestigungspunkten  $PA_1$  und  $PA_2$
  3. Sofern erforderlich Approximation von  $SL_1$  und  $SL_2$  durch Kreisbögen  $KB_1$  und  $KB_2$  durch drei Punkte mit einem Verhältnis von 0.16, 0.5 und 0.84.
  4. Verschiebung von  $S_n$  entlang von  $SL_1$  und  $SL_2$  oder  $KB_1$  und  $KB_2$  anhand einer konstanten Weglänge auf beiden Bahnen zur Simulation des realen Absenkungsverhaltens
  5. Optionale Verschiebung der Stylingfläche
  6. Optionale Messung des Dichtungseingriffes der verschiedenen abgesenkten Positionen
- Analyseschnitte
  1. In den Bereichen des Dichtungseingriffes zur Darstellung der Dichtungsdeformation
  2. Im Bereich des Positionierungspunktes  $PP$

Zur Demonstration der Funktionalität wird im folgenden Beispiel von einer denkbar ungünstige Flächenform ausgegangen, siehe Abbildung A.3. Eine vorliegende tonnenförmigen Fläche, welche nahezu absenkbar ist, wurde in eine gebeulte Fläche übergeführt. Dies wurde durch einen externen Punkt mit einem Normalabstand von 80mm zur Ausgangsfläche im Schwerpunkt der Eingangsscheibe umgesetzt, wobei die Randkurven der Scheibe beibehalten wurden. Die Eingabefläche erfüllt in diesem Fall unter keinen Umständen eine Verschiebung ohne Dichtungsdeformation. Für den Optimierungsdurchlauf wurde eine mittlere Gewichtung der Gleichlaufbedingung gewählt, sowie keine bauraumrelevante Zielposition definiert. Das Ziel des Durchlaufes ist eine absenkbare Scheibe zu generieren, welche eine minimale Abweichung von der Eingabefläche aufweist.



Anhand des Optimierungsalgorithmus wurde eine Schraubfläche mit einer Abweichung von 57,9mm zur nicht absenkbaaren Eingabefläche generiert. Die abgesenkten Positionen der Scheibenabsenkung weisen hierbei eine maximale Abweichung zur Trägerfläche von 0.142mm auf. Diese Abweichung resultiert aus der eingestellten

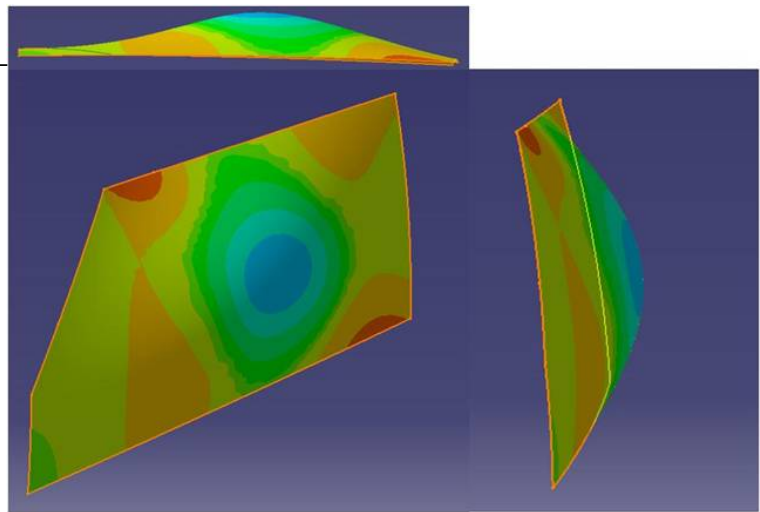


Abbildung A.3: Darstellung einer nicht absenkbaaren Eingabefläche Gewichtung der Gleichlaufbedingung, welche in einer Differenz der Radien der Führungsbahnen von 1622,6mm zu 1620,4mm führt. Bei Verschiebung der Scheibe um einen jeweils konstanten Wert auf der Führungsbahn ergibt sich daher eine geringe Winkeländerung der Scheibenlage während der Absenkung.

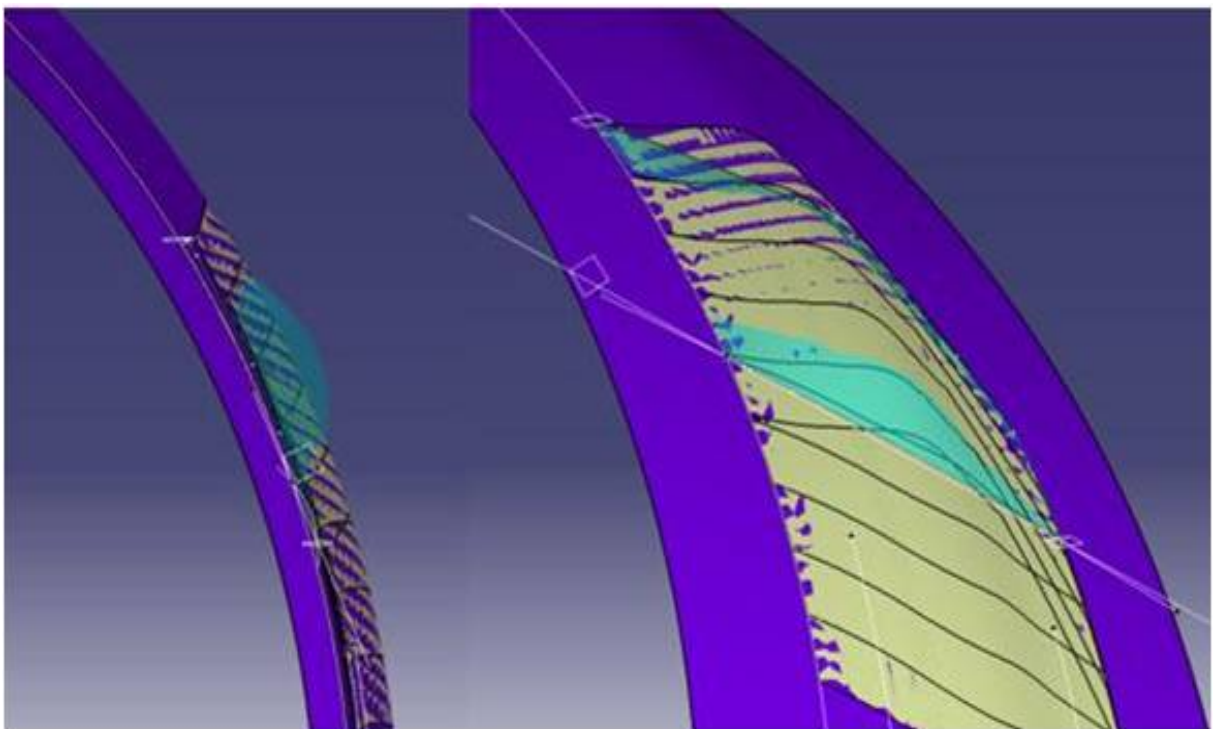


Abbildung A.4: Visualisierung der Flächendifferenz der optimierten Trägerfläche (violett) und Absenkungspositionen (gelb) sowie der nicht absenkbaaren Eingabefläche (türkis) im Raum

Der gewählte Fall stellt ein Extremum der Anwendung dar und demonstriert die Leistungsfähigkeit des Optimierungsansatzes für zielkonfliktbehaftete Kriterien. Für einfachere Eingabeflächen resultieren in der Regel deutliche geringere Abweichungen von Eingabe zu Ausgangsfläche von wenigen Millimetern. Diese Abweichung der Eingabefläche und der generierten Schraubfläche entspricht einer Deformation der Dichtung bei Absenkung, sofern keine Adaption der Scheibenfläche eingebracht wird. Bei minimaler Abweichung von Styling- und Schraubfläche kann die Eingabefläche weiterverwendet und durch die erzeugte Kinematik abgesenkt werden. Da die seitliche Vorderscheibe und seitliche Hinterscheibe unterschiedliche Schraublinien besitzen, da sich die B-Säule nach oben hin verjüngt, sind die jeweiligen Einzelflächen in Einklang zu bringen. Durch eine Adaption der Dachkurve und simultaner Analyse beider Scheiben kann eine gemeinsame Trägerfläche erarbeitet werden, welche die Kriterien der Absenkbarkeit und des vorgegebenen Bauraumes erfüllt.

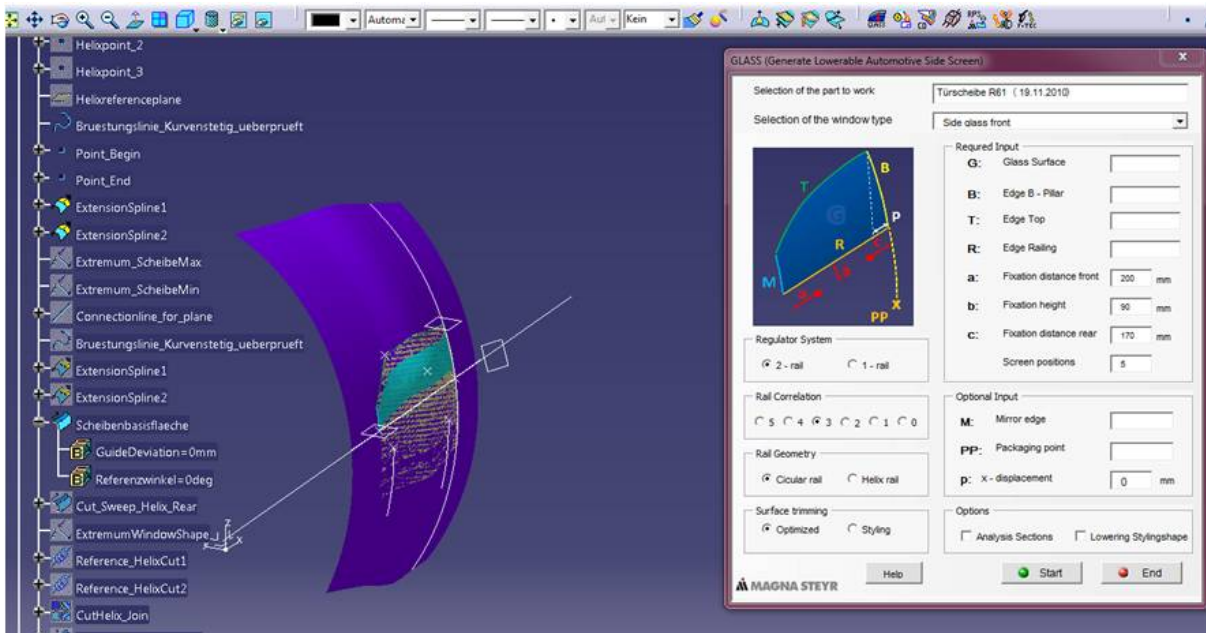


Abbildung A.5: Darstellung des Auslegungsmodelles der Scheibenabsenkung im CAD und der in CATIA V5 integrierte Benutzeroberfläche und Algorithmus für eine Auslegung in der Entwicklungsumgebung

Durch die Integration der Lösung direkt in die Entwicklungsumgebung ist die direkte Verarbeitung der Eingabeinformationen, wie Stylingscheibe, Randkurven und erforderliche Bauraumpositionen, möglich. Erarbeitete Lösungsvorschläge des Algorithmus können direkt visualisiert und bewertet werden. Darüber hinaus steht ein breites Spektrum von Analysefunktionen im CAD-System zur Verfügung, um die funktionalen Eigenschaften zu überprüfen.

## Anhang C: Beschreibungen der programmierten Lösungen

### ConceptBIW

Das Konzept der Strukturentwicklung in einem nativen CAD-System in Kapitel 3.1.1 wird durch ein programm-basiertes Werkzeug unterstützt. Das Strukturmodell kann jedoch ohne die angeführte Programmerweiterung für sich bearbeitet werden und benötigt keine Sonderlizenzen im Autorensystem. Der Nutzen aus der Anwendung ergibt sich aus einem reduzierten Aufwand für eine Modelladaption, administrative Arbeitsschritte, als auch für die Datenversorgung von Schnittstellen für weitere Entwicklungssystemen. Die Interaktion des geometrischen Modelles mit der Programmerweiterung ist integral mit der spezifizierten Bauteilstruktur verknüpft. Die Benutzeroberfläche ist zur einfachen Bearbeitung direkt in der Entwicklungsumgebung integriert. Eckdaten der Anwendung sind:

- Umsetzung in Visual Basic for Applications
- Direkt integriert in CATIA V5 mit interaktiver Benutzeroberfläche
- 6 Routinen mit rund 4300 Codezeilen
- Resultate:
  1. Routine zur Detektion von Strukturfehlern einer CATIA Produktstruktur
  2. Funktion zur Adaption von Konzeptflächen auf Stylingeingaben
  3. Tauschen von Referenzen von Skelettelementknoten
  4. Erstellung und Verwaltung von Bauteilmetadaten
  5. Automatisierte DMU-Schnitterstellung an definierten Strukturschnitten
  6. Visualisierung von Elementtypen (Schnitt, Skalierung, Führungskurven...)
  7. Automatisierter Export zur Finite-Elemente Modellerstellung



Abbildung A.6: Programmerweiterung für den konzeptionellen Rohbau

### GLASS

GLASS steht für 'Generate Lowerable Automotive Side Screen'. Idee und Nutzen des Algorithmus wird in Kapitel 3.2.3 beschrieben. Der zugrundeliegende Algorithmus für konventionelle Seitenscheiben ist im Anhang B behandelt. Der gesamte Funktionsumfang umfasst neben der Absenkung von konventionellen Seitenscheiben für die vordere und hintere Seitentüre auch eine kinematische Auslegung von Cabrioscheiben. Die Methode der Absenkung einer Cabrioscheibe folgt einem konträren Ansatz. Anstatt eines kriterienbasierten Optimierungsalgorithmus wird auf geometrische Randbedingungen des Dichtungsdurchganges an der Brüstung aufgesetzt. Die räumliche Kinematik folgt keiner Regelbewegung und kann eine beliebige räumliche Ausprägung annehmen. Anhand einer assoziativen Hinterlegung der Zusammenhänge im Bauteilmodell kann durch eine Eingabemaske die initiale Auslegung in Bezug auf Bauraumlage und lokale Detailbewegung erfolgen. Darunter fallen insbesondere die Bewegung der Scheibe aus der Dichtung in X- und Y-Richtung. Eckdaten der Anwendung sind:

- Umsetzung in Visual Basic for Applications
- Direkt integriert in CATIA V5 mit interaktiver Benutzeroberfläche
- Kernroutine mit 4800 Codezeilen
- Funktionsumfang
  1. Auslegung einer konventionellen Scheibenabsenkung auf Kreisbahnen
  2. Auslegung einer konventionellen Scheibenabsenkung auf Schraubkurven
  3. Auslegung einer konventionellen Scheibenabsenkung 2-Schienensystem
  4. Auslegung einer konventionellen Scheibenabsenkung 1-Schienensystem
  5. Auslegung Cabrioscheibenabsenkung Kulissenführung
- Resultate:
  1. Absenkbare Basisfläche mit Überstand
  2. Absenkbahnen für Eingabefläche und optimierte Fläche verwendbar
  3. Verschiedene Beschnittvorschläge
  4. Abgesenkte Scheibenpositionen mit konstantem Verfahrensweg auf Absenkbahnen
  5. Kontrollschnitte über die Dichtungspositionen
  6. Analysefunktion der Länge des Dichtungseingriffs je Absenkposition je Dichtung (Auswirkung auf Kräftesituation)

## ConceptConn

Das Werkzeug zur Übergabe der Verbindungstechnik, siehe Kapitel 3.2.1, wurde zur unterstützten Generierung von punkt- und linienförmiger Verbindungstechnik in der vorliegenden Arbeit aufgebaut. Abbildung A.7 zeigt die Benutzeroberfläche des umgesetzten Werkzeugs. Durch eine Selektion der zu fügenden Bauteile können automatisiert die relevanten Daten der Bauteile wie Bauteilnummer, Material, Wandstärke oder Oberflächenbeschichtung ausgelesen und in Metadaten die Fügepaarung integriert werden.

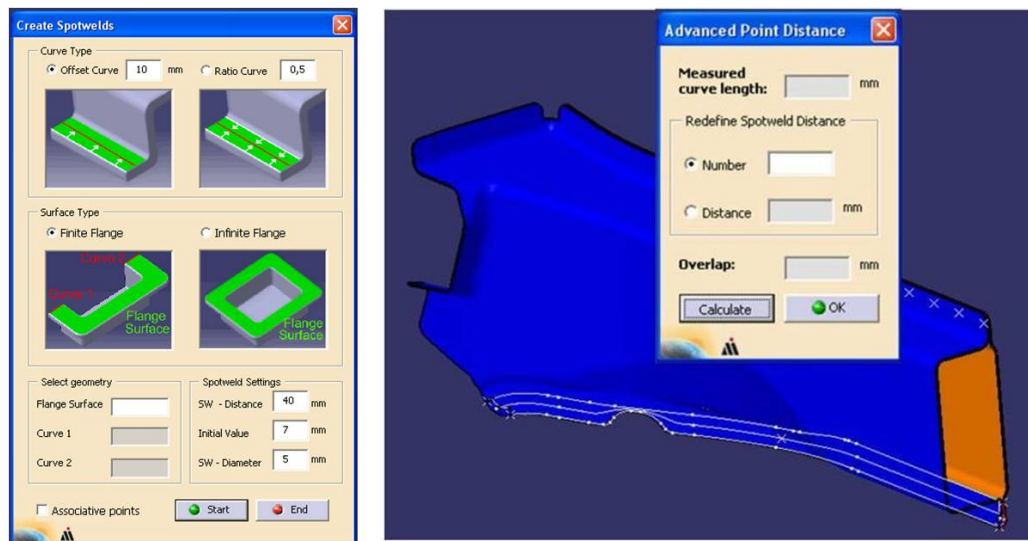


Abbildung A.7: Werkzeug zur vereinfachten Erstellung von Verbindungstechnik

Die Optionen bestehen in der Generierung von Positionen mit konstantem Abstand von einer Referenzkurve und von äquidistanten Positionen zwischen zwei Kurven. Für punktförmige Verbindungsarten wird in erster Instanz eine Referenzkurve erzeugt, welche nach einem der beiden genannten Optionen gestaltet werden kann. Basierend auf der Referenzkurve kann eine Abstandsverteilung (z.B. Schweißpunkt Abstand) vorgegeben werden, welche im Anwendungsfall zumeist keinen sauberen Abschluss am Ende einer Kontaktfläche ergibt. Durch eine Kalkulationsfunktion wird ein der Kurve angepasster Abstand der Verbindungstechnik vorgeschlagen, welcher den definierten Abschluss am Flächenende berücksichtigt. Für linienförmige Verbindungstechnik, beispielsweise von Klebekurven, entfallen finale Operationen zur Erstellung punktförmiger Instanzen. Es werden die generierten Kurven direkt für die Definition der Verbindungstechnik verwendet und durch eine spätere Aufbereitung in eine Reihe diskreter Positionen zerlegt, welche über Systemchnittstellen weitergegeben werden können.

- Umsetzung in Visual Basic for Applications
- Direkt integriert in CATIA V5 mit interaktiver Benutzeroberfläche
- Kernroutine mit 650 Codezeilen
- Funktionsumfang
  1. Extraktion von Flächen im Produktmodus
  2. Erzeugung von punkt- und linienförmiger Verbindungstechnik
  3. Kalkulation des angepassten Abstandes für punktförmige Verbindungstechnik
  4. Export der Verbindungstechnikinformation in neutrale Datenformate

## AutoSplit

Der Mehrwert und der Nutzen des Werkzeuges wird im Kapitel 3.2.2 beschrieben. Eine Flächenzerlegung kann für komplexe Lagenaufbauten von Faserverbundmodellen direkt im CAD-System umgesetzt werden. Die Performance des Beschnittalgorithmus ermöglicht eine Durchführung innerhalb weniger Minuten und legt die finalen Flächensegmente innerhalb des CAD-Bauteils als nicht assoziative Flächen ab. Durch eine Analyse und Filterung von relevanten Lagenbeschnitten während der Segmentierung kann die Anzahl der logischen Operationen des Algorithmus effektiv reduziert werden.



Abbildung A.8: Benutzeroberfläche der Flächenzerlegung für Faserverbundbauteile

- Umsetzung in Visual Basic for Applications
- Direkt integriert in CATIA V5 mit interaktiver Benutzeroberfläche
- Kernroutine mit 350 Codezeilen
- Funktionsumfang
  1. Zerlegung einer Gesamtfläche in Flächensegmente
  2. Die finalen Flächensegmente werden durch Lagenrandkurven begrenzt
  3. Die finalen Flächensegmente werden durch keine Lagenrandkurven beschnitten
  4. Übergabe der Flächensegmente an die FE-Vernetzung anhand von Standardschnittstellen