



Dipl.-Ing. Harald Lang

Die methodische Integration empirischer Analysen in die frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften
eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens
Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Zweitbetreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader

Graz, November 2016

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der Technischen Universität Graz. Bereits während meines Studiums galt mein Interesse der methodischen Produktentwicklung und Konstruktionslehre. Im Rahmen meiner Beschäftigung am Institut wurde dieses, durch einschlägige Erfahrungen in Projekten und spezifische Lehrtätigkeiten, noch verstärkt und vor allem auch fokussiert. Die so entstandene und ungebrochene Neugier sowie das Verlangen Produktentwicklung effizienter zu gestalten repräsentierten die Basis dieser Arbeit.

Folgend sollen jene Personen genannt werden, denen mein Dank gilt. Ohne Sie wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens, meinem Doktorvater, gilt besonderer Dank, da er mir sowohl den Freiraum und die Möglichkeit gegeben hat mich wissenschaftlich mit der Thematik Entwicklungsmethodik auseinanderzusetzen, als auch stets ein Ansprechpartner für fachliche Expertisen war.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand, Vorstand des Institutes für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik der Technischen Universität Wien und Zweitbegutachter der Arbeit.

Meinen KollegInnen vom Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, allen voran:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael „Mike“ Bader, der durch seine fachliche und vor allem auch soziale Kompetenz zu einer wichtigen Vertrauensperson wurde und der diese Arbeit von Beginn an persönlich begleitete.

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich „Fritz“ Faber, der mir als technisches Universalgenie stets ein kompetenter und geschätzter Diskussionspartner war.

Dipl.-Ing. Wolfgang „Wolfi“ Pucher, dessen Erfahrungen bei der Konzeption und Nutzung von Prüfständen lieferten einen wertvollen Input für diese Arbeit.

Dipl.-Ing. Peter „Brunni“ Brunnhofer, der mir als „Schreibtischnachbar“ bei diversen EDV-Problemen tatkräftig zur Seite stand.

Bei meiner Partnerin, Johanna Moser, Bsc. möchte ich mich für so vieles, insbesondere aber für Ihre tolle Unterstützung, auch in so manch schwieriger Situation, und das aufgebrachte Verständnis bedanken.

Bei meinen Eltern möchte ich mich für all das, was sie mir ermöglicht haben bedanken.

*„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“
(Aristoteles, 384 v.Chr.-322 v.Chr.)*

Kurzfassung

Versuche, empirische Untersuchungen, repräsentieren eine der essentiellen Analysemethoden im Bereich der Produktentwicklung. Hauptsächlich werden Versuche dabei zur Verifikation von Funktion und/oder Lebensdauer von Konzepten, Bauteilen oder gesamten Produkten eingesetzt.

In den frühen Phasen einer Entwicklung, im Stadium hoher Projekt-Dynamik und unscharfer Anforderungen, erfolgt die Ermittlung von spezifischen Systemeigenschaften in der Regel durch analytische und numerische Verfahren. Obwohl Versuche in diesem Stadium typischerweise nicht vorgesehen werden, bieten zielgerichtete empirische Untersuchungen zusätzliches Potential Problemstellungen effizient zu bearbeiten, vor allem in Kombination mit Analytik und Numerik.

Die vorliegende Arbeit greift die Grundidee auf technische Systeme soweit zu reduzieren, um physikalische Effekte möglichst isoliert und unter eindeutig definierten Bedingungen, durch sogenannte Prinzipversuche, empirisch zu analysieren.

Prinzipversuche repräsentieren somit eine besondere Ausprägungsform der Methode Versuch, mit dem allgemeinen Ziel das Wissen über schwer beschreibbare technische Systeme möglichst frühzeitig zu erhöhen. Die spezifische Gestaltung eines reduzierten Versuchssystems soll dabei einen aufwandsarmen und flexiblen Methodeneinsatz sicherstellen.

Im Vergleich zu „klassischen“ Versuchen ist der praktische Einsatz von Prinzipversuchen und deren Integration in ein übergeordnetes Entwicklungsvorhaben allerdings mit entsprechenden Besonderheiten verbunden.

Ausgehend von einer Darstellung der Diversität von Versuchen in der Produktentwicklung und des systematischen Methodeneinsatzes in frühen Entwicklungsphasen wird daher ein integratives Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen entwickelt. Die Definition des Prozessmodells basiert auf einer Synthese relevanter theoretischer Aspekte und anwendungsspezifischer Erfahrungen, wodurch dessen Praxistauglichkeit gewährleistet werden kann.

Dazu werden einerseits Prozeduren aus ausgewählter Literatur erörtert und andererseits im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten realisierte Prinzipversuche retrospektiv analysiert.

Die Bereitstellung eines systematischen Leitfadens, im Sinne einer methodischen Vorgehensweise, für die Durchführung von Prinzipversuchen unterstützt den Entwickler bei der Generierung und Verwertung repräsentativer empirischer Informationen, zeigt potentielle Fehlerquellen sowie Grenzen der Methode auf und leistet somit einen Beitrag zur effizienten Gestaltung der frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses.

Abstract

Practical tests, or empiric investigations, represent one of the essential analysis methods in product development. These practical tests are primarily used for verification of functions and/or service life of concepts, parts, assemblies or even finished products.

During the early stages of product development (i.e. in phases of high project dynamics and insufficiently defined product requirements) system properties are usually defined with the aid of analytic and numeric methods. Though practical tests are usually not planned in these early stages, they offer high potential to solve problems in a goal-oriented and efficient way in the combination with analytic and numeric methods.

This doctoral theses picks up the idea of reducing technical systems far enough to be able to isolate physical effects under distinct conditions through the application of modular concept tests and hence allows empirical analysis.

Modular concept tests represent a specific kind of the research method “practical tests” with the general goal to increase know-how on technical systems, which are difficult to describe, as early as possible. The specific design of a reduced/simplified test setup must ensure low-effort and flexible use of investigation methods.

Compared to classic product tests the practical use of modular concept tests, and their integration in superordinate project development, brings along some special characteristics.

Based on a detailed representation of the high diversity of practical tests in product development, and systematic application of methods in early project stages, an integrated process model for the execution of principle tests is developed. The definition of the process model is based on synthesis of relevant theoretical aspects and application-specific experiences, whereby its suitability of practical use can be guaranteed.

On the one hand standardized procedures from selected literature sources are discussed, on the other hand relevant modular concept tests, that were realized in research and development projects, are analyzed in retrospect.

The availability of a systematic guideline, meaning a methodological approach, for the execution of modular concept tests supports the development engineer in the generation and exploitation of representative empirical information. Furthermore, it points out potential error sources and limits of the method, hence contributing significantly to increase the efficiency of the design process at an early project stage.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Allgemeines	1
1.1 Zielsetzung und Beitrag zum wissenschaftlichen Fortschritt.....	1
1.2 Schilderung der wissenschaftlichen Vorgehensweise	2
1.3 Struktur der Arbeit.....	5
2 Grundlagen der Entwicklungsmethodik und thematische Abgrenzung	7
2.1 Wissenschaftliche Basis.....	7
2.1.1 Entwicklungsmethodik im Kontext einer Wissenschaftsdisziplin	8
2.1.2 Entwicklung und Konstruktion als integraler Bestandteil des Produktlebenszyklus	10
2.1.3 Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess	12
2.1.4 Die Anfangsphasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses als entscheidende Komponenten der Produktentwicklung.....	14
2.2 Entwicklungsmethodische Vorgehensmodelle.....	17
2.3 Die Handhabung der initialen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses in den VDI-Richtlinien 2221 (1993) und 2206 (2004).....	20
2.3.1 Systemtechnik als elementare Grundlage.....	20
2.3.2 VDI 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte	24
2.3.3 VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	27
2.4 Reflexion.....	29
3 Versuche in der Produktentwicklung	35
3.1 Diversifikation empirischer Untersuchungen im Entwicklungsprozess	36
3.1.1 Versuche zur Verifikation.....	41
3.1.2 Versuche zur Beschreibung des Systemverhaltens	43
3.1.3 Versuche zur Bestätigung oder Falsifikation von Hypothesen.....	45
3.2 Systemtheoretische Gegenüberstellung von klassischen Versuchen und Prinzipversuchen.....	47
3.3 Reflexion.....	50
4 Theoretische Aspekte zur Durchführung von Prinzipversuchen	53
4.1 Globale Perspektiven	53
4.1.1 Allgemeine Problemlösungsprozesse als methodische Basis	53

4.1.2	Vorgehensweise zur systematischen Planung und Durchführung von Eigenschaftsanalysen	58
4.2	Versuche als spezifische Experimente	61
4.3	Versuche als spezifische Analysemethoden.....	66
4.4	Reflexion	71
5	Prinzipversuche als Komplettierung des virtuellen Methodeneinsatzes in frühen Phasen der Produktentwicklung.....	75
5.1	Front-Loading als entwicklungsmethodische Basis	75
5.2	Prinzipversuche als zusätzliches Potential	77
5.3	Indikatoren für die Zweckmäßigkeit von Prinzipversuchen	79
5.3.1	Systematisch-organisatorische Indikatoren.....	79
5.3.2	Technisch-physikalische Indikatoren.....	80
5.4	Reflexion	83
6	Praktische Aspekte zur Durchführung von Prinzipversuchen	85
6.1	Prinzipversuch zur Bruchkraftermittlung von Kürbiskernen.....	85
6.2	Prinzipversuche im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Effizienzsteigerung von Zerkleinerungsmaschinen	88
6.2.1	Prinzipversuche zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten von vorgeschreddertem Müll	89
6.2.2	Prinzipversuch zur Ermittlung der erforderlichen Verdichtungskraft	90
6.2.3	Prinzipversuch zur Ermittlung der Brückenbildungsneigung.....	91
6.3	Prinzipversuche zur Verifikation und Optimierung von Simulationsmodellen zur Analyse von mechanischen Stoßvorgängen.....	93
6.4	Prinzipversuch zur Schnittkraftermittlung von Zellstoffbahnen.....	99
6.5	Reflexion	107
7	Integratives Prozessmodell zur methodischen Durchführung von Prinzipversuchen ...	111
7.1	Deduktive und induktive Schlüsse als Synthesebasis.....	111
7.2	Das Prozessmodell	112
7.2.1	Phase 1 Systementwicklung: Validierungszyklus	114
7.2.2	Phase 2 Systemrealisierung: Verifikationszyklus	116
7.2.3	Phase 3 Systembetrieb: Nutzungszyklus	117
7.2.4	Begleitende Prozesse	118
7.3	Grenzen und potentielle Problemfelder	119
7.4	Reflexion	120
8	Fazit und Perspektive.....	123
	Literaturverzeichnis.....	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Forschungsmethodik, Forschung und Anwendung im Kontext Produktentwicklung (vgl. Figure 1.2: Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 10).....	2
Abbildung 2: Design Research Methodology Framework (vgl. Figure 2.1: Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 15).....	3
Abbildung 3: Schematische Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise für die Entwicklung einer Systematik zur Durchführung von Prinzipversuchen.....	4
Abbildung 4: Struktur der Arbeit.....	5
Abbildung 5: Historische Entwicklung von Supportmaßnahmen von Entwicklung und Konstruktion (vgl. Abb. 1.4: Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 9).....	9
Abbildung 6: Produktzyklus mit Entstehungs- und Lebensphasen (vgl. Bild 3.1: VDI 2221, 1993, S. 8).....	10
Abbildung 7: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess.....	12
Abbildung 8: Zuordnung der Entwicklungs- bzw. Konstruktionsarten zu den Prozessphasen (vgl. Abb. 1.10: Niemann/Winter/Höhn, 2005, S. 12).....	13
Abbildung 9: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (vgl. Abb. 1.13: Ponn/Lindemann, 2008, S. 24).....	14
Abbildung 10: Verlauf der Kenntnisse über den Produktkreislauf eines technischen Produktes (vgl. Abb. 3.2: Köhler, 2009, S. 28; Abb. 2.4: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 88).....	15
Abbildung 11: Fehlerentstehung und Fehlerbehebung (vgl. Bild 4: VDI 2247, 1994, S. 5) ...	16
Abbildung 12: Paradoxon der Konstruktion: Die Möglichkeiten der Beeinflussung und Beurteilung sind gegenläufig (vgl. Bild 9.1-9: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 668).....	16
Abbildung 13: Abfolgen von Analyse- und Syntheseschritte als Basis deskriptiver Vorgehensmodelle der Produktentwicklung.....	17
Abbildung 14: Schrittweise Prozessfolgen als prinzipielle Basis präskriptiver Vorgehensmodelle.....	18
Abbildung 15: Gegenüberstellung der Charakteristika deskriptiver und präskriptiver Vorgehensmodelle der Produktentwicklung.....	19
Abbildung 16: Grundbegriffe des Systemdenkens (vgl. Abb. 1.2: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 5).....	21
Abbildung 17: Stufenweise Auflösung von Systemen (vgl. Bild 2.3: VDI 2221, 1993, S. 4; Abb. 1.11: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 18; Abb. 5.3: Bruns, 1991, S. 49).....	21
Abbildung 18: Systemtechnisches Vorgehensmodell (vgl. Bild 2.1: VDI 2221, 1993, S. 3)...	22
Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen den Teilschritten des Problemlösungszyklus als Mikro-Logik (vgl. Abb. 2.8: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 96).....	23
Abbildung 20: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (vgl. Bild 3.3: VDI 2221, 1993, S. 9).....	24
Abbildung 21: Arbeitsschritte der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit nach VDI 2222 Bl. 2 (vgl. Abb. 1.4: Niemann/Winter/Höhn, 2005, S. 5).....	25
Abbildung 22: V-Modell als Makro-Logik der VDI 2206 (vgl. Bild 3-2: VDI 2206, 2004, S. 29).....	28
Abbildung 23: Durchlaufen mehrere Makrozyklen mit zunehmender Produktreife (vgl. Bild 3-3: VDI 2206, 2004, S. 31).....	29

Abbildung 24: Bedeutung der Eigenschaftsfrüherkennung (vgl. Abb. 86: Lindemann, 2009, S. 159)	30
Abbildung 25: Informationsumsatz durch Methodeneinsatz (vgl. Abbildung 2-18: Schwankl, 2002, S. 38)	31
Abbildung 26: Typische Hürden für den Methodeneinsatz (vgl. Abbildung 8: Graner, 2013, S. 55)	32
Abbildung 27: Prognostizierter Anteil von Simulationen und Versuchen an der gesamten Entwicklungszeit (Lindemann, 2009, S. 166).....	33
Abbildung 28: Phasen der Produktentstehung (vgl. Bild 3.2: VDI 2221, 1993, S. 8).....	36
Abbildung 29: Zuordnung von Versuchen zu Produktentwicklungs- und lebensphasen	40
Abbildung 30: Stauraum eines Passagierflugzeuges als Prüfkörper eines Zulassungstests.	42
Abbildung 31: Aufbringung der für die Zulassung erforderlichen Last mittels Bleiplatten.....	42
Abbildung 32: Synchronring mit innen- und außenliegenden Reibflächen und Gegenlaufringe als Prüfkörper einer empirischen Verschleißanalyse.....	43
Abbildung 33: Prüfstands Aufbau der empirischen Verschleißanalyse einer Sperrsynchonisierung	44
Abbildung 34: Prinzipieller Aufbau des Getriebeprüfstandes.....	45
Abbildung 35: Prüfstands Aufbau auf unabhängig voneinander einstellbaren Nick- und Wankrahmen	46
Abbildung 36: Frontalansicht von Nick- und Wankrahmen	46
Abbildung 37: Klassische Versuche als Methode zur Analyse und Beschreibung komplexer Systeme.....	48
Abbildung 38: Prinzipversuche als Methode zur Analyse und Beschreibung gezielt isolierter Effekte unter festgelegten Parametern.....	49
Abbildung 39: Zielsetzungen von Versuchen in Abhängigkeit ihrer Kategorie sowie den jeweiligen Produktentwicklungs- und lebensphasen.....	51
Abbildung 40: Klassifikation von Analysemethoden nach dem Zweck bzw. der Genauigkeit (vgl. Bild 7.8-1: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 515).....	53
Abbildung 41: TOTE-Modell (Miller/Galanter/Pribram, 1960) und PDCA-Zyklus (Deming, 1982) als elementare Denk- und Handlungseinheiten.....	54
Abbildung 42: Vorgehensweise und Ablaufplan von Messung (Joch, 2007, S. 137).....	55
Abbildung 43: Generischer Phasenplan zur Durchführung von Technologieentwicklungsprojekten (Lang, 2012, S. 71)	56
Abbildung 44: Prozessschritte zur spezifischen Bearbeitung von Technologieentwicklungsprojekten (Lang, 2012, S. 73)	57
Abbildung 45: Klären von Informationsbedarf (vgl. Abbildung 3-8: Schwankl, 2002, S. 116)	58
Abbildung 46: Planung und Durchführung einer Analyse (vgl. Abbildung 3-10: Schwankl, 2002, S. 119).....	58
Abbildung 47: Wichtige Größen bei der Eigenschaftsanalyse (vgl. Abb. 88: Lindemann, 2009, S. 162).....	59
Abbildung 48: Parametercheckliste zur Eigenschaftsfrüherkennung (vgl. Abbildung 9-14: Schwankl, 2002, S. 272)	60
Abbildung 49: Experiment: Fallversuch von Galilei im Jahre 1604 (vgl. Abb. 1/6: Rodenacker, 1976, S. 17)	61
Abbildung 50: Konstruktionen mit physikalischem Effekt „Schiefe Ebene“ a) Selbstschließendes Tor b) Sackrutsche (vgl. Abb. 1/8: Rodenacker, 1976, S. 26)	62

Abbildung 51: Methodengefüge: Experiment und Konstruktion (vgl. Abb. 1/9: Rodenacker, 1976, S. 26).....	62
Abbildung 52: Iterativer 4-Stufen Untersuchungsprozess (vgl. Figure 4.2: Smith, 2007, S. 91)	63
Abbildung 53: Das Experiment als 4-stufiger iterativer Zyklus mit verteilten Verantwortlichkeiten (vgl. Figure 3-2: Thomke, 2003, S. 94).....	64
Abbildung 54: Das Experiment als 4-stufiger iterativer Zyklus als interdisziplinäre Aufgabenstellung (vgl. Figure 6-1: Thomke, 2003, S. 205)	65
Abbildung 55: Teilschritte eines geplanten Versuchs auf Basis der statistischen Versuchsplanung	67
Abbildung 56: Vorgehenszyklus für die Systemsynthese, abgeleitet aus dem Problemlösungszyklus der Systemtechnik (vgl. Bild 3.3-14: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 92).....	68
Abbildung 57: Standardvorgehen bei der Problemlösung gemäß Münchener Vorgehensmodell (vgl. Abb. 27: Lindemann, 2009, S. 51).....	69
Abbildung 58: Gestaltung eines Versuchsablaufs als Beispiel für eine rekursive Anwendung des Münchener Vorgehensmodells (vgl. Abb. 30: Lindemann, 2009, S. 54)	70
Abbildung 59: Methodenbeschreibung „Orientierender Versuch“ (Lindemann, 2009, S. 288)	71
Abbildung 60: Harmonisierte Prozessfolge zur Versuchsdurchführung	72
Abbildung 61: Drei Perspektiven zur Implementation von Front-Loading in einem Entwicklungsprozess (vgl. Figure 5-3: Thomke, 2003, S. 171).....	76
Abbildung 62: Verlagerung von Ressourcen zur Verkürzung der Produktentwicklungs- und Fertigungsimplementationszeit mittels Front-Loading (Ovtcharova/Weidlich, 2003, S. 161ff)	76
Abbildung 63: Methodenkette einer virtuellen Systemanalyse (vgl. Abb. 2.4: Klein, 2015, S. 17)	80
Abbildung 64: Prinzip und Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs zur Ermittlung der Biegebruchspannung von Kürbiskernen	86
Abbildung 65: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten durch Bestimmung der Reibkraft	89
Abbildung 66: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten durch Bestimmung des Gleitwinkels.....	90
Abbildung 67: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung der erforderlichen Verdichtungskraft in Abhängigkeit der Komprimierung	91
Abbildung 68: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung der Brückenbildungsneigung des betreffenden Schneidgutes.....	92
Abbildung 69: Schneidgut zu Versuchsbeginn (links) und ausgebildete Brücke (rechts).....	92
Abbildung 70: Schematischer Prinzipversuchsaufbau zur Anwendbarkeitsstudie der Hertzschen Theorie (links) inkl. elektrischer Anordnung zur experimentellen Bestimmung der Kontaktzeit (rechts).....	94
Abbildung 71: Realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Anwendbarkeitsstudie der Hertzschen Theorie	94
Abbildung 72: Exemplarische Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen im Rahmen der Anwendbarkeitsstudie der Hertzschen Theorie.....	95
Abbildung 73: Schematischer Prinzipversuchsaufbau zur Analyse des umfangsseitigen Stoßes (links) und allgemeiner Ablauf eines Versuchsdurchgangs (rechts)	96

Abbildung 74: Realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Analyse der Stoßdynamik des Systems Klaue-Klaue	96
Abbildung 75: Finite-Elemente-Modell der Messwelle	97
Abbildung 76: Exemplarische Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen im Rahmen der Stoßdynamik-Analyse des Systems Klaue-Klaue.....	98
Abbildung 77: Darstellung des Zellstoff-Schnittvorgangs in vier Stufen	100
Abbildung 78: Versuchsanordnung „Scherenschnitt“ (links) und „Keilschnitt“ (rechts).....	101
Abbildung 79: Schematischer Prinzipversuchsaufbau mit rotatorisch bewegtem Messer (1), stehendem Messer (2) und mechanischer Zellstoffzuführung (11)	102
Abbildung 80: Realisierter Prüfaufbau mit bewegtem Messer (Fly-Knife) in Ausgangsposition	103
Abbildung 81: Realisierter Prüfaufbau mit bewegtem Messer (Fly-Knife) in Schnittposition	103
Abbildung 82: Schnittkräfte eines exemplarischen Versuchsdurchgangs	104
Abbildung 83: Kriterien der optischen Schnittbeurteilung	105
Abbildung 84: Finite-Elemente-Modell der Zellstoffschneidanlage	105
Abbildung 85: Maximale Verformung der Messerwelle in z-Richtung	106
Abbildung 86: Schematische Darstellung von Deduktion und Induktion	111
Abbildung 87: Integratives Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen.....	113
Abbildung 88: Informationsbedarf eines übergeordneten Entwicklungsvorhabens als Basis eines spezifischen Methodeneinsatzes	114
Abbildung 89: Erfüllen von Teilfunktionen durch Wirkprinzipien, die aus physikalischen Effekten sowie aus geometrischen und stofflichen Merkmalen aufgebaut werden (vgl. Abb. 4.9: Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 247).....	115
Abbildung 90: Gütekriterien für empirische Forschung (vgl. Abbildung 4-1: Bender, 2004, S.118).....	119
Abbildung 91: Das „Teufelsquadrat“ – Zusammenhänge von Quantität, Qualität, Dauer und Aufwand in einem Projekt (vgl. Abb. 3.6: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 251)	121
Abbildung 92: Entwicklungsmethodik als Bindeglied zwischen technischem Wissen und dem „Faktor Mensch“ (in Anlehnung an Bild 14.13: Lechner/Naunheimer, 1994, S. 376)	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorisierung von Versuchen basierend auf der Einteilung der tribologischen Prüftechnik (vgl. Bild 8.1.1: Czichos/Habig, 2010, S. 194; Tabelle 5.2: GfT Arbeitsblatt 7, 2002, S. 44).....	37
Tabelle 2: Methodenstammbaum der FEM (vgl. Abb. 2.1: Klein, 2015, S. 14).....	81
Tabelle 3: Aufgabengebiete der Messtechnik (vgl. Tabelle 1.3: Hoffmann, 2011, S. 21)....	108

1 Allgemeines

Die nachfolgenden Ausführungen repräsentieren die Basis der vorliegenden Arbeit. Neben der Darstellung der Zielsetzung und des Beitrags zum wissenschaftlichen Fortschritt werden die wissenschaftliche Vorgehensweise und die Struktur der Arbeit erörtert.

1.1 Zielsetzung und Beitrag zum wissenschaftlichen Fortschritt

Steigende Anforderungen an Funktionen und der Qualität von Produkten resultieren in steigenden Anforderungen an den Entwicklungsprozess, als integraler Bestandteil des Produktkreislaufes. Die Maschinenbauindustrie greift bei Produktentwicklungsvorhaben häufig auf eine breite Basis von Methoden und Arbeitsweisen, mit dem Ziel der Effizienz- und Effektivitätssteigerung, zurück. Holistische Entwicklungsmethoden reduzieren den Entwicklungsprozess meist auf eine sequentielle Abfolge logischer Tätigkeiten.

Speziell dem Beginn eines solchen Prozesses, dem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung (VDI 2221, 1993, S. 9), wird zuweilen wenig bzw. zu wenig Bedeutung beigemessen, obwohl in diesem Stadium die Anforderungen definiert werden sollten und mit diesen bereits ein Großteil der letztlich resultierenden Aufwands- und Kostenfestlegung einhergeht. Essentiell ist hierbei das Systemverständnis. Bei vielen Problemstellungen gilt es neben der Definition eines möglichst realistischen Lastkollektivs, als Basis weiterführender Ausarbeitungen, auch Interdependenzen von Parametern in einer möglichst frühen Phase zu erkennen sowie deren gegenseitigen Einfluss qualitativ und idealerweise auch quantitativ zu verifizieren. Trotz steigender Effizienz in Analytik und Numerik gibt es speziell in frühen Entwicklungsstadien Grenzen für deren Anwendbarkeit. In solchen Fällen können spezifisch ausgerichtete und gestaltete Versuche, als empirische Untersuchungen, eine zweckmäßige Alternative darstellen. Die praktische Anwendung von Versuchen erfolgt jedoch zumeist erst in fortgeschrittenen Phasen des Entwicklungsprozesses.

Ziel dieser Dissertation ist die methodische Integration von **Prinzipversuchen**, als empirische Untersuchungen gezielt isolierter Effekte, in die frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses.

Durch die zielgerichtete Anwendung von Prinzipversuchen soll vor allem in initialen Entwicklungsstadien das Problemverständnis respektive die Systemkenntnis erhöht werden, bei gleichzeitig reduziertem Gesamtaufwand. Aufgrund der Divergenz zu „klassischen“ Versuchen (Kapitel 3.1, S. 40) erfordert deren effizienter Einsatz jedoch eine speziell abgestimmte Herangehensweise.

Empirische Untersuchungen werden in unterschiedlichsten Ausprägungen in Entwicklungsvorhaben zum Einsatz gebracht. Die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Durchführung von Prinzipversuchen impliziert eine fundierte Beschreibung der Diversifikation empirischer Untersuchungen sowie der spezifischen Charakteristika von Prinzipversuchen.

Die quantitative Beschreibung technischer Systeme durch Empirie erfordert zudem, selbst bei optimierten Prozessen, einen entsprechenden Ressourceneinsatz. Als weiterer essentieller Aspekt für die methodische Integration von Prinzipversuchen in Entwicklungsprozesse sollen daher Indikatoren für deren zweckmäßigen Einsatz aufgezeigt werden.

Die Bearbeitung dieser Aufgabenstellung und der damit einhergehenden Aufbereitung empirischer Untersuchungen als Werkzeug in frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses gewährleistet mit der Synthese einer methodischen und strukturierten Vorgehensweise zur Durchführung von Prinzipversuchen den intendierten Beitrag zum wissenschaftlichen Fortschritt der Entwicklungsmethodik dieser Arbeit.

1.2 Schilderung der wissenschaftlichen Vorgehensweise

Die wissenschaftliche Bearbeitung einer Themenstellung bedeutet grundsätzlich mit wissenschaftlichen Belegen zu arbeiten, angemessen zu argumentieren und die Forschungsfragen in einem adäquaten wissenschaftlichen Forschungsprozess abuarbeiten, von der Literaturstudie bis hin zur Empirie. (Karmasin/Ribing, 2012, S. 76)

Im Kontext Produktentwicklung spiegelt sich die Komplexität, Vielschichtigkeit und Interdisziplinarität der Wissenschaftsdisziplin auch in einer Vielfalt an Forschungsansätzen, differenzierenden Inhalten und Zielsetzungen wider.

Dieser Umstand kann als Mangel an wissenschaftlicher Konsequenz hinsichtlich der Anwendung von Forschungsmethoden, der Interpretation von gewonnenen Erkenntnissen, der Entwicklung von Supportmaßnahmen sowie der Validierung und Dokumentation der Ergebnisse angesehen werden (Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 8). Obgleich dieses fehlenden Konsens bzw. dieser Uneinheitlichkeit gibt es prinzipiell zwei dominierende Charakteristika: eine inhärente Komplexität und das Ziel Entwicklung und Konstruktion, bzw. dessen Prozesse, zu verstehen und zu verbessern (Eckert/Clarkson/Stacey, 2003). Auf diesen Beobachtungen basierend erarbeiteten Blessing und Chakrabarti (2009, S. 9) einen systematischen Ansatz zur Gestaltung von Forschung im Bereich der Entwicklungsmethodik. Die folgende Illustration (Abb. 1) zeigt den Zusammenhang zwischen Forschungsmethodik (**Design Research Methodology**), Forschung (**Design Research**) und angewandter Entwicklung (**Design Practice**) mit dem jeweiligen primären Zweck.



Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Forschungsmethodik, Forschung und Anwendung im Kontext Produktentwicklung (vgl. Figure 1.2: Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 10)

Die Organisation der vorliegenden Arbeit erfolgt in Anlehnung an die von Blessing und Chakrabarti vorgeschlagene Methodik, um einen strukturierten, systematischen und vor allem transparenten Forschungsprozess sicherzustellen.

Die als Design Research Methodology (DRM) bezeichnete Methodik besteht aus den vier Phasen **Definition des Forschungsrahmens**, **Beschreibungsphase 1**, **Entwicklung von Lösungsansätzen** und **Beschreibungsphase 2** (Abb. 2).

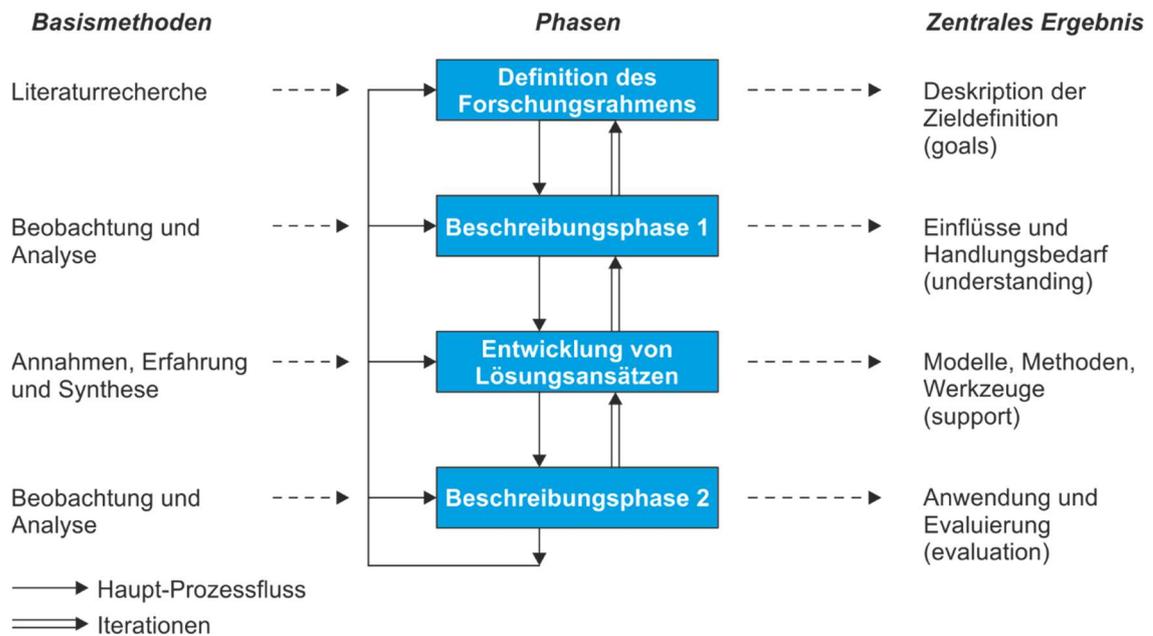


Abbildung 2: Design Research Methodology Framework (vgl. Figure 2.1: Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 15)

Das Hauptaugenmerk von Phase 1 der Methodik, Definition des Forschungsrahmens, liegt auf der Präzisierung der Forschungsaufgabe.

In der 1. Beschreibungsphase geht es um das Aufzeigen von Zusammenhängen und Einflussfaktoren im abgesteckten Forschungsrahmen und einen daraus abgeleiteten Handlungsbedarf.

Basierend auf dieser detaillierten Analyse der Ist-Situation gilt es Lösungsansätze, sogenannte Supportmaßnahmen, für das spezifizierte Forschungsproblem zu entwickeln. Blessing und Chakrabarti (2009, S. 142f) führen folgende übliche Formen von Supportmaßnahmen an:

- Ganzheitliche Entwicklungsmethodiken (z.B. Vorgehensschema nach VDI-Richtlinie 2221 (1993), V-Prozess (VDI 2206, 2004), Hauptarbeitsschritte des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses nach Pahl und Beitz (Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 17), u.a.).
- Entwicklungsmethoden zur zielgerichteten Bearbeitung von Problemstellungen während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses (z.B. Methoden zur Lösungssuche (Ehrlenspiel, 2009, S. 409ff)).

- Heuristiken als Regeln und Prinzipien um spezielle Ziele zu fokussieren (z.B. Designfor-X Richtlinien (Huang, 1996), TRIZ Prinzipien (Orloff, 2006), u.a.).
- Werkzeuge, Hard- und Software, zur effizienten Verwendung von Methodiken, Methoden und Heuristiken (z.B. CAD- und FEM-Software, u.a.).

Der Notwendigkeit einer Evaluierung der ausgearbeiteten Lösungsansätze wird mit der 2. Beschreibungsphase, der 4. und letzten Phase der DRM Methodik, genüge getan.

Die prinzipielle Möglichkeit jede Methodik flexibel anzuwenden, zu adaptieren und jederzeit Iterationsschritte bzw. -schleifen durchführen zu können ist essentiell und ganz im Sinne der Autoren der DRM Methodik. (Blessing/Chakrabarti, 2009, S. 17)

Im konkreten Anwendungsfall wird durch die vorgestellte Methodik das Grobgerüst, im Sinne eines Leitgedankens, der wissenschaftlichen Vorgehensweise definiert, welche sich im Detail wie folgt gliedert.

Als Arbeitsgrundlage werden zunächst die elementaren Zusammenhänge des methodischen Entwickelns auf unterschiedlichen Ebenen erarbeitet.

Darauf aufbauend, unter dem Aspekt einer intensivierten Fokussierung, erfolgt eine Analyse der Diversifikation empirischer Untersuchungen, welche auch eine detaillierte Darstellung des Terminus Prinzipversuch beinhaltet, sowie eine Analyse technisch-physikalischer Phänomene als Indikatoren für deren zweckmäßigen Einsatz.

Die Bearbeitung der zentralen Forschungsfrage, die Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Durchführung von Prinzipversuchen, erfolgt durch einen Syntheseprozess, basierend auf einer parallelen Analyse von theoretischen und praktischen Aspekten (Abb. 3).

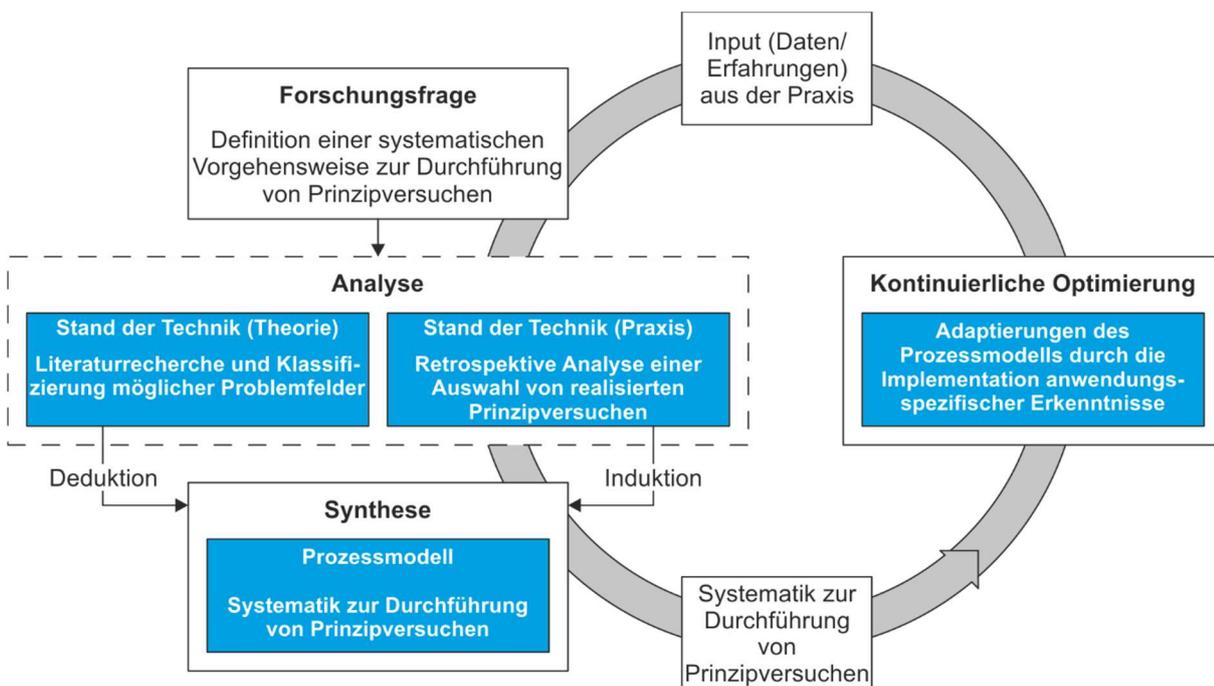


Abbildung 3: Schematische Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise für die Entwicklung einer Systematik zur Durchführung von Prinzipversuchen

Das Ziel der vorgelagerten Untersuchung des Standes der Technik seitens Theorie und Praxis (Abb. 3) ist die Generierung einer Kombinationsmöglichkeit von deduktiven und induktiven Schlussfolgerungen.

Komplementiert wird die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Durchführung von Prinzipversuchen von einer kritischen Diskussion hinsichtlich Grenzen und Schwierigkeiten bei der praktischen Anwendung.

An dieser Stelle wird explizit auf die bewusst offene Gestaltung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensmodells hingewiesen. Die bei der praktischen Durchführung von Prinzipversuchen gewonnenen Erkenntnisse, speziell in Hinblick auf deren Abwicklung, sollen in weiterer Folge als Input für spezifische Adaptierungen herangezogen werden, wodurch ein kontinuierlicher Optimierungsprozess der Vorgehensweise realisiert werden kann.

1.3 Struktur der Arbeit

In Abbildung 4 ist der Aufbau der Arbeit grafisch dargestellt und die jeweiligen Kapitel in Relation zu den Phasen des Design Research Methodology Frameworks gesetzt.

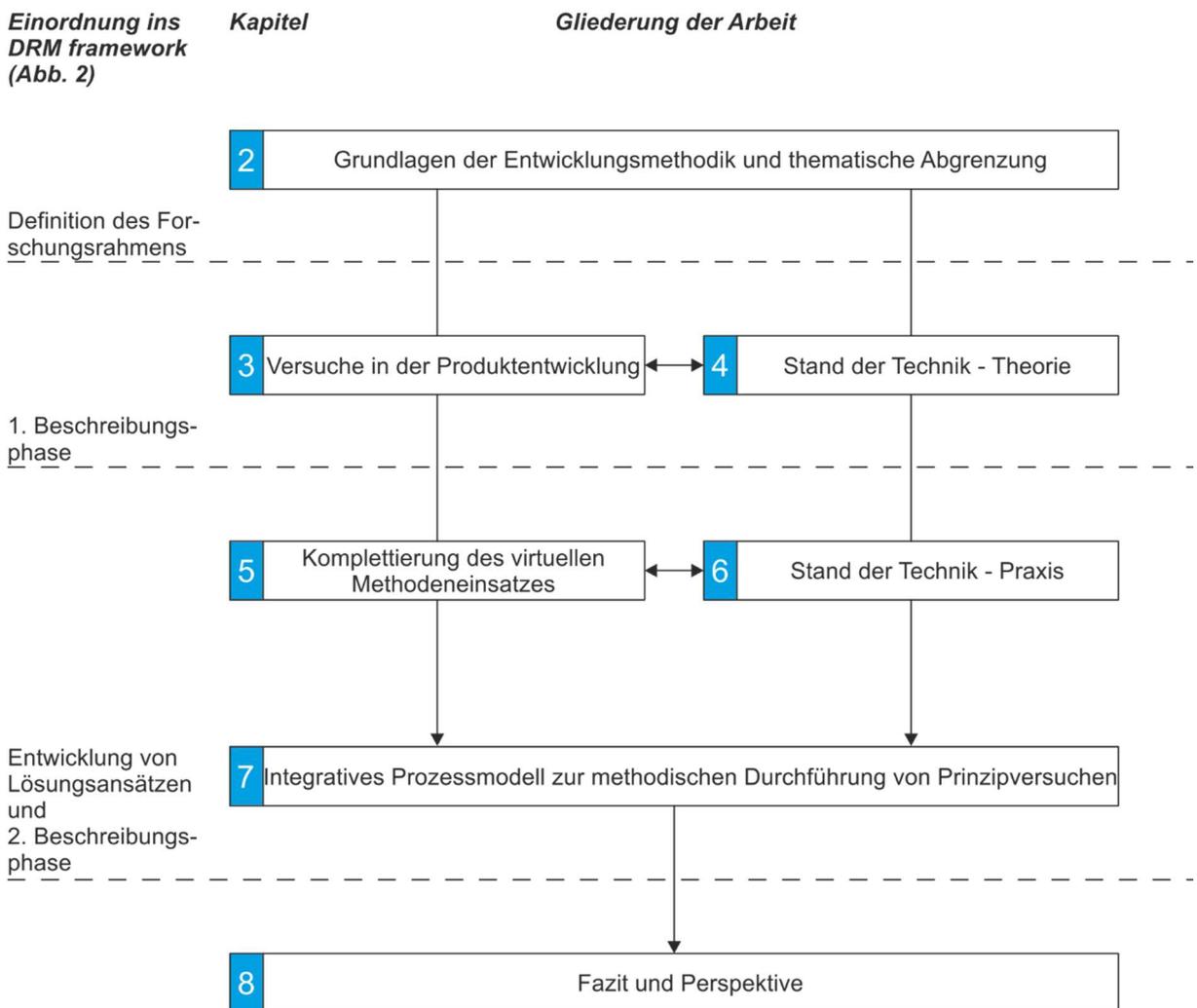


Abbildung 4: Struktur der Arbeit

2 Grundlagen der Entwicklungsmethodik und thematische Abgrenzung

Im technischen Sprachgebrauch werden die Begriffe Konstruktion, Entwicklung und diverse Termini mit deren Beteiligung oftmals ohne klare Definition zum Einsatz gebracht. Ein Umstand der in weiterer Folge, trotz prinzipieller inhaltlicher Übereinstimmung, zu Unklarheiten, Diskussionen und Klärungsaufwand führen kann. Aufgrund dieser Gegebenheit, bzw. um den daraus resultierenden Problemen zuvorzukommen und die Klarheit sowie Nachvollziehbarkeit sicherzustellen, werden in diesem Abschnitt relevante Themenschwerpunkte terminologisch und vor allem inhaltlich abgegrenzt.

Antizipierend wird an dieser Stelle die Definition der Begriffe Entwicklung und Konstruktion entsprechend der VDI-Richtlinie 2221 (1993) angeführt, die Begriffsbestimmungen und deren Vereinheitlichung als Beitrag einer branchenübergreifenden Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik anführt.

Entwickeln ist demzufolge das zweckgerichtete Auswerten und Anwenden von Forschungsergebnissen und Erfahrungen, z.B. technischer, ökonomischer und sonstiger Art. Die Ziele des Entwickelns können sein: Stoffe, grundsätzliche Lösungen, technische Erzeugnisse, Programme und dergleichen. (VDI 2221, 1993, S. 39f)

Konstruieren bezeichnet die Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen – ausgehend von einer Aufgabenstellung – die zur Herstellung und Nutzung eines Produkts notwendigen Informationen erarbeitet werden und in der Festlegung der Produktdokumentation enden. Diese Tätigkeiten schließen die vormaterielle Zusammensetzung der einzelnen Funktionen und Teile eines Produkts, den Aufbau zu einem Ganzen und das Festlegen aller Einzelheiten ein. (VDI 2221, 1993, S. 40)

Dementsprechend bezeichnet **Produktentwicklung** den holistischen Prozess von der Überprüfung einer Idee auf technologische Machbarkeit bis zu deren Realisierung. Die **Konstruktion**, als Begriffseinheit der gestaltenden und ausarbeitenden Handlungen, kann in diesem Zusammenhang als **Teil einer Entwicklung** bzw. eines Entwicklungsprozesses angesehen werden.

Das Konstruieren ist demzufolge keinesfalls als Synonym für das Anfertigen einer technischen Zeichnung zu verstehen, sondern beinhaltet als gestaltgebender Prozess sämtliche Tätigkeiten zur Bereitstellung ganzheitlicher Informationen für die Herstellung eines Produktes oder technischen Systems.

2.1 Wissenschaftliche Basis

Aufgrund der, bereits in Kapitel 1.2 thematisierten, unterschiedlichen Ausprägungen der Entwicklungsmethodik wird nachfolgend das theoretische Fundament der Arbeit charakterisiert.

2.1.1 Entwicklungsmethodik im Kontext einer Wissenschaftsdisziplin

Retrospektiv betrachtet war das Konstruieren bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts geprägt von praktischen Erfahrungen und handwerklichen Fertigkeiten. Erst die wissenschaftliche Durchdringung technischer Systeme, also die schrittweise Erforschung komplexer Einzelphänomene, ermöglichte ein Zusammenführen von Wissenschaft und technischer Praxis. (Heymann, 2005, S. 23). Die Anfänge der methodischen Konstruktionslehre, speziell im deutschsprachigen Raum, gehen auf Ferdinand Jacob Redtenbacher zurück, der in seinem Werk „Principien der Mechanik und des Maschinenbaus“ (Redtenbacher, 1859, S. 303ff) folgende allgemeine Grundsätze zur Konstruktion von Maschinenteilen definierte:

1. Hinreichende Stärke
2. Geringe Abnutzung
3. Geringer Reibungswiderstand
4. Geringer Materialaufwand
5. Leichte Ausführung
6. Leichte Aufstellung
7. Wenig Modelle

Aufgrund der partiell widersprüchlichen Charakteristik dieser Prinzipien bemerkte Redtenbacher (1859, S. 305f), dass die zweckmäßigste Konstruktion jene sei, deren Summe der Nachteile ein Minimum und deren Summe der Vorteile ein Maximum aufweist. Obgleich dieser fundamentalen Basis einer allgemeinen Konstruktionslehre, entwickelten sich erst im Laufe der letzten Dekaden Bestrebungen die Vorgänge bei der Synthese von Maschinen zu beschreiben und methodisch nutzbar zu machen (Abb. 5).

Die teilweisen Versuche Konstruieren zu einer rein systematisch verfahrenen Wissenschaft zu reduzieren, der eindeutige Gesetzmäßigkeiten und eine objektivierbare sowie geschlossene wissenschaftliche Theorie zugrunde liegen, erwiesen sich als unmöglich umzusetzen.

Dieser Umstand führte zur Definition „flexibler“ Entwicklungsmethodiken (z.B. nach Pahl und Beitz), im Sinne einer Vereinigung von Systematik und Intuition (Heymann, 2005, S. 313ff). Dabei wurde das Ziel verfolgt, innerhalb eines definierten Ablaufes von Phasen und einzelnen Arbeitsschritten, ausreichend Raum für kreative Denk- und Entscheidungsprozesse zu schaffen, wobei der Fokus auf dem Finden neuer Ideen und Lösungskonzepte lag. Im Laufe der Zeit wurden diese Methodiken weiterentwickelt und dadurch praxisgerechter gestaltet.

Daneben ermöglichte der exponentielle Fortschritt von Informationstechnologien die Entwicklung leistungsfähiger Werkzeuge, welche sich zu einem Standard in der modernen Produktentwicklung etablierten (z.B. CAD-Systeme, Berechnungs- und Simulationssoftware, u.a.) und als Wegbereiter einer virtuellen Produktentwicklung bezeichnet werden können. Die virtuelle Produktentwicklung eines technischen Systems setzt zwangsläufig dessen virtuelle Beschreibbarkeit voraus. Zur rein virtuellen Entwicklung eines komplexen Gesamtsystems ist zudem eine Zusammenführung verschiedener Simulationsmethoden erforderlich, um vielschichtige Interdependenzen adäquat berücksichtigen zu können.

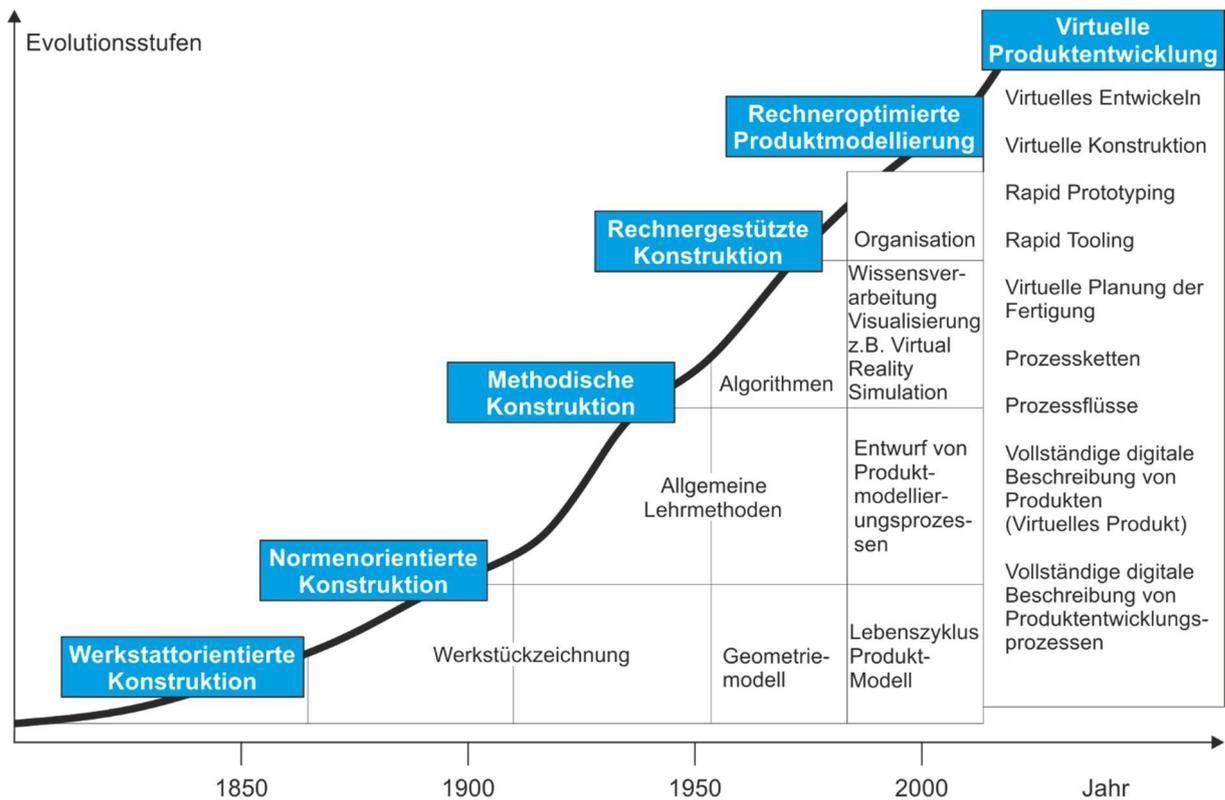


Abbildung 5: Historische Entwicklung von Supportmaßnahmen von Entwicklung und Konstruktion (vgl. Abb. 1.4: Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 9)

Die digitale Vernetzung von Entwicklungswerkzeugen ist derzeit Gegenstand intensiver Forschung, speziell im Automotive- und Aerospace-Bereich, und repräsentiert indes (gegenwärtig) einen limitierenden Faktor der virtuellen Produktentwicklung.

Grundsätzlich gibt es heute Bestrebungen Entwicklung und Konstruktion auf unterschiedlichen Ebenen voranzutreiben. Für spezifische und isoliert betrachtete Problemstellungen unterliegen Verfahren und Methoden quasi einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Auf der anderen Seite erfordern immer komplexere Produkte holistische und vor allem interdisziplinäre Entwicklungsansätze. Koller (1994, S. 3f) definierte in diesem Zusammenhang die prinzipiellen Ziele der Entwicklungs- und Konstruktionsforschung als:

- Schaffung einer allgemeingültigen (produktneutralen) und speziellen (produktspezifischen) Konstruktionslehre.
- Entwicklung eines Werkzeuges zur Schaffung qualitativ besserer und wirtschaftlicher Produkte.
- Rationalisierung und Schaffung der Voraussetzungen zur Automatisierung von Konstruktionsprozessen.
- Schaffung einer Lehre zur schnelleren und besseren Ausbildung von Konstrukteuren.
- Schaffung einer generellen Lehre technischer Systeme, eines Mittels zum besseren Verständnis und zur besseren Überschaubarkeit des sich ständig vergrößernden und sich in viele Spezialgebiete verzweigenden Wissensgebietes Maschinenwesen.
- Schaffung von Mitteln zur Verbesserung des Patentwesens.

Aufgrund der Vielschichtigkeit in der heutigen Produktentwicklung sind den vorher genannten Punkten noch weitere hinzuzufügen:

- Konkrete Handhabung der erforderlichen Interdisziplinarität.
- Integration spezifischer und praktischer Erfahrungen aus der Industrie.
- Gestaltung einer flexiblen und agilen, mit anderen Worten einer „offenen“, Systematik, um dieselbe Entwicklungsgeschwindigkeit von Supportmaßnahmen selbst, wie von tangierten Entwicklungs- und Veränderungsprozessen, gewährleisten zu können.

Deren Umsetzung erfordert auf Grund des mehrdimensionalen und interdisziplinären Fortschritts von Entwicklung und Konstruktion einen eben solchen in der Entwicklungs- und Konstruktionsforschung.

2.1.2 Entwicklung und Konstruktion als integraler Bestandteil des Produktlebenszyklus

Basis für die Schaffung, Nutzung und Verwertung eines Produktes, also dem Durchlaufen des Produktlebenszyklus, sind vorgeschaltete Aktivitäten, die als Produkt-Entwicklungs-Prozess zusammengefasst werden können (Abb. 6).

In diesem Prozess wird den Bedürfnissen des Marktes und/oder erkannten Potentialen als Impuls durch die Definition einer Entwicklungs- bzw. Konstruktionsaufgabe, mit oder ohne entsprechende Vorstudien, Rechnung getragen. (VDI 2221, 1993, S. 8)

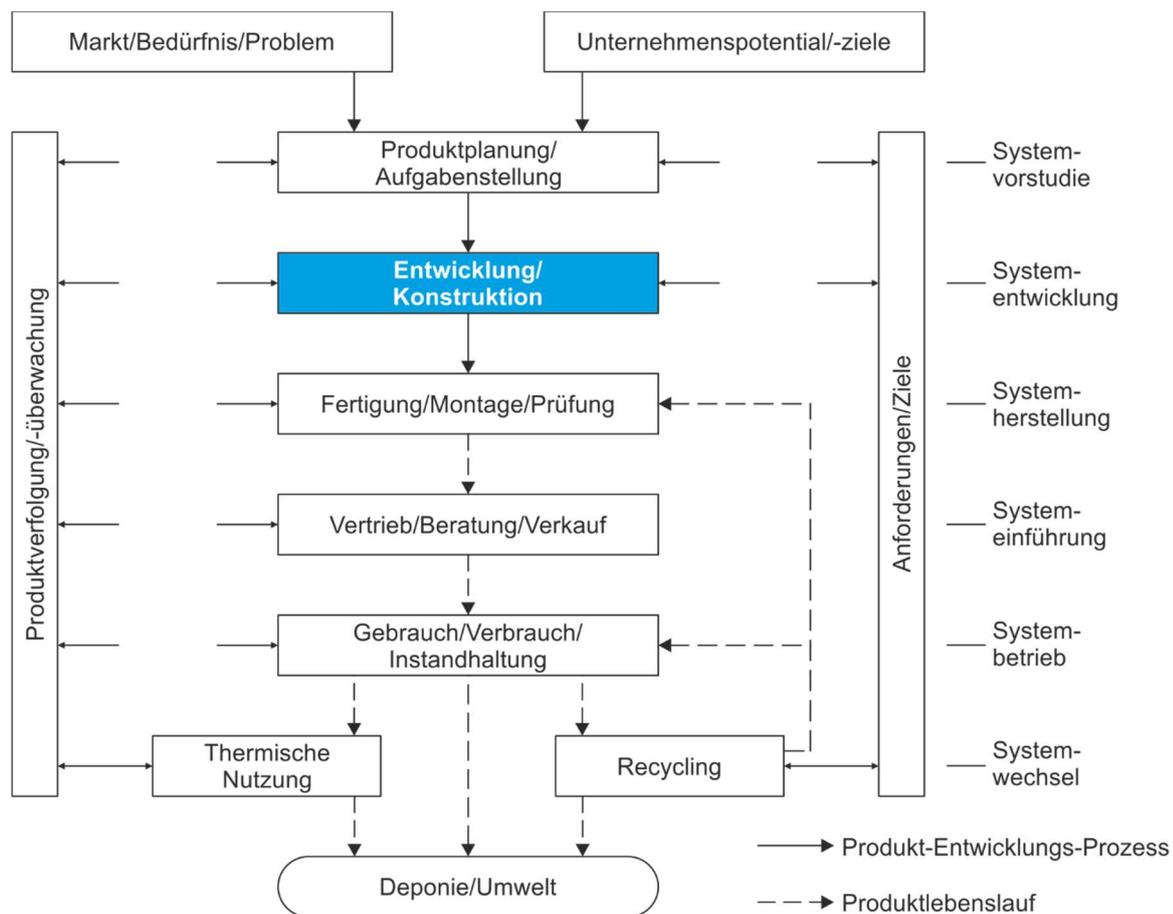


Abbildung 6: Produktzyklus mit Entstehungs- und Lebensphasen (vgl. Bild 3.1: VDI 2221, 1993, S. 8)

Entwicklung und Konstruktion beinhaltet in dieser Umgebung wiederum alle konkretisierenden Handlungen, um ausgehend von einer Produktidee diese realisieren zu können.

An dieser Stelle wird auf die integrierende Gestaltung des Produkt-Entstehungs-Prozesses durch den sogenannten **Simultaneous Engineering** Ansatz, als Schwerpunkt in Forschung und Lehre des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, hingewiesen. Unter Simultaneous Engineering versteht man die **zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung** mit Hilfe eines straffen Projektmanagements, wobei der gesamte Produktlebenslauf betrachtet wird (Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 227f).

Die Zielsetzung von Simultaneous Engineering liegt in einer Reduktion der Entwicklungszeit und der erforderlichen Ressourcen sowie in einer Qualitätsverbesserung. Das entscheidende Kriterium für das Parallelisieren von unterschiedlichen, und ursprünglich einander folgenden, Aktivitäten (beispielsweise Entwicklung, Konstruktion und Prozessplanung) ist die Frage, zu welchem Zeitpunkt die Ergebnisse der vorlaufenden Aufgabe soweit stabil sind, dass die statistische Wahrscheinlichkeit einer Änderung, und die damit verbundenen Änderungskosten, geringer sind als jene Kosten, die durch zu spätes Weiterarbeiten verursacht werden (Vajna Hrsg., 2014, S. 351).

Im Bereich der wissenschaftlichen Entwicklungsmethodik etablierte sich Simultaneous Engineering als zielführender methodischer Ansatz, welcher jedoch vielfach (noch) nicht die industrielle Praxis widerspiegelt.

Der in Abbildung 6 schrittweise dargestellte Produktkreislauf visualisiert einen logischen Aspekt mit großer Bedeutung für die Entwicklung und Konstruktion. Die Festlegung sämtlicher Funktionen und Eigenschaften eines Produktes erfolgt im Produkt-Entwicklungs-Prozess. Deren Wirkungen kommen allerdings erst in den jeweiligen Phasen des Produktlebenslaufs zum Tragen. Dieser Umstand zeigt einen Bedarf an Wissen über Anforderungen vor, während und nach dem Gebrauch des Produktes, Betriebsbedingungen, Lastsituationen, erforderliche Funktionalitäten und deren Wechselwirkungen auf, bevor diese real in Erscheinung treten. In erster Linie gilt diese Situation für die Entwicklung neuer Produkte. Der Großteil der Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben basiert hingegen auf zeitlich vorher durchgeführten Vorhaben, im Sinne eines iterativen Verbesserungsprozesses. Eine weitere Differenzierung von einer Neuentwicklung repräsentiert die Anpassung einer bestehenden Konstruktion, um spezifischen Kundenanforderungen gerecht werden zu können. Prinzipiell wird zwischen folgenden Entwicklungs- bzw. Konstruktionsarten unterschieden, geordnet nach zunehmendem Arbeitsumfang (Ehrlenspiel, 2009, S. 258ff; Niemann/Winter/Höhn, 2005, S. 11f; VDI 2222 Bl.1, 1997, S.7ff):

- **Konstruktion mit festem Prinzip:** Arbeitsprinzip und Gestalt liegen fest, es geht im Wesentlichen um die Dimensionierung der Einzelteile. Ein Beispiel wäre die Konstruktion eines Getriebes mit verändertem Achsabstand in einer Baureihe.
- **Variantenkonstruktion:** Das Produkt wird als Kombination vorhandener Module, die häufig parametrisiert werden können, konfiguriert. Dabei ist die grundsätzliche Anordnung der Module vorgedacht. Beispiele hierfür gibt es u.a. im Getriebebau oder bei Armaturen, z.B. Werkstoffvarianten.

- **Anpassungskonstruktion:** Bei definierter und feststehender Gesamtfunktion ist in Teilbereichen das Auffinden neuer bzw. zusätzlicher Lösungsprinzipien erforderlich. Auftragspezifisch wird ein vorhandenes Produkt modifiziert, um speziellen Anforderungen optimal zu entsprechen. Hierbei können einzelne Teilfunktionen vollständig neu zu entwickeln sein. Diese Konstruktionsart ist für Investitionsgüter typisch.
- **Neukonstruktion:** Das gesamte Produkt wird im Wesentlichen neu erarbeitet, z.B. Ersetzen eines gestuften Getriebes durch ein stufenloses.

Unabhängig von der Entwicklungs- bzw. Konstruktionsart, repräsentiert erfolgreiches Entwickeln und Konstruieren eine Integrationsleistung, die vielfältige Wissensinhalte, Wissensformen und Kompetenzen erfordert. Es beinhaltet sowohl systematische und analytische Arbeitsschritte als auch unterbewusste, gefühlsgeleitete sowie kreative Denkprozesse. (Heymann, 2005, S. 15)

2.1.3 Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

Analysiert man die intuitive Vorgehensweise respektive notwendige Tätigkeiten beim Entwickeln und Konstruieren, so steht am Beginn dieses Prozesses das Verstehen und Klären der spezifischen Anforderungen. Im Anschluss daran beginnt der eigentliche Lösungsprozess, als Konkretisierungsfolge von prinzipiellen Lösungsansätzen, über gestaltgebende Maßnahmen bis hin zum ausgearbeiteten und realisierbaren Produkt.

Die Gliederung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses in die vier Phasen:

- **Klären und Präzisieren** im Sinne einer informativen Festlegung,
- **Konzipieren** im Sinne einer prinzipiellen Festlegung,
- **Entwerfen** im Sinne einer gestalterischen Festlegung,
- **Ausarbeiten** im Sinne einer herstellungstechnischen Festlegung,

bildet die essentielle Basis sämtlicher holistischer Entwicklungsmethodiken bzw. lassen sich diese auf eben jene Phasen reduzieren (Abb. 7). (Breiing/Flemming, 1993, S. 1ff; Ehrlenspiel, 2009, S. 247ff; Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 11ff; Koller, 1994, S. 74ff; Niemann/Winter/Höhn, 2005, S. 4ff; VDI 2221, 1993, S. 17ff)

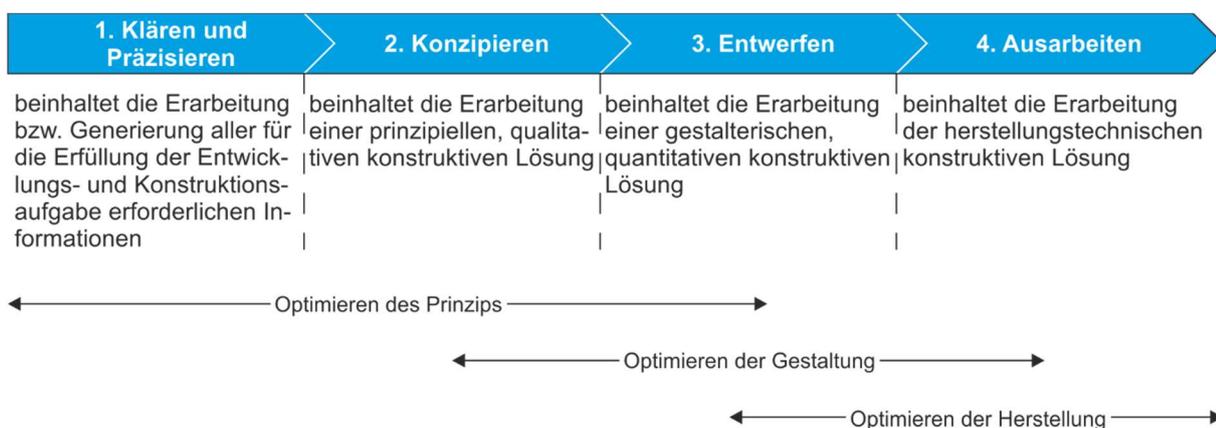


Abbildung 7: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

Betrachtet man die Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses als Schwerpunkte des Handelns, so implizieren diese über deren Abfolge einen steigenden Konkretisierungsgrad.

Basierend auf diesem Umstand, als wesentliche Ordnungskomponente, wurde das Münchener Produktkonkretisierungsmodell als sogenanntes Navigationsmodell für den Entwicklungsprozess definiert.

Dieser Navigator enthält vier Ebenen (Abb. 9) zur Erfassung und Strukturierung der Ziele (**Anforderungsmodell**), zur Ermittlung relevanter Produkteigenschaften (**Funktionsmodell**), zur Durchdringung der Problemstellung (**Wirkmodell**) und zur Spezifikation der Lösung (**Baumodell**). (Ponn/Lindemann, 2008, S. 23ff)

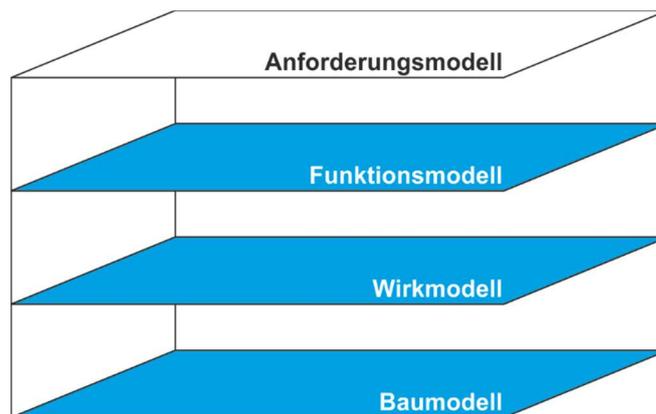


Abbildung 9: Münchener Produktkonkretisierungsmodell (vgl. Abb. 1.13: Ponn/Lindemann, 2008, S. 24)

Grundsätzlich entsprechen diese Ebenen den jeweiligen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses aus Abbildung 7.

Das spezifische Merkmal liegt in der besonderen Fokussierung der Anforderungen, als technische Beschaffenheit, Fähigkeit oder Leistung. Ponn und Lindemann (2008, S. 24f) formulierten die Notwendigkeit, parallel zur Konkretisierung der Lösung Anforderungen zu ergänzen, detaillieren und konkretisieren. Grafisch entsteht dadurch ein Anforderungsraum, parallel zum durch Funktions-, Wirk- und Baumodell beschriebenen Lösungsraum (Abb. 9).

Die Betonung der Definition, und vor allem auch Pflege, von Anforderungen bzw. allgemein der frühen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses verdeutlicht die Komponenten Problemkenntnis und -verständnis als wesentliche Faktoren einer zielgerichteten Lösungssuche.

2.1.4 Die Anfangsphasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses als entscheidende Komponenten der Produktentwicklung

Die Kenntnisse, respektive das Wissen, über ein technisches Produkt nehmen während des Produktkreislaufs kontinuierlich zu.

Deren Verlauf kann dabei, in Abhängigkeit unterschiedlichster Faktoren wie beispielsweise der grundsätzlichen Gestaltung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses, variieren. Abbildung 10 stellt den zeitlichen Verlauf der Kenntnisse über Produkteigenschaften von zwei unterschiedlichen Quellen qualitativ gegenüber.

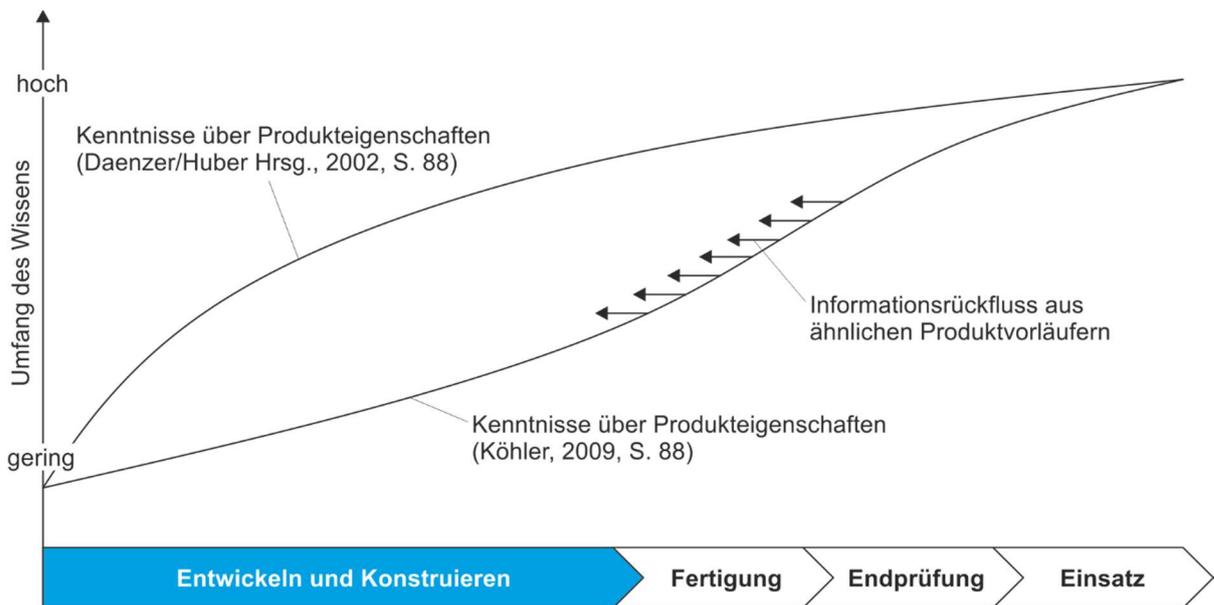


Abbildung 10: Verlauf der Kenntnisse über den Produktkreislauf eines technischen Produktes (vgl. Abb. 3.2: Köhler, 2009, S. 28; Abb. 2.4: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 88)

Abweichend von den in Abbildung 10 dargestellten Verläufen, welche sich annähernd asymptotisch einem Maximum nähern, kann ein essentieller Wissenszuwachs auch erst während des Einsatzes eines Produktes zu verzeichnen sein. Des Weiteren findet ein Informationsrückfluss aus ähnlichen Produktvorläufern typischerweise während des gesamten Produktkreislaufes statt (Abbildung 10 – Verlauf der Kenntnisse über Produkteigenschaften nach Köhler).

Eine fundierte Wissensbasis des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erfordert somit spezifische Erfahrungen aus entsprechenden Informationsrückflüssen oder alternativ dazu ein systematisches Klären und Präzisieren und darauf aufbauendes Konzeptionieren. Ein in industriellen Entwicklungsvorhaben häufig gegebener Informationsrückfluss durch bewusst vorgesehene, oder im Fortschritt notwendig gewordene, Iterationsschleifen ist stets mit erheblichem Aufwand verbunden und führt nicht zwangsläufig zum gewünschten bzw. angestrebten Ergebnis.

Untersuchungen zeigen, dass Fehler bzw. Fehleinschätzungen während des Entwickelns und Konstruierens die häufigste Ursache für das Versagen technischer Produkte sind. Quantifiziert man diese Aussage, so entstehen rund 75 % der Produktfehler industrieller Güter im Bereich des Entwickelns und Konstruierens (VDI 2247, 1994, S. 5; Conrad, 2013, S. 160; Pfeifer/Schmitt Hrsg., 2007, S. 407). Die Beseitigung eben jener erfolgt in der Regel allerdings erst zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt, da häufig erst in einem fortgeschrittenen Stadium einer Entwicklung die erforderlichen Informationen zur Verfügung stehen (Abb. 11). Einen wesentlichen Einfluss auf diesen Umstand haben der oftmals mangelhafte Informationsfluss bzw. die unzureichenden oder fehlenden Rückkoppelungen aus früheren Fehlern und deren operativer Beseitigung (VDI 2247, 1994, S. 5).

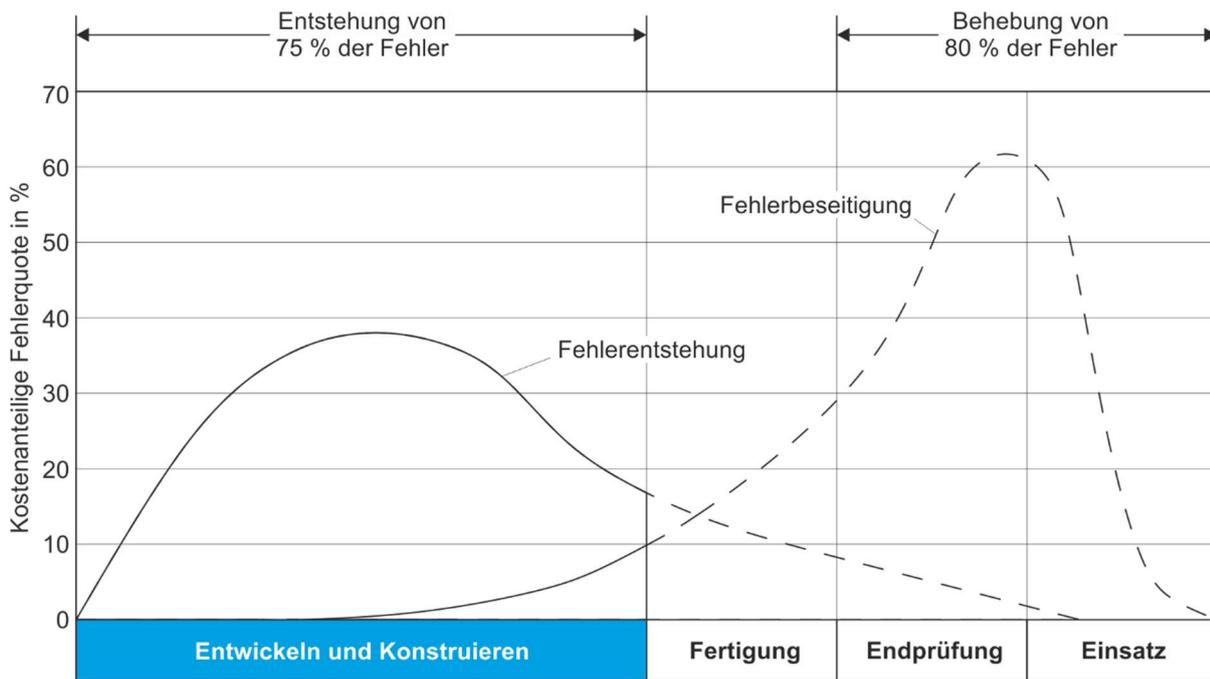


Abbildung 11: Fehlerentstehung und Fehlerbehebung (vgl. Bild 4: VDI 2247, 1994, S. 5)

Auf diesen grundlegenden Überlegungen aufbauend, verdeutlicht der von Ehrlenspiel und Meerkamm (2013, S. 668) als „Paradoxon des Konstruierens“ bezeichnete Umstand die Wichtigkeit der Anfangsphasen eines Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses.

Am Beginn eines Entwicklungsvorhabens lassen sich die Produkteigenschaften grundsätzlich am meisten beeinflussen. Die Möglichkeit deren Auswirkungen zu beurteilen ist allerdings am geringsten (Abb. 12).

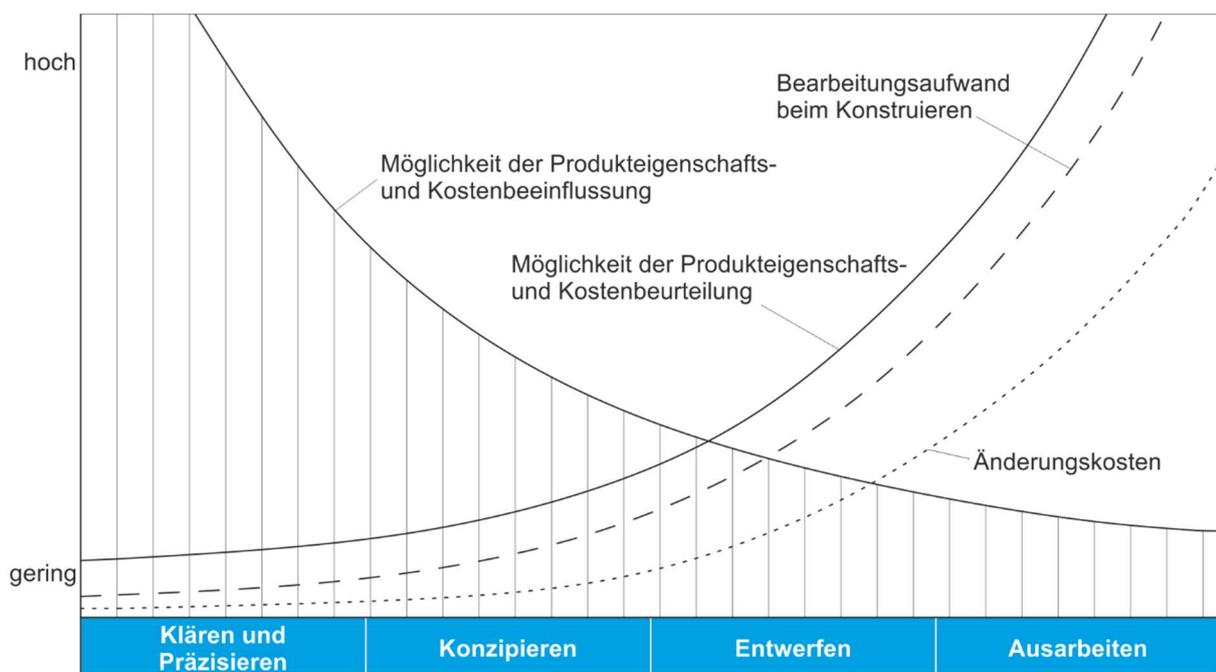


Abbildung 12: Paradoxon der Konstruktion: Die Möglichkeiten der Beeinflussung und Beurteilung sind gegenläufig (vgl. Bild 9.1-9: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 668)

Dieselbe Aussage gilt hinsichtlich der Kosten. Die Möglichkeit die Kosten eines Produktes zu beeinflussen ist zu Beginn des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses am größten. Mit Prozessfortschritt nimmt diese ab, da wesentliche Einflussgrößen wie physikalische Effekte und Wirkprinzipien, spätestens mit der Konzeptauswahl, festgelegt werden. (VDI 2235, 1987, S. 5). Der Bearbeitungsaufwand sowie etwaige Änderungskosten verlaufen, wie die Möglichkeit der Beurteilung, dazu gegenläufig (Abb. 12).

Änderungen im fortgeschrittenen Stadium können durch ein systematisches und strukturiertes Vorgehen, wie es durch eine Vielzahl an entwicklungsmethodischen Vorgehensmodellen zur Verfügung gestellt wird, vermieden werden. Des Weiteren ist es möglich durch den gezielten Einsatz effizienter Methoden und Werkzeuge die Systemkenntnis zu Beginn einer Entwicklung auf ein höheres Niveau zu heben. Eben dieses Potential wird von der Zielsetzung dieser Arbeit aufgegriffen (Kapitel 1, S. 1f).

2.2 Entwicklungsmethodische Vorgehensmodelle

Steigende Komplexität, als natürliche Folge technischer Evolution, gepaart mit einem immer höheren Maß an Interdisziplinarität in der Produktentwicklung lässt ein rein intuitiv gestütztes Vorgehen bei Entwicklungshandlungen in der Regel nicht mehr zu, sondern erfordert eine methodische Arbeitsweise.

Durch den Einsatz einer logischen und systematischen Vorgehensweise sollen intuitive und auf Erfahrung gestützte Aktivitäten unterstützt und keinesfalls abgewertet bzw. ersetzt werden. Denn der operative Prozess des Entwickelns und Konstruierens benötigt beides, Intuition und Methodik. (Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 157ff; Pahl et. al., 2007, S. 9f; Koller, 1994, S. 81)

Im Laufe der Zeit entstanden eine Vielzahl an entwicklungsmethodischen Vorgehensmodellen, die durch einen entweder deskriptiven oder präskriptiven Charakter gekennzeichnet sind. (Cross, 2008, S. 29ff)

Deskriptive Modelle beschreiben die typischerweise beim Entwickeln auftretenden Handlungsmuster und repräsentieren somit auf Erfahrung und allgemeingültigen Richtlinien basierende heuristische Prozessfolgen, deren Basisstruktur Zyklen aus Analyse- und Syntheseschritten (Abb. 13) bilden. (Pulm, 2004, S. 78)

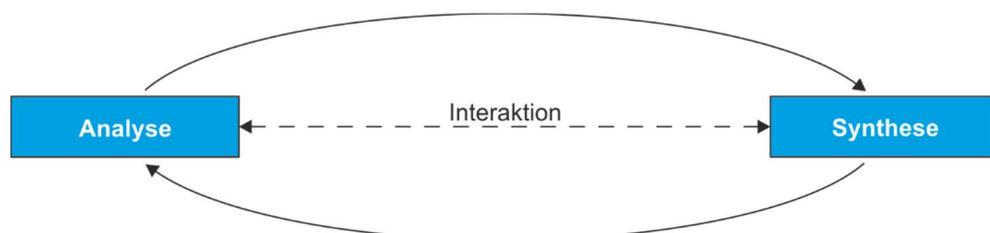


Abbildung 13: Abfolgen von Analyse- und Syntheseschritte als Basis deskriptiver Vorgehensmodelle der Produktentwicklung

Diese auf Mikro- oder Elementarebene (Braun, 2005, S. 29) ansetzenden Vorgehensmodelle sind universell zur Bearbeitung von Aufgaben- und Problemstellungen unterschiedlichster Art einsetzbar, weisen demzufolge allerdings einen in der Praxis oftmals zu Schwierigkeiten führenden hohen Abstraktionsgrad auf.

Auf der anderen Seite definieren präskriptive Modelle algorithmisch respektive systematisch geprägte Prozeduren, die in der Regel durch eine schrittweise Prozessfolge einen Leitfaden zur Handhabung spezifischer Entwicklungsaufgaben geben (Abb. 14). Die Intention liegt dabei in der vollständigen Erfassung der Aufgabenstellung und darin, das Problem auf den Punkt zu bringen. (Cross, 2008, S. 29ff)

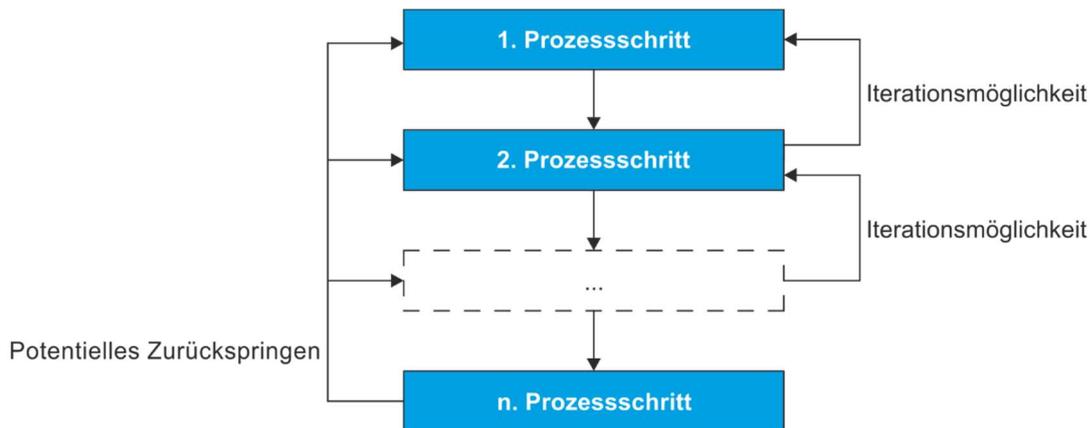


Abbildung 14: Schrittweise Prozessfolgen als prinzipielle Basis präskriptiver Vorgehensmodelle

Der Intention einer stetigen Optimierung und Qualitätssteigerung, im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, wird durch die Möglichkeit eines flexiblen Vor- und Zurückspringens auf entsprechende Abschnitte sowie durch das Vorsehen etwaiger Iterationsschleifen (Abb. 14) Rechnung getragen.

Präskriptive Vorgehensmodelle, als Makro-Logiken (Braun, 2005, S. 28), werden durch gewisse allgemeine Denk- bzw. Handlungsstrategien, wie beispielsweise das Denken in Systemen, vom Abstrakten zum Konkreten oder der Suche nach Alternativen konstituiert. Diese Grundprinzipien oder Arbeitstechniken werden in der Literatur als Grundlage methodischen Arbeitens angesehen (Ehrlenspiel, 2009, S. 75ff; Lindemann, 2009, S. 55ff; Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 284ff).

Zu den Vertretern präskriptiver Vorgehensmodelle zählen auch die etablierten Entwicklungsmethodiken des Maschinenbaus, wie beispielsweise das generelle Vorgehensschema nach VDI-Richtlinie 2221 (1993) oder die Hauptprozessschritte des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses nach Pahl und Beitz (Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 17).

Die Grenzen zwischen dem durch deskriptive Vorgehensmodelle behandelten allgemeinen Problemlösen und spezifischer Produktentwicklung, im Fokus präskriptiver Modelle, sind fließend. Die Frage der Anwendung, deskriptiv oder präskriptiv, sollte deshalb nicht entweder oder lauten, sondern vielmehr können allgemeine Problemlösezyklen in den einzelnen Phasen des Entwickelns und Konstruierens eingesetzt werden.

Abbildung 15 veranschaulicht eine Gegenüberstellung der grundsätzlichen Charakteristika von deskriptiven und präskriptiven Vorgehensmodellen der Produktentwicklung.

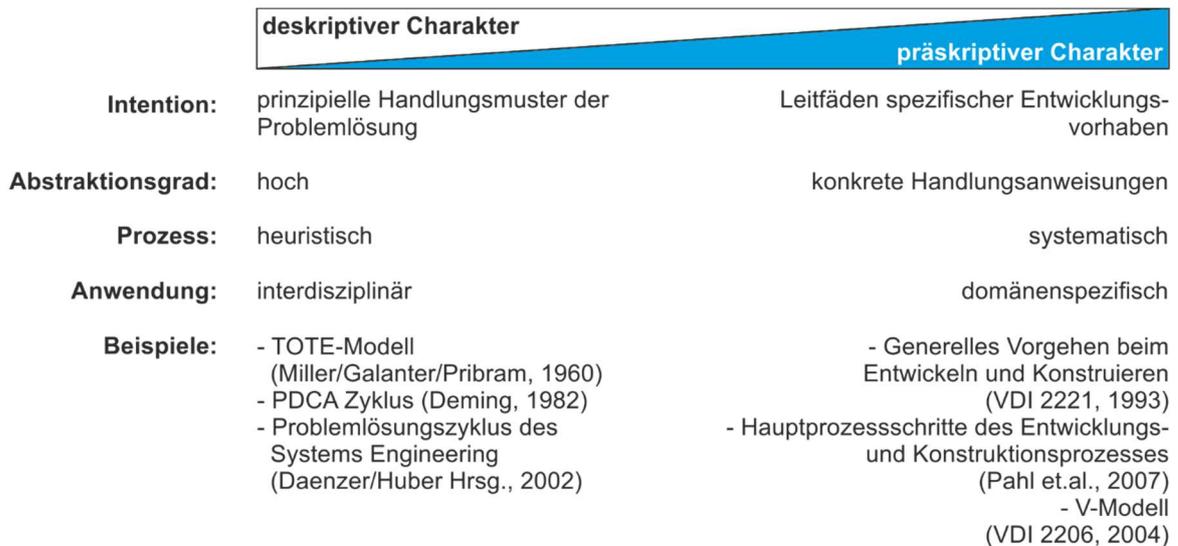


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Charakteristika deskriptiver und präskriptiver Vorgehensmodelle der Produktentwicklung

Eine exemplarische Einteilung ausgewählter Vorgehensmodelle ist beispielsweise in der Arbeit von Braun (2005, S. 28) zu finden.

Entscheidend für den effizienten Einsatz entwicklungsmethodischer Vorgehensmodelle ist nicht die initiale Auswahl desselben, sondern die Art und Weise der Applikation. Untersuchungen (Gerson/Green, 2001) zeigen keinen kausalen Zusammenhang zwischen Entwicklungsablauf und Ergebnisgüte, belegen jedoch die essentielle Rolle eines strukturierten Vorgehens, um die Gesamtheit der Problemstellung zu erfassen und die Richtigkeit von Aktivitäten zu bestätigen. Allerdings können in der Produktentwicklung Erfahrung, sofern sie nicht die Denkweise einschränkt, technisches Verständnis, eine einschlägige Ausbildung und Teamfähigkeit niemals durch Handlungsanweisungen ersetzt werden, da diese darauf aufbauen.

Die in den meisten realen Problemstellungen vorherrschende Komplexität, durch schwer identifizierbare Parametereinflüsse, unbekannte Störeinflüsse, fehlende Informationen hinsichtlich des Langzeitverhaltens, schwer überprüfbarer Plausibilität, also einer prinzipiell fehlenden bzw. unvollständigen Systemkenntnis, erfordert aufwendige Iterationen während des gesamten Produktentwicklungsprozesses.

Diese Gegebenheit definiert eine wesentliche Aufgabe bzw. ein wesentliches Ziel der methodischen Produktentwicklung, die gezielte Reduktion von Iterationsschleifen.

Dies kann, unabhängig vom Vorgehensmodell, durch den Einsatz von Analyseverfahren, gezielten Berechnungen, Simulationen und Versuchen, sowie deren Kombination, und einer Vielzahl weiterer problemspezifischer Methoden und Werkzeuge der Entwicklungsmethodik erreicht werden.

2.3 Die Handhabung der initialen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses in den VDI-Richtlinien 2221 (1993) und 2206 (2004)

Die Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) erheben den Anspruch den aktuellen, praxisorientierten Stand der Technik laufender und zukünftiger Entwicklungen zu repräsentieren. Im Bereich der Produktentwicklung etablierten sich, vor allem im deutschsprachigen Raum, im Speziellen die Richtlinien 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, und 2206, Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, als methodische Basis des industriellen Entwicklungsprozesses.

Als Teil des VDI-Handbuches Produktentwicklung und Konstruktion definieren beide Richtlinien prinzipiell ein generelles, präskriptiv orientiertes Vorgehen und bedienen sich dabei der Grundlagen der Systemtechnik.

2.3.1 Systemtechnik als elementare Grundlage

Die Intention allgemeine Handlungen bei der Problemlösung auch auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess zu übertragen, ist aufgrund der Differenziertheit der Problemstellungen naheliegend und implizit Teil jedes entwicklungsmethodischen Vorgehensmodells.

Die Systemtechnik kann als eine solche, auf bestimmten Denkmodellen und Grundprinzipien beruhende, allgemeine Wegleitung zur zweckmäßigen und zielgerichteten Gestaltung komplexer Systeme angesehen werden (Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. XVIII). Bruns (1991, S.2) definiert die Systemtechnik zudem als Verallgemeinerung und zugleich Erweiterung der ingenieurwissenschaftlichen Methodik. Dabei gilt die Verallgemeinerung der Erstellung grundlegender methodischer Konzepte und die Erweiterung erstreckt sich auf methodische Instrumentarien für die Bearbeitung von Planungs- und Gestaltungsaufgaben. Hierfür stellt die Systemtechnik eine allgemeine formale Sprache bereit, als Grundlage interdisziplinärer Problemlösungen.

Der Begriff System bezeichnet dabei eine Menge von Elementen, welche Eigenschaften besitzen und durch Relationen miteinander verknüpft sind, also eine Ansammlung miteinander in Beziehung stehender Teile (Bruns, 1991, S. 30f):

- Ein System besteht aus verschiedenen Elementen, die auch Komponenten, Teile, Bausteine usw. genannt werden können.
- Diese Elemente weisen Eigenschaften auf, die als diskrete Attribute, Funktionen oder Merkmale angegeben werden können.
- Zwischen den Elementen bestehen Beziehungen, die die funktionelle Verknüpfung der Elemente wiedergeben.
- Die Elemente mit ihren Eigenschaften und Beziehungen bilden eine abgegrenzte Anordnung.

Obwohl demzufolge ein System eine abgegrenzte Einheit repräsentiert, stehen in der Regel nicht nur die Elemente untereinander in Beziehung, sondern auch mit ihrer Umgebung.

Charakteristisch für ein System ist ein größeres Maß an Beziehungen innerhalb der Systemgrenzen, bzw. deren Wahrnehmung, als zwischen System und Umfeld (Abb. 16), wodurch eine Gesamtheit entsteht.

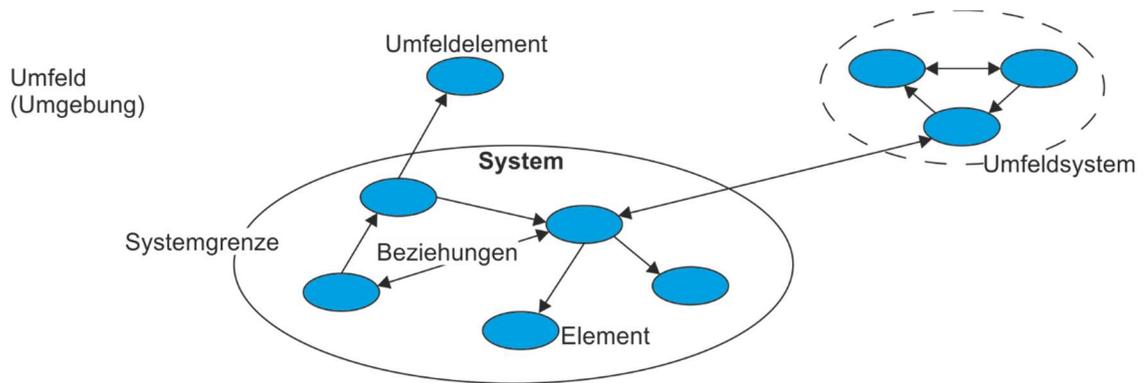


Abbildung 16: Grundbegriffe des Systemdenkens (vgl. Abb. 1.2: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 5)

Eine wesentliche Komponente bei der methodischen Bearbeitung einer Problemstellung stellt deren Strukturierung dar. Durch die Dekomposition eines Systems, in Teilsysteme und Systemelemente, entsteht ein hierarchischer Systemaufbau (Abb. 17).

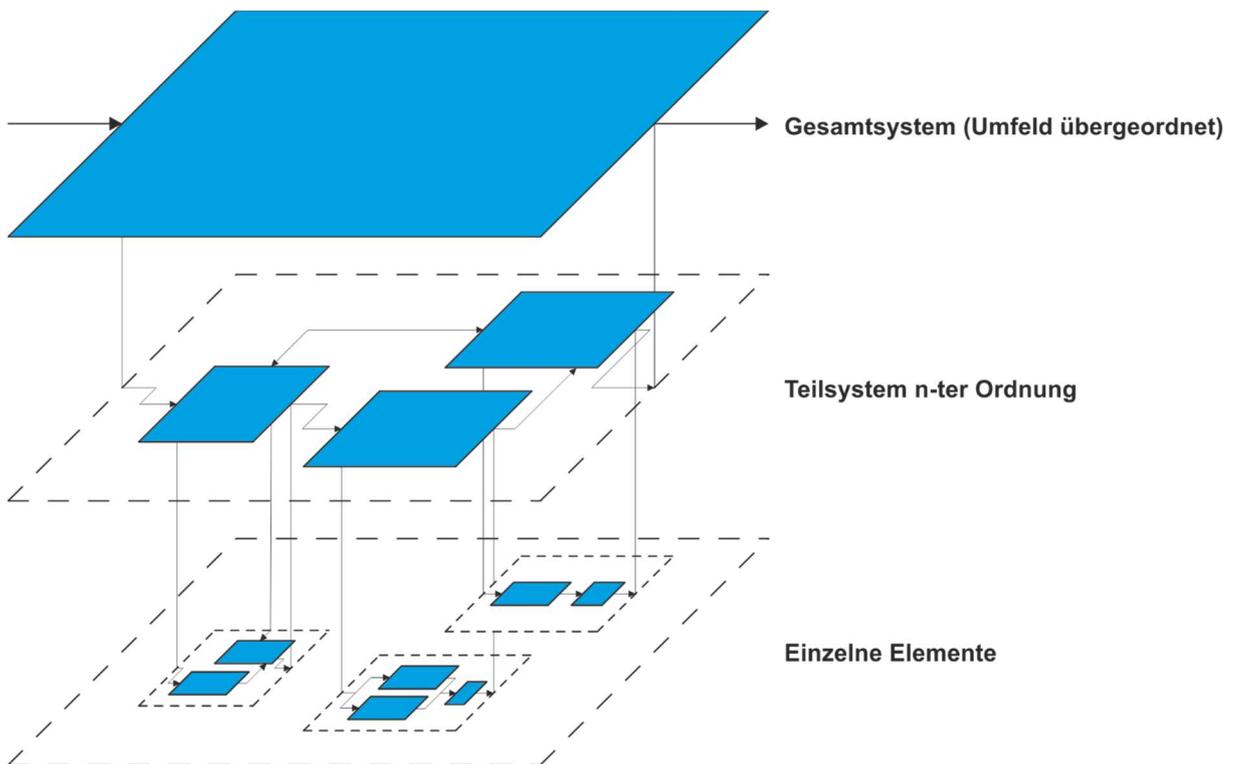


Abbildung 17: Stufenweise Auflösung von Systemen (vgl. Bild 2.3: VDI 2221, 1993, S. 4; Abb. 1.11: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 18; Abb. 5.3: Bruns, 1991, S. 49)

Dieser Stufenbau ermöglicht die Aufgliederung eines komplexen Gesamtproblems in Teilprobleme und verdeutlicht zudem etwaige Interdependenzen, sofern diese bekannt sind. In weiterer Folge können Einzel- und Teillösungen ausgearbeitet werden, deren Verknüpfung letztlich eine zufriedenstellende Gesamtlösung ergeben sollte.

Die systemhierarchische Denkweise offeriert grundsätzlich zwei konträre Betrachtungsrichtungen (Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 17):

- Die Untersystem-Betrachtung regt die Frage an, aus welchen Elementen sich ein System oder Teilsystem zusammensetzen lässt.
- Im Fokus der Übersystem-Betrachtung stehen größere Zusammenhänge sowie welchen Systemen übergeordneter Art ein System zugehört.

Diese unterschiedlichen Betrachtungsweisen können auch Ansatzpunkte differenzierender Optimierungshandlungen sein. So wäre es unter Umständen denkbar die Teilsysteme eines technischen Produktes für sich zu optimieren, um beispielsweise den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen, oder man versucht Einsatzbedingungen in einem übergeordneten System zu schaffen bzw. zu finden die einen kontinuierlichen Betrieb im Punkt höchster Effizienz zulassen.

Neben dem systemorientierten Denkansatz, zur Analyse und Bearbeitung komplexer Erscheinungen, beinhaltet das systemtechnische Vorgehensmodell (Abb. 18) sowohl eine Makro- als auch eine Mikro-Logik zur allgemeinen Problemlösung. (VDI 2221, 1993, S. 3f)

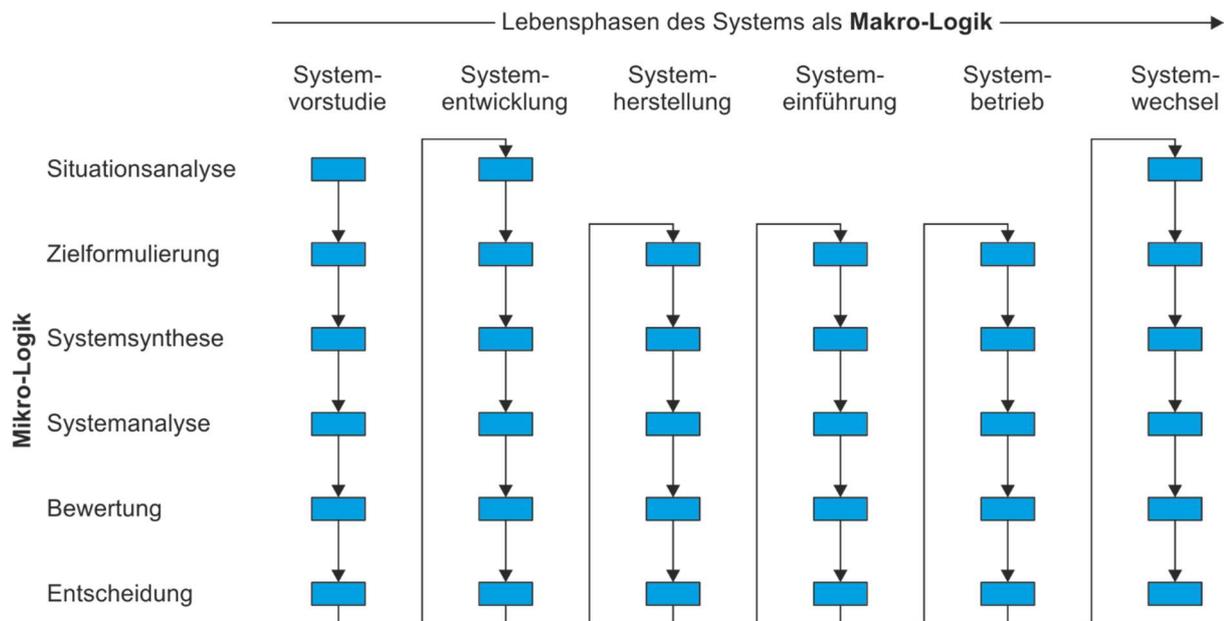


Abbildung 18: Systemtechnisches Vorgehensmodell (vgl. Bild 2.1: VDI 2221, 1993, S. 3)

Die Makro-Logik gliedert den zeitlichen Werdegang eines Systems vom Abstrakten zum Konkreten in sogenannte Lebensphasen. Im Kontext Produktentwicklung können diese den spezifischen Phasen des Produktkreislaufes zugeordnet werden (Abb. 6).

Diese Untergliederung ermöglicht einen stufenweisen Planungs-, Entscheidungs- und Konkretisierungsprozess des Werdegangs einer Lösung, wobei sowohl Anzahl als auch Formalismus der Abwicklung in Abhängigkeit von Art, Umfang und Bedeutung des Entwicklungsprojektes variieren können. Des Weiteren kann dadurch eine Reduktion der Komplexität der Problemstellung und des Risikos von Fehlentscheidungen erreicht werden. (Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 37)

Auf der anderen Seite repräsentiert die im systemtechnischen Vorgehensmodell integrierte Mikro-Logik (Abb. 18) eine Problemlösungsstrategie, welche prinzipiell auf jede Lebensphase eines Systems angewendet werden kann und soll. (VDI 2221, 1993, S. 3)

Die Schwerpunkte dieses als Problemlösungszyklus bezeichneten Modells liegen in der Zielsuche bzw. Zielkonkretisierung, der darauf aufbauenden Lösungssuche und einer entsprechenden Entscheidung. Die einzelnen Teilschritte stehen dabei untereinander in Beziehung bzw. liefern Informationen als Basis der jeweils folgenden Schritte (Abb. 19). (Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 94ff)

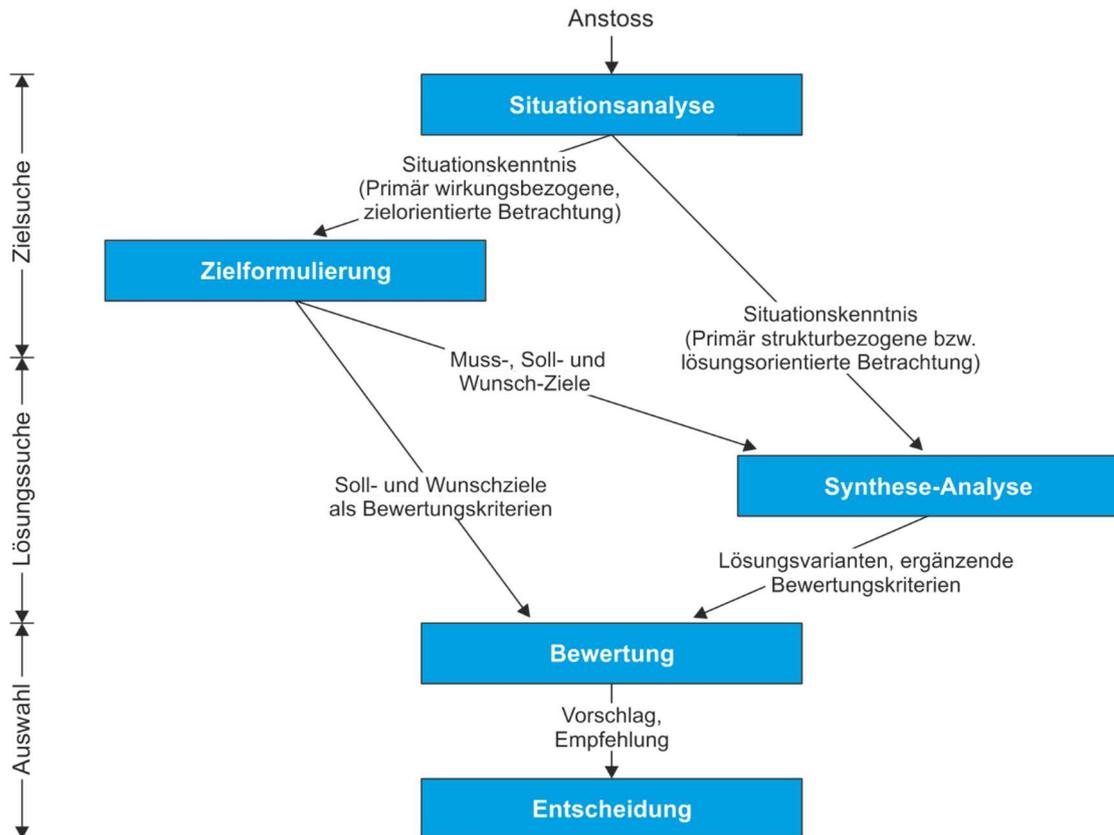


Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen den Teilschritten des Problemlösungszyklus als Mikro-Logik (vgl. Abb. 2.8: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 96)

Der systemtechnische Problemlösungszyklus ist jedoch nicht als lineare Abfolge zu verstehen. Für dessen effiziente Anwendung sind einerseits gedankliche Vorgriffe, aufgrund des Konnex der Aktivitäten, und andererseits Wiederholungszyklen eines oder mehrerer Arbeitsschritte, gemäß eines iterativen Vorgehens, notwendig. (VDI 2221, 1993, S. 4; Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 96f)

Ausgehend von der allgemeinen systemtechnischen Problemlösungsmethodik sind spezifische Vorgehensmodelle mit präskriptivem Charakter, die auf die speziellen Verhältnisse und Erfordernisse beim Entwickeln und Konstruieren zugeschnitten sind, ableitbar. Die Systemtechnik kann demzufolge als deren methodische Basis interpretiert werden.

2.3.2 VDI 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Die VDI-Richtlinie 2221 wurde mit der Zielsetzung ausgearbeitet eine generelle Logik des Entwickelns und Konstruierens, als Leitlinie eines zweckmäßigen Vorgehens in der Praxis, zur Verfügung zu stellen.

Das Gesamtverfahren wird dazu in sieben generelle Arbeitsabschnitte (Abb. 20), die je nach Aufgaben- bzw. Problemstellung vollständig, teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen werden, unterteilt.

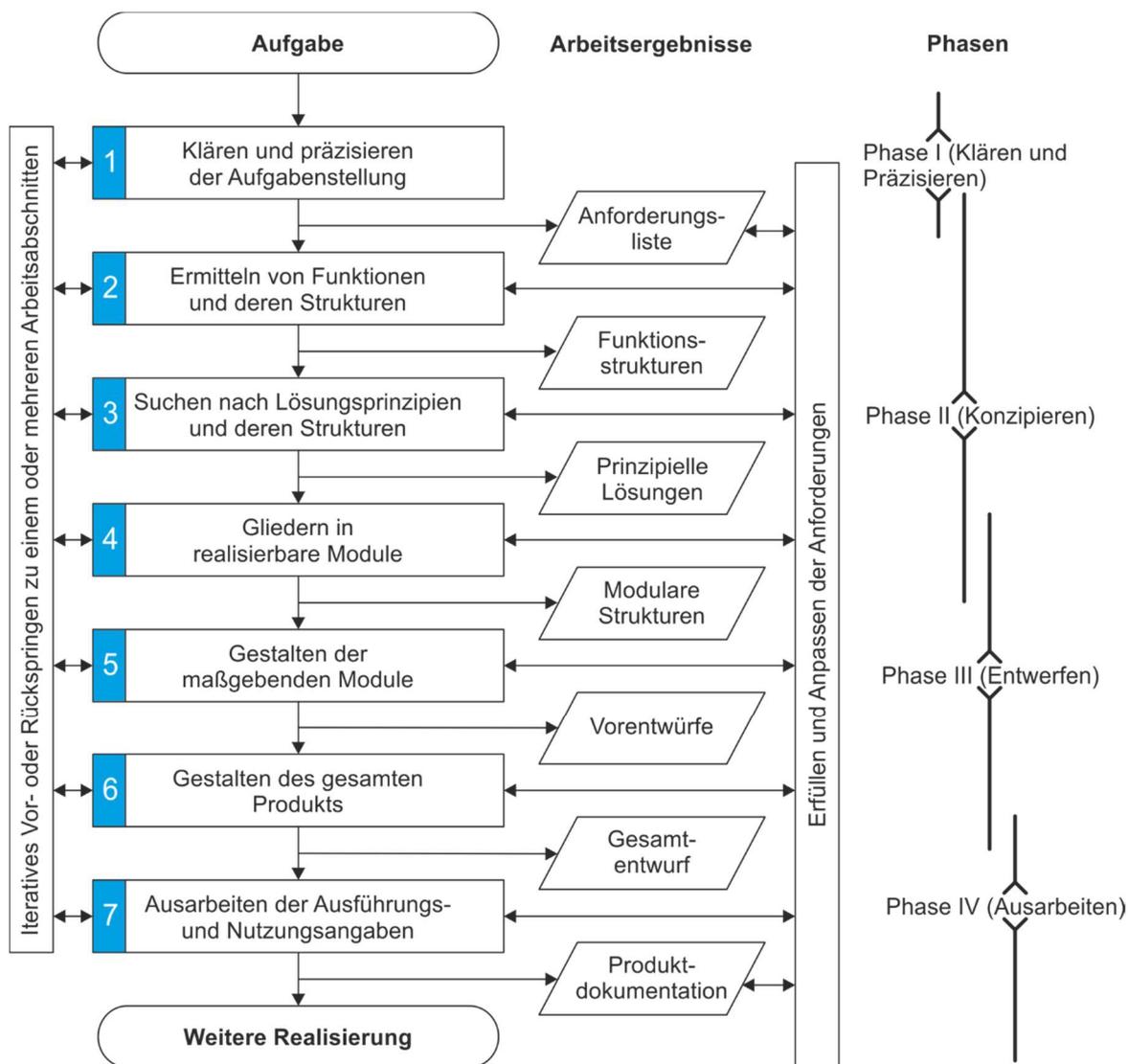


Abbildung 20: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (vgl. Bild 3.3: VDI 2221, 1993, S. 9)

Aus jedem Arbeitsabschnitt gehen entsprechende Arbeitsergebnisse hervor, wobei jeweils mehrere Lösungsvarianten untersucht, gegebenenfalls erprobt und beurteilt, im Sinne eines Auswahl-, Optimierungs- und Entscheidungszyklus, werden müssen. Eine möglicherweise zweckmäßige Parallelisierung einzelner Arbeitsabschnitte sollte, ebenso wie eine aus Komplexitätsgründen notwendige weitere Untergliederung, situationsspezifisch erfolgen.

Der fließende und überlappende Übergang der prinzipiellen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses (Kapitel 2.1.3, S. 12) verdeutlicht sich bei Zuordnung bzw. Zusammenfassung der Arbeitsabschnitte (Abb. 20). Die folgende Abbildung (21) zeigt den VDI-Vorgehensplan mit den, zu den Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses zugeordneten, Arbeitsschritten einer Neukonstruktion vom Entwicklungsauftrag bis zur Fertigungsfreigabe.

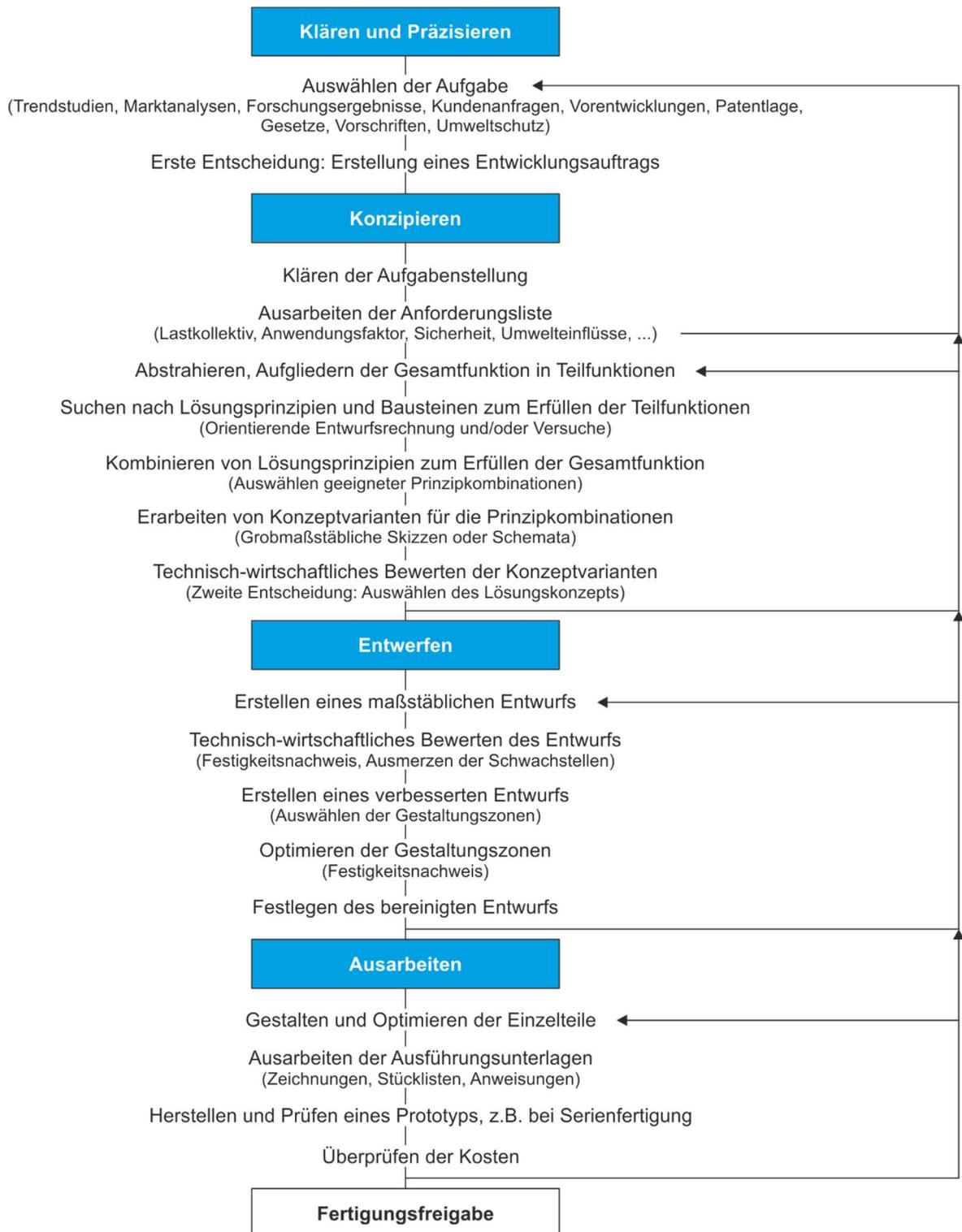


Abbildung 21: Arbeitsschritte der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit nach VDI 2222 Bl. 2 (vgl. Abb. 1.4: Niemann/Winter/Höhn, 2005, S. 5)

Demzufolge ist das entwicklungsmethodische Vorgehensmodell gemäß VDI 2221 gekennzeichnet durch (VDI 2221, 1993, S. 13):

- Das Formulieren von Anforderungen zur Präzisierung der zu lösenden Aufgaben, das Suchen und Entwickeln von Lösungen und das Auswählen bzw. Optimieren von Lösungsvarianten.
- Beim Formulieren der Anforderungen sind Vollständigkeit, Genauigkeit, Gewichtung, Lösungsunabhängigkeit und Ordnung erforderlich.
- Das Suchen und Entwickeln von Lösungen geschieht in unterschiedlichen Konkretisierungs- und Komplexitätsgraden. Unterschieden werden Lösungen prinzipiellen Charakters für die Gesamtfunktion und/oder für einzelne Teilfunktionen, Gestaltungselemente und Gestaltungsmodule als unvollständige Vorentwürfe, Gestaltungselemente und Gestaltungsmodule zum vollständigen Gesamtentwurf verknüpft sowie herstellungs- und nutzungsorientierte Detailfestlegungen als Produktdokumentation.
- Das Entscheiden für Lösungsvarianten, mit dem Ziel der Lösungsoptimierung, ist durch eine vergleichende Beurteilung bzw. Bewertung der Erfüllungsgrade der Varianten hinsichtlich der gestellten Anforderungen gekennzeichnet. Dabei werden Gebrauchs- oder Nutzwerte sowie Schwachstellen einer Lösung durch Bezug auf eine definierte Ideallösung ermittelt.

Am Beginn eines Produktentwicklungsvorhabens liegt der Fokus gemäß VDI 2221 auf einer umfangreichen Klärung der Aufgabenstellung und deren unmissverständlicher Dokumentation in Form einer Anforderungsliste. Das kontinuierliche Anpassen der Anforderungen durch eine entwicklungsbegleitende Präzisierung und gegebenenfalls auch Modifikation der Aufgabenstellung repräsentiert dabei, aufgrund der in diesem Stadium oftmals vorherrschenden mangelnden Systemkenntnis bzw. umgekehrt des Erkenntniszuwachses während des Entwicklungsablaufes (Abb. 10), eine Notwendigkeit. In Abbildung 20 wird diesem Umstand durch eine Informationsbrücke zwischen Arbeitsabschnitten und Anforderungsliste Rechnung getragen. (VDI 2221, 1993, S. 10)

Das Ermitteln von Funktionen, deren Gliederung und Kombination zu Strukturen bildet die Grundlage für die Suche nach Lösungen. In diesem Kontext versteht man unter Funktionen lösungsneutrale Beschreibungen des Verhaltens von Produkten oder Teilen des Produktes (VDI 2222 Bl. 1, 1997, S. 6). Der hohe Abstraktionsgrad von Funktionen und Funktionsstrukturen zielt darauf ab einen wertfreien Raum für Lösungen zu schaffen.

Die Suche nach prinzipiellen Lösungen, als unscharfe aber funktionsbestimmende und durch die Einbeziehung von Effekten gekennzeichnete Vorstellungen zur Realisierung von Produkten (VDI 2222 Bl. 1, 1997, S. 6), und deren Gliederung stellt den Beginn des anschließenden und darauf aufbauenden Konkretisierungsprozesses bis zum fertigen Produkt dar. Dabei werden prinzipielle Lösungen methodisch gefunden, wenn vorgegebene Funktionen durch entsprechende Effekte realisiert werden können.

Eine detaillierte Behandlung der einzelnen Arbeitsabschnitte des generellen Vorgehens beim Entwickeln und Konstruieren (Abb. 20), sowie etwaiger Methoden und Hilfsmittel, erfolgt in den VDI-Richtlinien 2222 Bl. 1 und 2223.

2.3.3 VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Analog zur VDI-Richtlinie 2221, die allgemeingültige und neutrale Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens behandelt, werden in der VDI-Richtlinie 2206 Methoden zur Entwicklung mechatronischer Systeme beschrieben. Der Begriff Mechatronik bezeichnet dabei das interdisziplinäre Zusammenwirken der ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik, welches aufgrund von Synergieeffekten, neuen Technologien und den damit verbundenen Erfolgspotentialen kontinuierlich an Bedeutung im Bereich Produktentwicklung gewinnt.

Ziel der Richtlinie ist somit die methodische Unterstützung der domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Systeme. Das Hauptaugenmerk liegt auf Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge für die frühen Phasen des Entwickelns (Kapitel 2.1.3, S. 12), mit Schwerpunkt Systementwurf als abgesichertes Konzept eines mechatronischen Systems. (VDI 2206, 2004, S. 8)

Im Rahmen der VDI 2206 (2004, S. 26ff) wird ein Vorgehensmodell vorgeschlagen, welches sich im Wesentlichen auf drei Elemente stützt:

- Einen allgemeinen Problemlösungszyklus (Abb. 18) als Mikro-Logik.
- Dem sogenannten V-Modell als Makro-Logik.
- Vordefinierten Prozessbausteinen zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme.

Die Strukturierung des Vorgehens im Entwicklungsprozess erfolgt auf Basis eines allgemeinen Problemlösungszyklus, wie ihn beispielsweise die Systemtechnik zur Verfügung stellt. Dabei soll die Mikro-Logik vor allem den im Prozess stehenden Produktentwickler bei der Bearbeitung vorhersehbarer und damit planbarer Teilaufgaben, aber auch bei der Lösung plötzlich auftretender, unvorhersehbarer Probleme unterstützen. (VDI 2206, 2004, S. 26)

Das aus der Softwareentwicklung übernommene und an die Anforderungen der Mechatronik angepasste V-Modell beschreibt die wesentlichen Teilschritte der Entwicklung mechatronischer Systeme (Abb. 22).

Ausgangspunkt dieses präskriptiven Vorgehensmodells repräsentieren, wie beim generellen Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 (Kapitel 2.3.2, S. 24), das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung in Form von **Anforderungen**, anhand derer das realisierte Produkt auch zu bewerten ist.

Im Rahmen des **Systementwurfs** erfolgt die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzeptes, welches die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreibt. Dabei sollen zunächst durch die Abstraktion der Anforderungen wesentliche Punkte der Problemstellung identifiziert werden, um darauf aufbauend eine Funktionsstruktur als Basis der Lösungssuche aufzustellen. Die erarbeiteten prinzipiellen Lösungen gilt es in weiterer Folge zu prinzipiellen Lösungsvarianten zu konkretisieren. (VDI 2206, 2004, S. 32ff)

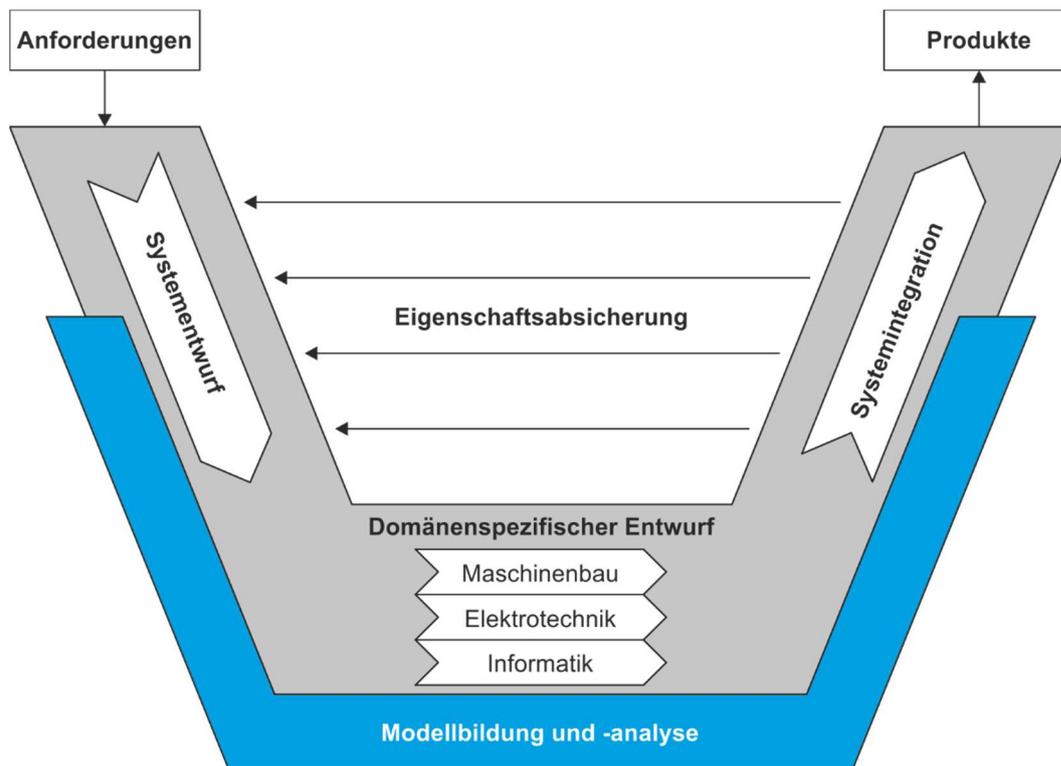


Abbildung 22: V-Modell als Makro-Logik der VDI 2206 (vgl. Bild 3-2: VDI 2206, 2004, S. 29)

Die Zuordnung von Lösungselementen zu Teilfunktionen erfolgt in der Regel getrennt, als **domänenspezifischer Entwurf**, in den beteiligten Fachgebieten, auf Basis charakteristischer Entwicklungsmethodiken. In diesem Stadium der Entwicklung bedingen die erforderliche thematische Tiefe und der Detaillierungsgrad von Auslegungen und Berechnungen, insbesondere bei kritischen Funktionen, im Allgemeinen eine domänenspezifische Bearbeitung. (VDI 2206, 2004, S. 30)

Finaler Punkt des V-Modells gemäß VDI 2206 repräsentiert die **Systemintegration** als Zusammenschluss domänenspezifischer Ergebnisse zu einem übergeordneten Ganzen, welches je nach Reifegrad als fertiges Produkt, Vorserienprodukt, Funktionsmuster oder Labormuster in Erscheinung treten kann. Die Anzahl an Gesamtsystemvarianten wird dabei in vielen Fällen durch etwaige Inkompatibilitäten einzelner Lösungen deutlich eingeschränkt. Um einen hohen Integrationsgrad zu erreichen, sollten deshalb bereits beim Systementwurf Kompatibilitätsprüfungen und Definitionen von späteren Schnittstellen, im Sinne einer Grobdimensionierung, erfolgen. (VDI 2206, 2004, S. 35ff)

Die **Modellbildung und -analyse** flankiert die einzelnen Phasen (Abb. 22) und bezeichnet die kontinuierliche Abbildung sowie Untersuchung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen. (VDI 2206, 2004, S. 30)

Die bereits erwähnten unterschiedlichen Ergebnisse durchlaufener Makro-Zyklen implizieren, ähnlich dem Vorgehensschema gemäß VDI 2221 (Kapitel 2.3.2, S. 24), je nach Art und Komplexität der Entwicklungsaufgabe mehrere Iterationsschleifen. (VDI 2206, 2004, S. 30f)

Die Anzahl der Makro-Zyklen und die durchlaufenen Teilschritte des V-Modells hängen von der spezifischen Entwicklungsaufgabe ab (Abb. 23).

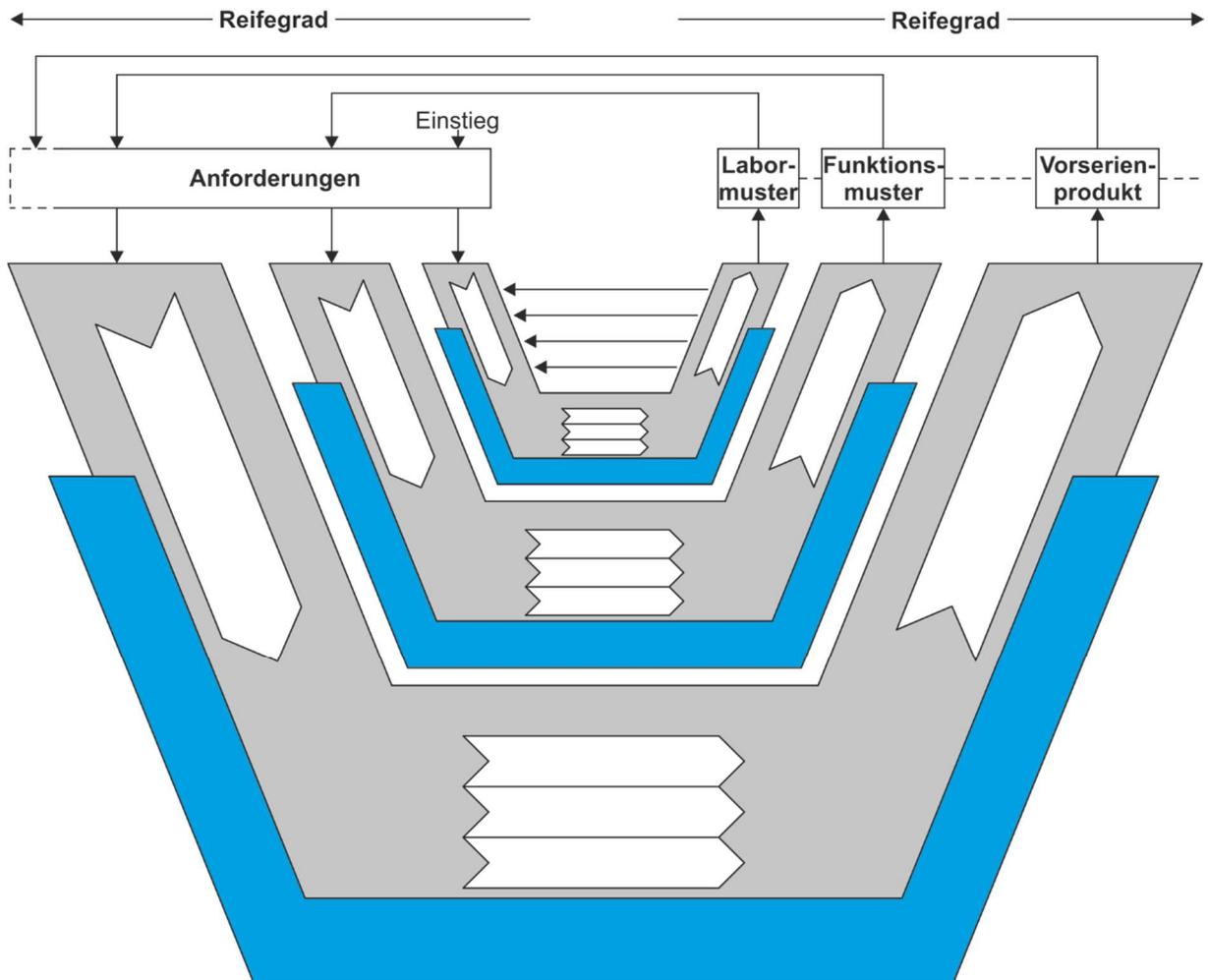


Abbildung 23: Durchlaufen mehrere Makrozyklen mit zunehmender Produktreife (vgl. Bild 3-3: VDI 2206, 2004, S. 31)

Die dritte Säule der VDI 2206, Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte, bezeichnet eine vordefinierte Beschreibung von immer wieder auftretenden Aufgabenstellungen, zu deren konkreteren Bearbeitung. Im Rahmen der Richtlinie werden Prozessbausteine für Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration, Eigenschaftsabsicherung sowie Modellbildung und -analyse beschrieben. (VDI 2206, 2004, S. 32ff)

2.4 Reflexion

Mit dem Ziel das Potential neuer bzw. noch ungenutzter Technologien in Form oder als Teil von Produkten zu verwerten, entwickelte sich deren Entstehungsprozess zu einer interdisziplinären Aufgabenstellung. Um dessen Handhabung als Lösung eines multidimensionalen Optimierungsproblems strukturiert und damit plan-, reproduzier- und bewertbar zu gestalten, ist eine methodische Vorgehensweise erforderlich.

Demzufolge stellt der Produktentwicklungsprozess, meistens durch mehrere Iterationsschleifen gekennzeichnet, ein Entwerfen und Verwerfen von Lösungen, ein Modifizieren und Miteinbeziehen von Alternativen sowie ein mehrfaches Überprüfen und Bewerten aus verschiedenen Blickwinkeln dar.

Probleme bei der praktischen Anwendung von Entwicklungsmethodiken ergeben sich durch den mitunter vorherrschenden bzw. vorausgesetzten hohen Abstraktionsgrad. Deshalb empfiehlt es sich nicht grundsätzlich von rein abstrakten Strukturen auszugehen, sondern diese gezielt bei signifikanten Teilproblemen einzusetzen. Des Weiteren können verschiedenste Werkzeuge als konkretere Hilfsmittel zur spezifischen Problembearbeitung begleitend zum Einsatz gebracht werden, um damit die entwicklungsmethodische Vorgehensweise praxisgerechter und effizienter zu gestalten.

Besonderes Augenmerk sollte auf die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses gelegt werden (Kapitel 2.1.4, S. 14ff). Gerade das systematische Klären der Aufgabenstellung und die Definition von Anforderungen erweisen sich hierbei als wichtiges und unverzichtbares Instrument (Pahl et. al., 2007, S. 780). Niemann/Winter/Höhn (2005, S. 1) konstatieren in diesem Zusammenhang die ungenügende Vorklärung der Anforderungen an ein Produkt als Ursache der meisten Schäden, Mängel und Beanstandungen. Das Aufstellen von Anforderungen stellt dabei keinen singulären Vorgang dar, sondern einen mit Entwicklungsfortschritt dynamisch zu gestaltenden Präzisionsprozess. Wobei es auch hier individuell abzuklären gilt, bis zu welchem Stadium der Entwicklung Modifikationen der Anforderungen berücksichtigt werden können und sich als zweckmäßig erweisen.

Ziel eines effizienten Produktentwicklungsprozesses ist es möglichst früh Wissen über Produkteigenschaften zu generieren, um Fehler grundsätzlich zu vermeiden und damit die Anzahl aufwandsintensiver Änderungen in späten Entwicklungsphasen zu minimieren. In diesem Zusammenhang können gemäß Lindemann (2009, S. 157ff) frühe orientierende Analysen, auch als **Eigenschaftsfrüherkennung** bezeichnet, zu mehr und früherem Wissen über Produkteigenschaften und so zu einer Reduzierung etwaiger Änderungsaufwendungen bei gleichzeitig höheren Änderungsmöglichkeiten führen (Abb. 24).

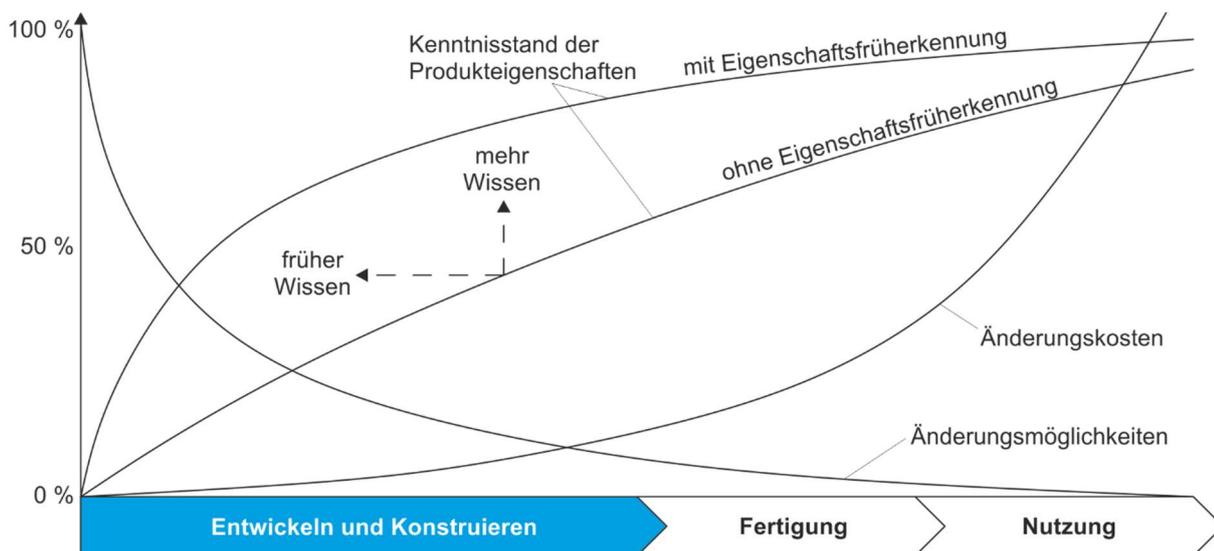


Abbildung 24: Bedeutung der Eigenschaftsfrüherkennung (vgl. Abb. 86: Lindemann, 2009, S. 159)

Um diese Ziele auch tatsächlich bei einem Entwicklungsvorhaben erreichen zu können, dürfen sich die spezifischen Eigenschaftsanalysen nicht nur auf funktionale Aspekte beschränken, sondern erfordern eine holistische Betrachtungsweise, wie beispielsweise die Berücksichtigung potentieller Fertigungsverfahren und damit einhergehender Systemeigenschaften.

Sowohl die prinzipielle Vorverlagerung von Aktivitäten als auch die ehestmögliche Berücksichtigung produktionsspezifischer Aspekte entsprechen dabei den Grundgedanken des Simultaneous Engineering (Kapitel 2.1.2, S. 11).

Die im Rahmen dieser Arbeit behandelten **Prinzipversuche** können als **charakteristische Methode der Eigenschaftsfrüherkennung** interpretiert werden. Prinzipversuche bieten dabei grundsätzlich das Potential, produkt- und produktionsspezifische Problemstellungen frühzeitig bearbeiten zu können.

Von diesen Überlegungen ausgehend steht die effiziente Gestaltung respektive Optimierung von Entwicklungsprozessen, neben der bewussten Nutzung von Erfahrungen bzw. Informationsrückflüssen aus Lebenszyklen repräsentativer Produkte sowie von Expertenwissen, in direktem Zusammenhang mit einem zielgerichteten und systematischen Methodeneinsatz.

Die grundsätzliche Aufgabe von Methoden besteht darin, bei der Generierung von geforderten Ausgangsinformationen basierend auf vorhandenen Eingangsinformationen (Abb. 25) zu unterstützen.

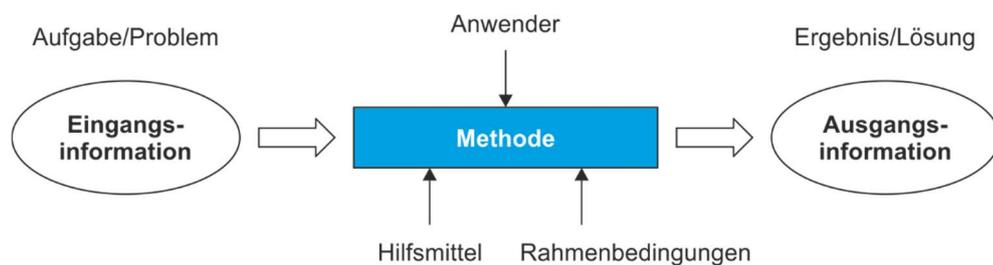


Abbildung 25: Informationsumsatz durch Methodeneinsatz (vgl. Abbildung 2-18: Schwankl, 2002, S. 38)

Im Kontext einer Vorverlagerung von Eigenschaftsanalysen bedeutet dies zudem jene Faktoren und Parameter, welche die Produkteigenschaften maßgeblich beeinflussen, bereits in den frühen Phasen einer Entwicklung zu identifizieren, bewerten und abzusichern. (Schwankl, 2002, S. 116)

Methoden müssen dabei prinzipiell geeignet sein das gewünschte Ergebnis erzielen zu können und zudem auch verfügbar sein, im Sinne der Zugänglichkeit zu Prüfmöglichkeiten bzw. Messequipment, aber auch einschlägiger Software und Lizenzen.

Des Weiteren erfordert die zweckmäßige Auswahl und Anwendung von Methoden spezifische Kenntnisse, einerseits über die Anforderungen an die einzusetzenden Methoden und andererseits über erforderliche Randbedingungen und Restriktionen. (Schwankl, 2002, S. 37ff)

Wenngleich der Einsatz von Methoden einen belegten Einfluss auf den Erfolg von Produktentwicklungsprojekten hat (Graner, 2013, S. 2), so gibt es praktische Hürden die diesen erschweren bzw. dazu führen Methoden nicht einzusetzen (Abb. 26).

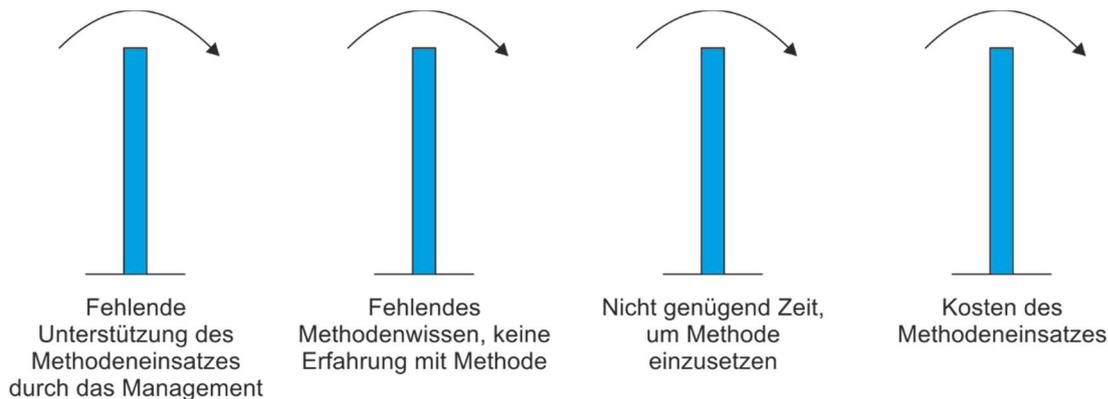


Abbildung 26: Typische Hürden für den Methodeneinsatz (vgl. Abbildung 8: Graner, 2013, S. 55)

Die Basis eines erfolgreichen Methodeneinsatzes ist eine entsprechende Akzeptanz, sowohl auf Management- als auch auf Arbeitsebene. Zudem ist die Anwendung von Methoden stets mit einem Lerneffekt verbunden und bedarf einer gewissen Erfahrung um diese effizient zu gestalten.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt für den praxismgerechten Einsatz ist das grundsätzliche Verständnis von Methoden als eine Art Werkzeug, gemäß eines Hilfsmittels, um ein Entwicklungsziel zu erreichen. Dementsprechend ist das Ziel nicht die Anwendung von Methoden, sondern sie sind die Maßnahme um eine übergeordnete Zielsetzung im Rahmen einer Produktentwicklung zu erreichen.

Die spezifischen Methoden für die Analyse von Produkteigenschaften können gemäß Ehrlenpiel/Meerkamm (2013, S. 514) und Lindemann (2009, S. 164ff) in folgende vier Kategorien eingeteilt werden:

- Überlegung, Diskussion, Schätzung, Vergleich
- Berechnung, Optimierung, Kennzahlenvergleich
- Simulation
- Versuch

Richtet man den Fokus auf die Methode Versuch, so gilt diese im Allgemeinen als realitätsnäher, jedoch zugleich auch zeit- und kostenintensiver als andere Analyseverfahren.

Tendenziell werden Versuche, speziell in hochtechnologischen Industriebereichen wie beispielsweise Automotive oder Aerospace, zunehmend durch numerische Analysemethoden ersetzt bzw. mehrheitlich als Verifikationsmethode eingesetzt (Abb. 27).

Die in Abbildung 27 dargestellte Reduktion der Gesamtentwicklungszeit ist dabei nicht das Ergebnis einer reinen Substitution von Versuchen, sondern vielmehr durch eine Vorverlagerung und Parallelisierung von Aktivitäten gemäß Simultaneous Engineering zu erklären.

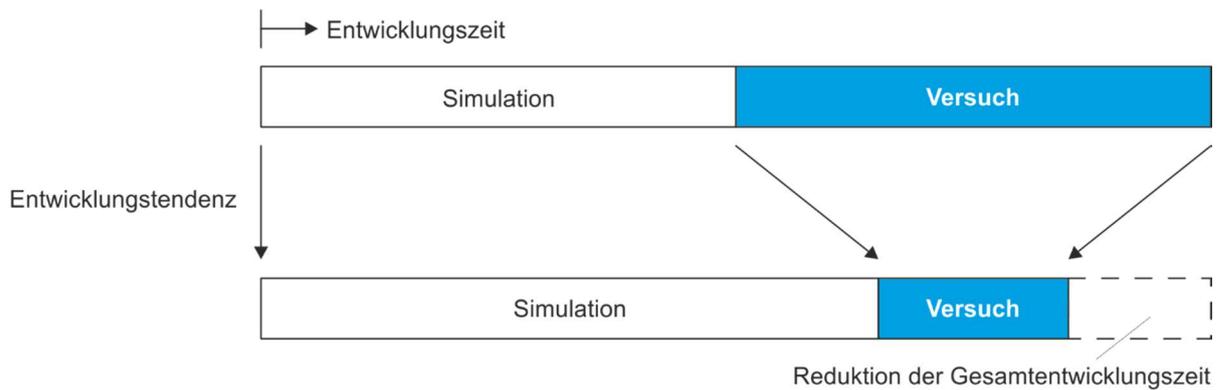


Abbildung 27: Prognostizierter Anteil von Simulationen und Versuchen an der gesamten Entwicklungszeit (Lindemann, 2009, S. 166)

In den frühen Phasen einer Entwicklung können Eigenschaftsanalysen jedoch oftmals nicht mittels analytischer oder numerischer Verfahren durchgeführt werden (Lindemann, 2009, S. 166f). Dies kann beispielsweise dann der Fall sein, wenn prinzipielle Systemzusammenhänge, spezifische Abhängigkeiten und resultierende Wirkungen noch nicht bekannt sind bzw. keine das Systemverhalten beschreibenden mathematischen Modelle existieren.

Speziell in solchen Situationen stellen zielgerichtet gestaltete Versuche eine hinsichtlich Aufwand und Qualität des Ergebnisses praktikable Methode dar. Pahl et. al. (2003, S. 238) erwähnt in diesem Zusammenhang **Vor- oder Modellversuche** (Modellversuche im Sinne einer Ausnutzung der Ähnlichkeitsmechanik) als Methode zur Feststellung prinzipieller Eigenschaften oder zumindest angenäherter quantitativer Aussagen über Wirkungshöhe bzw. Optimierungsbereich von Konzepten.

In der Literatur finden allerdings spezifisch für die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses ausgerichtete Versuche, gewöhnlich auch als **Hand- oder orientierende Versuche** bezeichnet, kaum Erwähnung (Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 524). Darüber hinaus führt der **üblicherweise qualitative Charakter** von orientierenden Versuchen (Lindemann, 2009, S. 167) zu einer zusätzlichen Diskrepanz.

Auf diesen grundlegenden Überlegungen und Gegebenheiten aufbauend, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Versuchswerkzeug, in Form des methodischen Einsatzes **quantitativer empirischer Untersuchungen in den frühen Phasen** einer Entwicklung, konzipiert und für den industriellen Praxiseinsatz aufbereitet.

3 Versuche in der Produktentwicklung

Ingenieurwissenschaften, im Speziellen der Maschinenbau und seine Teilgebiete, sind keine exakten Wissenschaften, welche in der Lage sind genaue quantitative oder formallogisch präzise Aussagen zu treffen.

Im Bereich der Produktentwicklung ist dieser Umstand einer Vielzahl an spezifischen Variabilitäten und Unwägbarkeiten geschuldet. Individuelle Zielsetzungen und daraus abgeleitete Anforderungen sowie in weiterer Folge Parametereinflüsse, deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem, wechselseitige Beeinflussungen und Interdependenzen, aber auch statistische Faktoren, beispielsweise die Streubreite der materiellen Fertigung, und die jeweiligen Rahmenbedingungen differenzieren Entwicklungsaufgaben voneinander.

Eine Entwicklung kann dabei durchaus befriedigend funktionieren, ohne dass wesentliche Kernpunkte und Zusammenhänge bekannt sind bzw. verstanden werden. Dies gilt allerdings nur solange, gewollt oder ungewollt, keine bestimmenden Rahmenbedingungen oder Parameter geändert werden. Ist eine solche Änderung allerdings gewünscht, oder erforderlich, so bedarf es einer Analyse des Systemverhaltens, wobei diese unter Anwendung analytischer, numerischer oder empirischer Methoden erfolgen kann (Kapitel 2.4, S. 32).

In Abhängigkeit der Zielsetzung und des Stadiums im Entwicklungsprozess bzw. der betrachteten hierarchischen Systemebene weisen Analysemethoden, vor allem die Methode Versuch, unterschiedliche Ausprägungen mit spezifischen Eigenschaften auf und erfordern somit einen differenzierten Problemzugang.

Eine divergierende Ausprägung von Versuchen repräsentiert deren Einsatz als ausgewiesene Methode in frühen Entwicklungsphasen, in Form von Prinzipversuchen.

Der Begriff **Prinzipversuch** bezeichnet die **empirische Untersuchung eines isolierten Effekts** bzw. Parameters, unter möglichst bekannten und veränderbaren Einflussfaktoren, mit dem Ziel **quantitative Aussagen** über das produktbezogene Systemverhalten tätigen zu können.

Durch den vom Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik geprägten signifikanten Terminus sollen insbesondere die spezifischen Eigenschaften dieser Versuchsart und die damit verbundenen charakteristischen Merkmale bei deren Anwendung illustriert werden.

Im Kontext der methodischen Produktentwicklung soll durch den gezielten Einsatz von Prinzipversuchen die Systemkenntnis aber auch das Problemverständnis erhöht werden und somit der Entwicklungsprozess generell effizienter gestaltet werden.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Ausprägungen von Versuchen in der Produktentwicklung analysiert und systematisiert.

3.1 Diversifikation empirischer Untersuchungen im Entwicklungsprozess

Grundsätzlich ist die Durchführung von Versuchen, als zweckgerichtete empirische Untersuchungen an technischen Systemen, sinnvoll respektive notwendig, wenn die Realität durch Analytik und Numerik nicht bzw. nicht zufriedenstellend abgebildet werden kann. Selbiges gilt sofern das Verhalten des Prüfkörpers und Einflussgrößen darauf nicht bekannt sind oder Versuche explizit gefordert werden, beispielsweise bei Abnahme- und Zulassungstests.

Die Grenzen von Versuchen sind dabei oftmals der erforderliche Aufwand für Versuchsplanung und -Aufbau sowie die messtechnische Erfassung relevanter Größen, zudem stellen Versuchszeit sowie eine undefinierte Auswertung und Verwertung der Ergebnisse limitierende Faktoren dar.

Eine weitere essentielle und grundlegende Komponente für die Durchführung von technischen Versuchen repräsentiert die Prüfkörperverfügbarkeit.

Das prinzipielle Vorhandensein eines Prüfkörpers ist eine Grundvoraussetzung empirischer Analysen. Gerade in den frühen Phasen einer Entwicklung ist dies jedoch per Definition nicht gegeben (Kapitel 2.1.3, S. 12).

Aufgrund dieser Situation wird der Versuch in der industriellen Praxis, als auch in einschlägiger Literatur, häufig nur als Mittel zur Erprobung oder Kontrolle eines bereits fertig ausgearbeiteten Produktes, wie in Abbildung 28 dargestellt, eingesetzt respektive vorgesehen.

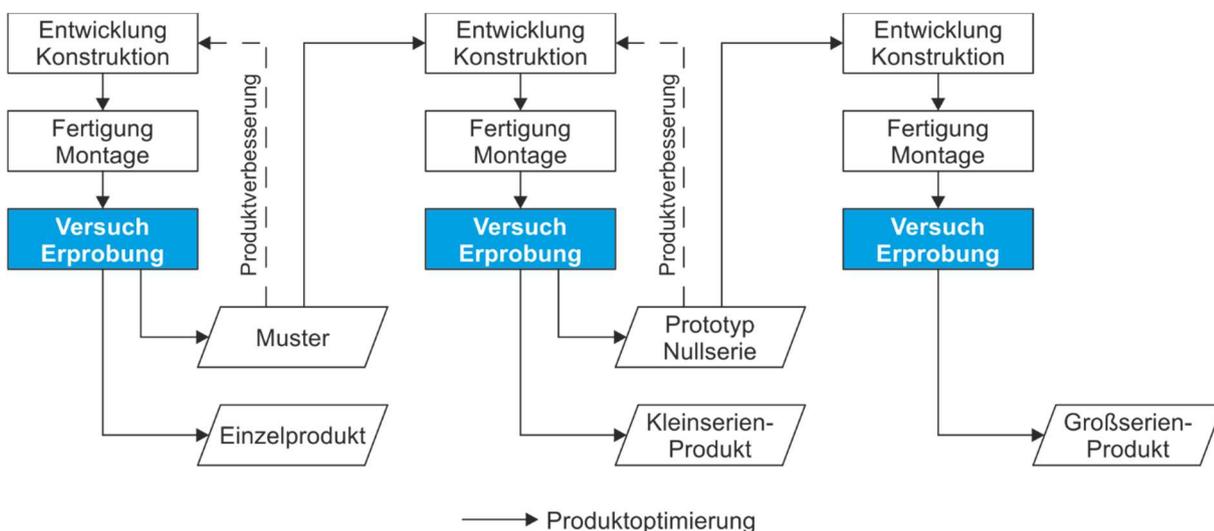


Abbildung 28: Phasen der Produktentstehung (vgl. Bild 3.2: VDI 2221, 1993, S. 8)

Neben der Verwendung von Versuchen als Methode zur Überprüfung, auch in frühen Phasen im Sinne von Plausibilitätschecks, können diese ebenfalls als Mittel zur Beschreibung des Systemverhaltens sowie zur Verifizierung bzw. Falsifizierung von Hypothesen angewendet werden.

Bei der Abwicklung von Produktentwicklungsvorhaben wird prinzipiell versucht entsprechend aufwändige empirische Untersuchungen durch Berechnungen, vor allem aber durch numerische Simulationen, zu substituieren. Dieser Optimierungsansatz setzt jedoch eine analytische bzw. numerische Beschreibbarkeit des Systems, mit vertretbarem Aufwand und ausreichender Qualität, voraus. Ist diese nicht gegeben, so repräsentiert der Versuch, selbst oder gerade in den ersten Entwicklungsphasen wenn keine detaillierten Lösungen vorliegen, eine effiziente Möglichkeit zur Eigenschaftsermittlung technischer Systeme (Lindemann, 2009, S. 166f; Pahl et. al., 2007, S. 197ff). Realisierte Beispiele hierfür werden in Kapitel 6 (S. 85ff) erörtert.

Vor allem im Bereich der angewandten Ingenieurwissenschaften stellen Messungen einen wesentlichen Bestandteil von Versuchen dar, bzw. sind dadurch gekennzeichnet. Deren effiziente Durchführung, und die des gesamten Versuches, erfordert eine vorgängige Problemanalyse und Abklärung was empirisch untersucht werden soll, wie dies erfolgen kann und wie die Ergebnisse ausgewertet und verwertet werden sollen. Dieses grundlegende Schema bzw. die jeweiligen Teilschritte zur Durchführung von Versuchen differenzieren, im Sinne einer spezifischen Gestaltung, in Abhängigkeit der Charakteristik respektive der prinzipiellen Ausrichtung und Zielsetzung der Versuche.

Die tribologische Mess- und Prüftechnik, kurz Tribometrie bezeichnet, stellt eine Kategorisierung von Versuchen unter Berücksichtigung von Funktion und Struktur technischer Systeme zur Verfügung, welche als Basis einer allgemeinen Gliederung herangezogen werden kann (Tab. 1).

Kategorie	Art des Versuches		Systemstruktur
I		Betriebsversuch (Feldversuch)	komplettes Produkt 
II	Betriebsversuche und betriebsähnliche Versuche:	Prüfstandsversuch mit kompletter Maschine/Anlage	komplettes Produkt 
III		Original-Systemstruktur, Beanspruchung u.U. vereinfacht	Prüfstandsversuch mit Aggregat/Baugruppe
IV		Bauteilversuch	herausgelöste Bauteile 
V	Modell-Struktur und einfache Beanspruchung	Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern	Teile mit vergleichbarer Beanspruchung 
VI		Modellversuch mit einfachen Probekörpern	einfache Probekörper 

Tabelle 1: Kategorisierung von Versuchen basierend auf der Einteilung der tribologischen Prüftechnik (vgl. Bild 8.1.1: Czichos/Habig, 2010, S. 194; Tabelle 5.2: GfT Arbeitsblatt 7, 2002, S. 44)

Die jeweiligen Kategorien bedeuten hierbei stets eine Vereinfachung des Systems hinsichtlich des Beanspruchungskollektivs und/oder der Struktur des betreffenden Systems gegenüber der vorhergehenden Klassifizierung. (Czichos/Habig, 2010, S. 193)

Kategorie I bezeichnet den klassischen Betriebs- oder Feldversuch als Prüfung und Untersuchung vollständiger Systeme unter tatsächlichen Betriebs- und Beanspruchungsbedingungen. Durch die somit gegebene Vielschichtigkeit und Komplexität ist allerdings ein Rückschluss auf einzelne Effekte bzw. Parameter kaum möglich. Neben logistischen Herausforderungen wird die Durchführung von Betriebs- oder Feldversuchen zudem dahingehend erschwert, dass in der Regel keine bzw. nur minimale Adaptierungen zur Applikation von Messsensorik vorgenommen werden dürfen, die Anzahl an durchführbaren Einzelversuchen beschränkt ist und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eine große Herausforderung darstellt.

Allerdings ist es selbst bei dieser Versuchskategorie praktisch unmöglich sämtliche Einsatzmöglichkeiten und somit alle theoretischen Einflussgrößen (bekannte und unbekannt) sowie deren Wechselwirkungen zu erfassen. Deshalb werden auch Betriebs- oder Feldversuche typischerweise unter definierten Umgebungsbedingungen durchgeführt, um einerseits eine zielgerichtete Bewertung und andererseits eine vertretbare Relation zwischen versuchstechnisch abgebildeter Realität und dafür erforderlichem Aufwand gewährleisten zu können.

Versuche am Prüfstand, allerdings von realen Maschinen und Anlagen, werden **Kategorie II** zugeordnet. Die Vereinfachung gegenüber Kategorie I liegt im Bereich der Betriebsbedingungen und etwaiger Umgebungseinflüsse.

Die Analyse von Produkten unter definierten und erfassten Bedingungen am Prüfstand führt im Vergleich zu Betriebs- oder Feldversuchen zu einer gesteigerten Reproduzierbarkeit und ermöglicht die Auswirkungen spezifisch veränderter Parameter auf das Gesamtsystemverhalten zu untersuchen. Der Grad der Realitätsnähe bzw. Abstraktion wird dabei von den durch den Prüfstand abgebildeten Parametern bestimmt, wobei entsprechend eines stringenten Schlusses nur bekannte Einflussgrößen abgebildet werden können.

Die Reduktion empirischer Prüfstandsuntersuchungen von einer kompletten Maschine, bzw. allgemein von einem ausgearbeiteten und realisierten Produkt, auf abgrenzbare Baugruppen respektive spezifische Teilsysteme ist kennzeichnend für Versuche der **Kategorie III**.

Untersuchungen an originalen oder vereinfachten Bauteilen, unter möglichst praxisnahen Bedingungen, werden zu **Kategorie IV** zusammengefasst.

Obwohl es sich bei den Versuchskategorien III und IV um Untersuchungen an herausgelösten Systemelementen handelt, sollte die Versuchsgestaltung und -durchführung stets basierend auf einer Gesamtsystemorientierung erfolgen. In Abhängigkeit der Zielsetzung des Versuchs müssen die Energie-, Stoff- und/oder Signalflüsse über die Grenzen des Prüfsystems bekannt sein und beim Versuchsaufbau berücksichtigt werden. Sind diese Einflüsse bekannt so können für das Gesamtsystem valide Aussagen generiert werden. Des Weiteren ist es möglich verhältnismäßig früh kritische Komponenten bzw. Teilsysteme am Prüfstand zu untersuchen und zu optimieren, noch bevor die Entwicklung des übergeordneten Produktes abgeschlossen ist.

Im Unterschied zu Versuchen der Kategorien I bis IV werden jene der **Kategorien V und VI** nicht mit Originalbauteilen durchgeführt, sondern mit vereinfachten physikalischen Modellen, weshalb zuweilen auch in diesem Fall von Modellversuchen gesprochen wird (vgl. Kapitel 2.4, S. 33). Ein prinzipielles Vorhandensein fertig ausgearbeiteter und realisierter Systemkomponenten ist nicht erforderlich.

Der in Tabelle 1 veranschaulichten Kategorisierung von Versuchen können folgende qualitativen Charakteristika, mit ansteigender Versuchskategorie, zugeordnet werden (Bader, 2014, S. 52f):

- **Sinkende Komplexität:** Die Vielschichtigkeit von Prüfaufbau, Versuchsdurchführung sowie Auswertung, und somit auch der erforderliche Ressourcenaufwand, nimmt ab.
- **Sinkende Anzahl der erfassten Effekte der Belastungssituation und des Prüfkörperverhaltens:** Die Wahrscheinlichkeit unbekannte Eigenschaften und Wechselwirkungen zu erfassen nimmt ab, je weiter sich der Prüfkörper vom Gesamtsystem entfernt.
- **Steigende Allgemeingültigkeit der Aussagen:** Durch Systemreduktion steigt die Möglichkeit mittels induktiver Schlüsse Gesetzmäßigkeiten abzuleiten.
- **Steigende Möglichkeit betreffend der Isolierung von Einzeleffekten:** Je einfacher ein Prüfkörper gestaltet ist, umso besser ist die Auswirkung von Einflussgrößen, im Sinne des Ursache-Wirkungs-Prinzips, erkennbar.
- **Steigende Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung:** Mit sinkender Anzahl an Einfluss- und Störgrößen vermindert sich die Streuung der Ergebnisse und die Störanfälligkeit von Prüfstand und Messtechnik kann reduziert werden.

Bei den Kategorien I, II und III bleibt grundsätzlich die Systemstruktur des zu untersuchenden Objektes erhalten, bei einer Vereinfachung des betreffenden Beanspruchungskollektivs und der Umfeldbedingungen. Ab Kategorie IV wird auch diese immer stärker verändert, mit dem Nachteil einer sinkenden Sicherheit der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf vergleichbare reale Systeme. (Czichos/Habig, 2010, S. 194)

Die Vorteile der Kategorien IV bis VI liegen in einer steigenden Flexibilität und somit Reaktionsfähigkeit sowie der messtechnischen Erfassbarkeit einzelner Effekte, in der Regel gepaart mit abnehmendem Aufwand und kürzeren Versuchszeiten.

Prinzipversuche, als Werkzeuge um in frühen Phasen des Entwicklungsprozess das Problem- und Systemverständnis zu erhöhen sowie gezielt Einflussfaktoren zu erkennen und deren Auswirkungen zu quantifizieren, erfordern stets eine Abstraktion und Modellbildung und können demzufolge den Versuchskategorien V und VI zugeordnet werden.

Bei der Analyse spezifischer Problemstellungen und Wiederholkonstruktionen können Prinzipversuche allerdings auch an realisierten Komponenten durchgeführt werden.

Die Zuordnung dieser Versuchskategorien zu den einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses, bzw. in weiterer Folge auch zu den Produktlebensphasen, verdeutlicht die vielfältigen und divergierenden Ausprägungen von Versuchen (Abb. 29).

Versuchskategorie	I	Empirische Analyse des Systemverhaltens					Feldversuch
	II					Produktversuch	
	III		Aggregat- bzw. Bauteilversuch				
	IV						
	V		Prinzipversuch				
	VI						
		Klären und Präzisieren	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	Fertigung/Montage	Einsatz

Abbildung 29: Zuordnung von Versuchen zu Produktentwicklungs- und lebensphasen

Aggregat- bzw. Bauteilversuche, Produktversuche oder **Feldversuche**, folgend auch als „klassische“ **Versuche** bezeichnet, bedingen definierte Prüfkörper und können somit erst in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien zum Einsatz gebracht werden. Demgegenüber sollten **Prinzipversuche**, aufgrund des relativ hohen Abstraktionsgrades, vor allem als Analysemethode am Beginn einer Entwicklung eingesetzt werden.

Die in Abbildung 29 dargestellte **Empirische Analyse des Systemverhaltens** ist kennzeichnend für die Möglichkeit Versuche sämtlicher Kategorien als Basis iterativer Entwicklungszyklen einzusetzen.

Von den drei elementaren Werkzeugen Analytik, Numerik und Empirie, um ein System bzw. dessen Verhalten quantitativ zu beschreiben, bilden empirische Untersuchungen die reale Situation prinzipiell am exaktesten ab.

Allerdings sind Versuche ebenfalls mit Vereinfachungen, reduzierten Einflüssen und teilweise erforderlichen Modellbildungen behaftet. Die versuchstechnisch ermittelten Resultate haben deshalb auch nur für die jeweilige spezielle Versuchsumgebung uneingeschränkte Gültigkeit. Demzufolge sind mögliche Auswirkungen etwaiger Vereinfachungen und Abstraktionen bereits in der Planung empirischer Analysen zu berücksichtigen.

Die flexible Gestaltbarkeit von Versuchen ermöglicht es diese in allen Phasen, in entsprechend abgewandelter und an die Problemstellung adaptierter Form, des Entwicklungsprozesses einzusetzen. Dabei ist entscheidend das Ziel klar zu definieren, wie dieses mittels Empirie erreicht werden kann und wie in weiterer Folge die ermittelten Ergebnisse bzw. gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden sollen.

Neben der grundsätzlichen Kategorisierung in Abhängigkeit des Abstraktionsgrades des Prüfsystems bzw. der betreffenden Systemstruktur (Tab. 1 und Abb. 29), können Versuche zudem basierend auf deren intendierter Aussage unterschiedlichste Ausprägungen aufweisen.

3.1.1 Versuche zur Verifikation

Vielfach wird an Versuche nicht der Anspruch gestellt einen direkt in einer Entwicklung verwertbaren Informationsgewinn zu liefern. Mehrheitlich werden Versuche am **Ende eines Entwicklungsvorhabens** zu dessen **Verifikation** eingesetzt (Abb. 28). Das Ziel liegt dabei in der Überprüfung der Funktionalität und ob die Entwicklung den zugrunde gelegten Anforderungen entspricht.

Versuche zur Verifikation intendieren somit nicht spezifisches Wissen als Basis für die Produktgestaltung zu generieren, sondern diese durch eine empirische Bewertung abzuschließen.

Am Ende von Entwicklungsphasen, oder einzelnen Aktivitäten, können Versuche zudem als ausgewiesene Meilensteine in einem Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Bekanntester Vertreter hierfür sind Versuche im Sinne eines sogenannten Proof of Concept. Im Bereich der Entwicklungsmethodik repräsentiert das Proof of Concept einen Machbarkeitsnachweis über die technische Umsetzbarkeit von Lösungskonzepten. In der Regel erfolgt dieser an einem physikalischen Prototyp, der die Hauptfunktionen und Kernelemente des Konzeptes abbildet.

Als Abnahme- und Zulassungstests werden Versuche vielfach aufgrund einer expliziten Forderung, als Bewertungsmethode bzw. zur Überprüfung auf Gesetzeskonformität, zum Einsatz gebracht. In vielen Industriezweigen, beispielsweise Automotive und Aerospace, ist die Zulassung von Produkten an unterschiedlichste Tests am realen System gebunden.

Ein am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik durchgeführter und nachfolgend beschriebener Zulassungstest eines Stauraumes für Passagierflugzeuge repräsentiert ein Beispiel einer solchen Versuchsausprägung (entspricht **Kategorie III**).

Der Zulassungstest des betreffenden Stauraumes bestand aus einer statischen Belastung desselben in drei Raumrichtungen (Abb. 30), als Äquivalent einer mehrfachen Erdbeschleunigung, und anschließender visueller Beurteilung etwaiger plastischer Deformationen oder Brüche.

Zur Durchführung des Versuchs wurde der zu überprüfende Stauraum an den dafür vorgesehenen Befestigungspunkten montiert (ohne Kontakt zu etwaigen anderen Applikationen) und für eine bestimmte Zeit mit der Prüflast beaufschlagt.

Die einzuhaltenden Spezifikationen werden dabei durch einschlägige Zulassungsvorschriften der Europäischen Agentur für Flugsicherheit (kurz EASA) geregelt.

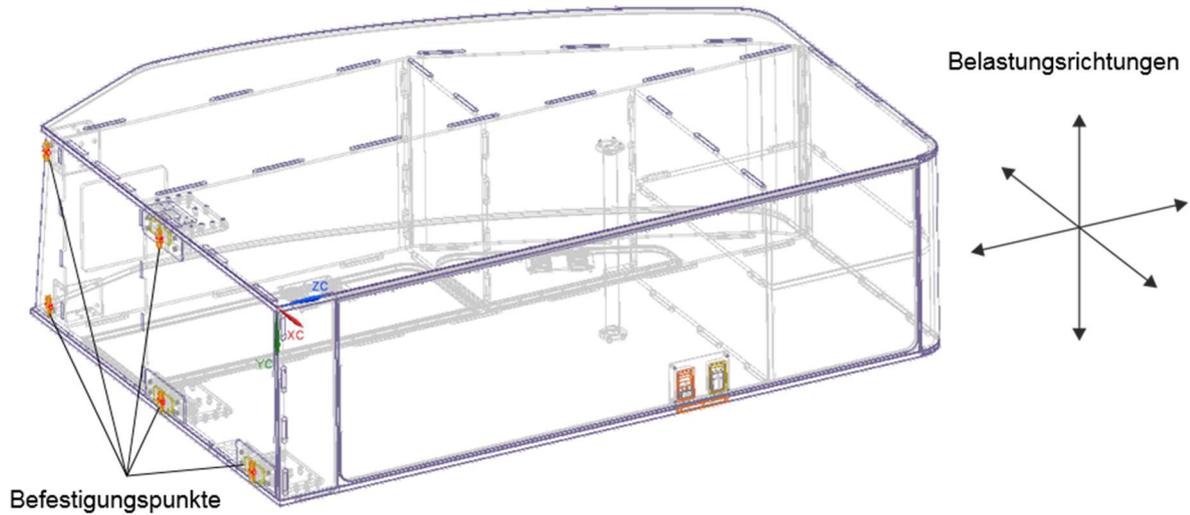


Abbildung 30: Stauraum eines Passagierflugzeuges als Prüfkörper eines Zulassungstests

Zur Sicherstellung einer möglichst homogenen Lastaufbringung erfolgte diese mittels entsprechend verteilter Bleiplatten (Abb. 31).

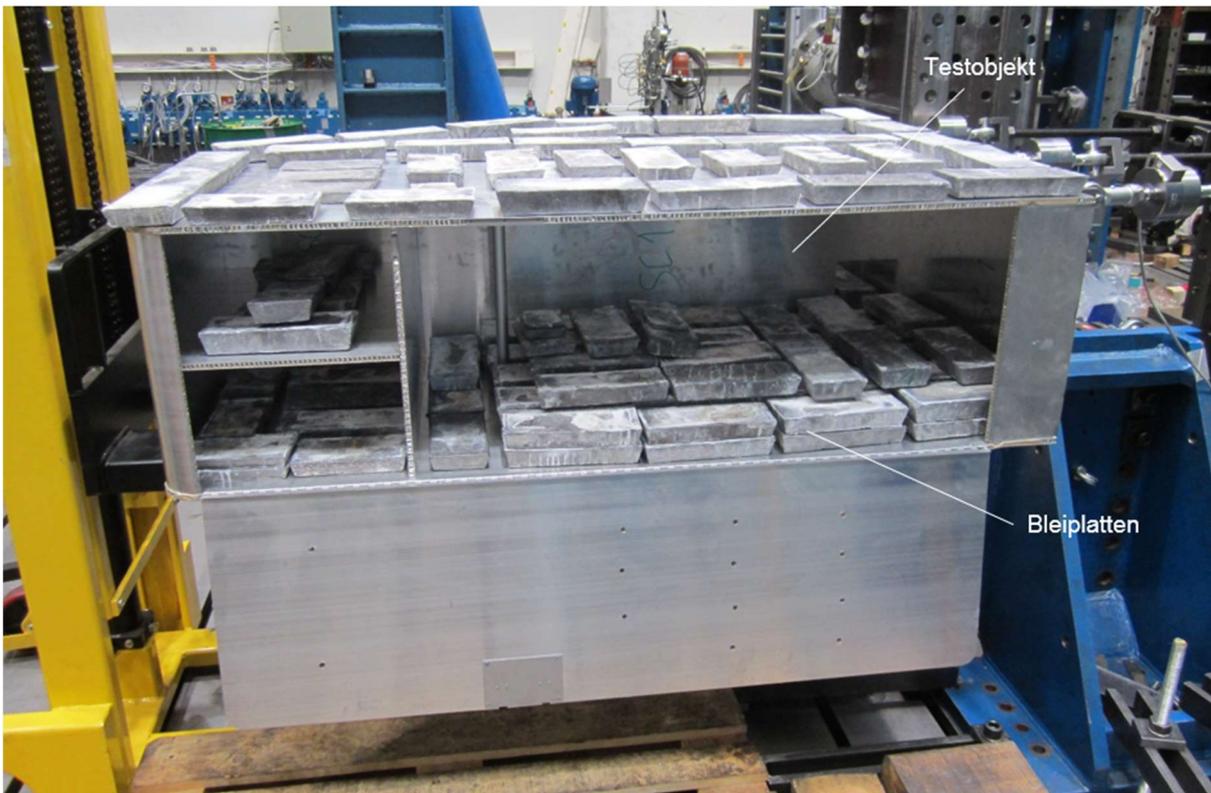


Abbildung 31: Aufbringung der für die Zulassung erforderlichen Last mittels Bleiplatten

Tests wie jener zur Zulassung des Stauraumes für Passagierflugzeuge stellen unter Umständen eine Notwendigkeit dar, um ein technisches System dem Markt zugänglich zu machen.

Neben Abnahme- bzw. Zulassungstests können Versuche zur Verifikation auch zur Überprüfung von Berechnungen, Hard- und Software sowie von essentiellen Produktfunktionen eingesetzt werden. Des Weiteren können Versuche dieser Art bzw. Ausprägung als Kontrollmaßnahme eines stringenten Entwicklungsprozesses die Funktion von Plausibilitätschecks übernehmen.

Versuche zur Verifikation sind häufig durch einen mangelnden Informationsrückfluss gekennzeichnet bzw. können diese, wenn sie am Ende eines Entwicklungsvorhabens durchgeführt werden, nur auf Folgeentwicklungen Einfluss nehmen, sofern sich daraus keine aufwands- und kostenintensiven wesentlichen Produktänderungen ergeben. In Entwicklungsprozessen ist es mitunter jedoch erforderlich Versuche zur Analyse des Systemverhaltens, als Basis weiterführender Entwicklungsaktivitäten, einzusetzen.

3.1.2 Versuche zur Beschreibung des Systemverhaltens

Zielgerichtete und effiziente Gestaltungs- und Ausarbeitungshandlungen, im Rahmen einer Produktentwicklung, bedingen ein hohes Maß an Wissen über das Verhalten betreffender Systeme. Mittels empirischer Untersuchungen ist es möglich quantitative Aussagen über eben jene tätigen zu können. Systeme können dabei sowohl ausgearbeitete Bauteile, Aggregate sowie gesamte Produkte und Anlagen sein oder aber gezielt abstrahierte und erarbeitete modellhafte Strukturen, welche in der Regel die Basis von Prinzipversuchen repräsentieren. Die Beschreibung des Systemverhaltens erfolgt dabei durch Quantifizierung repräsentativer Kenngrößen, in Abhängigkeit verschiedenster, unter Umständen veränderlicher, Einflussgrößen wie Zeit oder Belastung.

Ein realisiertes Beispiel dieser Versuchscharakteristik stellte die Beschreibung des Verschleißverhaltens einer Sperrsynchonisierung (Abb. 32) dar (entspricht **Kategorie IV**).



Abbildung 32: Synchronring mit innen- und außenliegenden Reibflächen und Gegenlaufringe als Prüfkörper einer empirischen Verschleißanalyse

Neben der Untersuchung des Verschleißverhaltens, in Abhängigkeit von Temperatur, Menge und Sorte des Schmieröls sowie von Drehzahldifferenz und Schaltkraft, war die Durchführung eines Funktionstests Teil der Zielsetzung des gegenständlichen Versuches.

Da es sich bei betreffender Sperrsynchonisierung um eine Komponente im Nutzfahrzeugbau handelte, wurde versucht durch entsprechende Gestaltung des Prüfstandes die real im Fahrzeug vorhandenen Massenträgheiten und auftretenden Reibungsverluste möglichst detailgetreu abzubilden (Abb. 33).

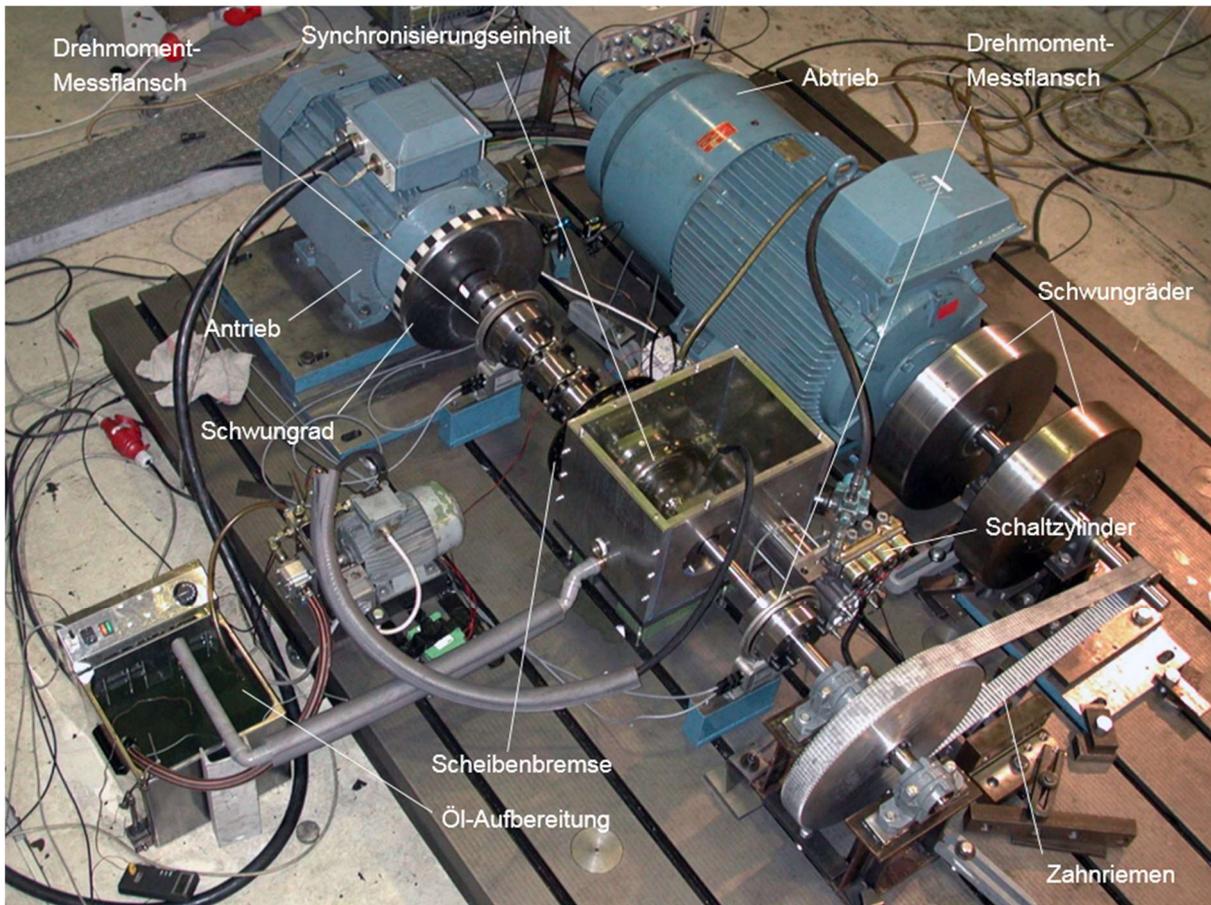


Abbildung 33: Prüfsandaufbau der empirischen Verschleißanalyse einer Sperrsynchonisierung

Zur quantitativen Beurteilung des Verschleißes wurden zunächst drei prinzipielle Möglichkeiten, mit jeweils unterschiedlichen Kenngrößen, in den Raum gestellt und deren Zweckmäßigkeit und Anwendbarkeit beurteilt.

Die Bestimmung des Masseverlustes durch Verwiegung des Synchronringes als auch die Vermessung der Dickenabnahme hätten jedoch stets einen Teilabbau des Prüfstandes erfordert, wodurch die zahlenmäßige Beurteilung des Verschleißes letztlich über die Veränderung des Schaltweges erfolgte. Eine Gegenüberstellung der drei Varianten bestätigte die ausreichende Genauigkeit der angewandten Methode.

Die empirische Beschreibung des Systemverhaltens beinhaltet neben der zahlenmäßigen Analyse systemrelevanter Parameter auch deren grundsätzliche Identifikation sowie die Bestimmung etwaiger Interdependenzen und deren Wirkungen.

Die Zielsetzung Wissen über ein betreffendes System zu generieren repräsentiert ein wesentliches Anwendungsgebiet von Prinzipversuchen. Durch deren zweckmäßigen Einsatz ist es möglich, speziell in den frühen Phasen einer Entwicklung, die Systemkenntnis zu erhöhen und dadurch Fehler während des Produktentwicklungsprozesses, die unter Umständen erst wesentlich später in Erscheinung treten würden (Kapitel 2.1.4, S. 16), vorzubeugen.

3.1.3 Versuche zur Bestätigung oder Falsifikation von Hypothesen

Eine weitere Möglichkeit Versuche effektiv einzusetzen stellt die empirische Bestätigung oder Falsifizierung von Hypothesen dar.

Im Kontext Produktentwicklung sind Hypothesen in der Regel auf Erfahrung, Beobachtungen und Überlegungen basierende Aussagen über Wirkungen, Parameter oder generell das Verhalten eines betrachteten Systems unter zugrunde gelegten Randbedingungen.

In vielen Fällen sind diese Systeme, zu denen Hypothesen aufgestellt werden, komplex und mit einer Vielzahl an Einflussparametern behaftet, weshalb der Versuch häufig die zuverlässigste Methode zur Bestätigung oder Falsifizierung darstellt.

Empirische Untersuchungen zur Analyse und Identifikation schädigungsrelevanter Mechanismen, bzw. kausaler Effekte welche einen Ausfall zur Folge haben, können ebenfalls Versuchen dieser Ausprägung zugeordnet werden.

Voraussetzung für die versuchstechnisch unterstützte Bestätigung oder Falsifizierung von Hypothesen ist die Abbildung des der Hypothese zugrunde liegenden Systems durch den Versuchsaufbau.

Im Rahmen einer Auftragsforschung des Institutes für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik galt es beispielsweise die Schmierkreislauffunktion eines Schienenfahrzeuggetriebes mittels spezifischer Versuche zu analysieren, da eine mangelhafte Schmierung als ursächlich für einen mehrfach aufgetretenen Lagerschaden angesehen wurde (entspricht **Kategorie III**).

Der prinzipielle Aufbau des Prüfstandes erfolgte dabei gemäß folgendem Schema (Abb. 34).

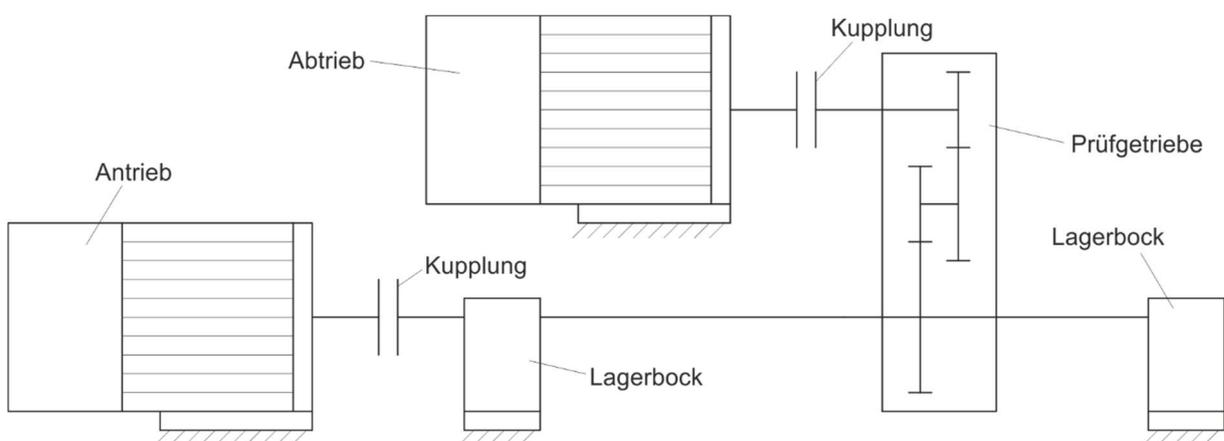


Abbildung 34: Prinzipieller Aufbau des Getriebeprüfstandes

Die Funktionsüberprüfung des Schmierkreislaufes wurde bei diesem Versuch unter Variation der Parameter Ölmenge, Drehrichtung, Drehzahl und Drehmoment durchgeführt. Zur Abbildung der real auftretenden Lageänderung des Getriebes, und um diesen möglichen Einfluss auf den Schmierkreislauf zu erfassen, wurde der Prüfstand auf einer variablen Doppelrahmenkonstruktion aufgebaut. Durch diese kardanisch ausgeführte Trägerkonstruktion, mit einem Nick- und Wankrahmen, konnte das Getriebe um 2 Achsen, unabhängig voneinander, im Bereich von $\pm 6^\circ$ geneigt werden (Abb. 35 und 36).

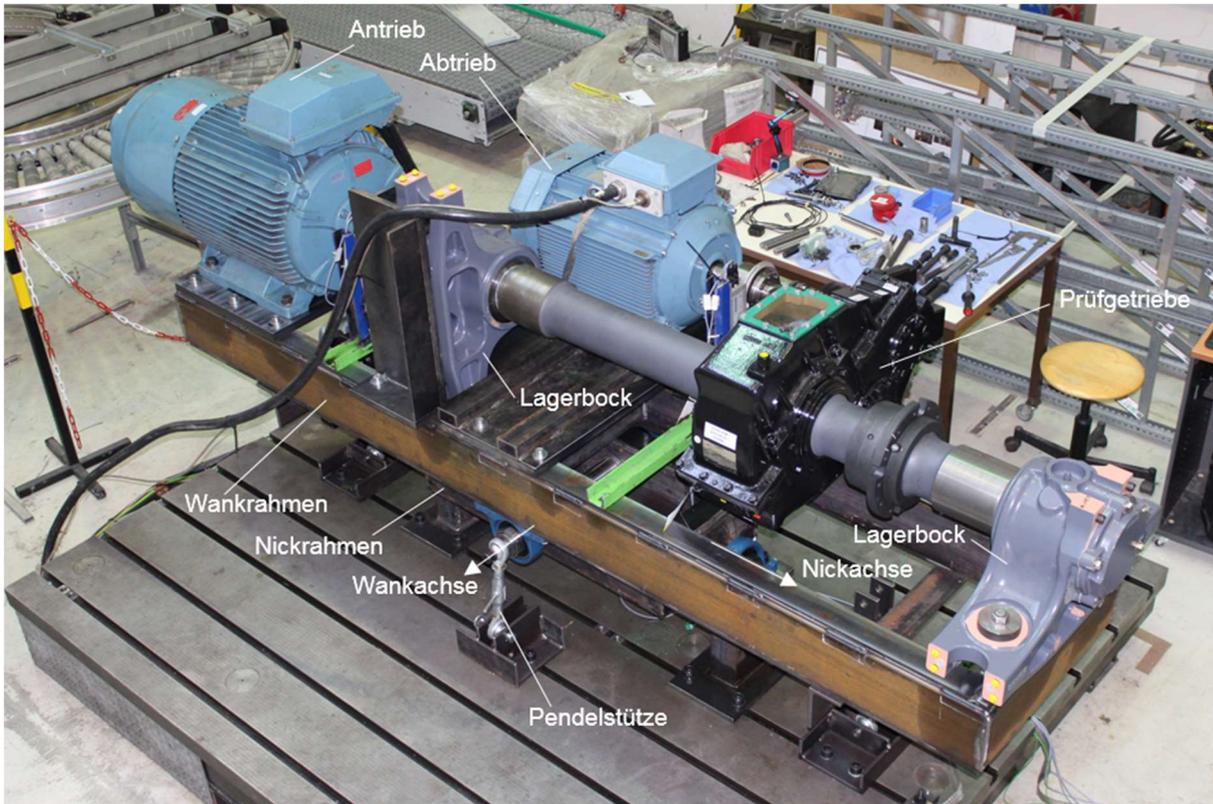


Abbildung 35: Prüfstands Aufbau auf unabhängig voneinander einstellbaren Nick- und Wankrahmen

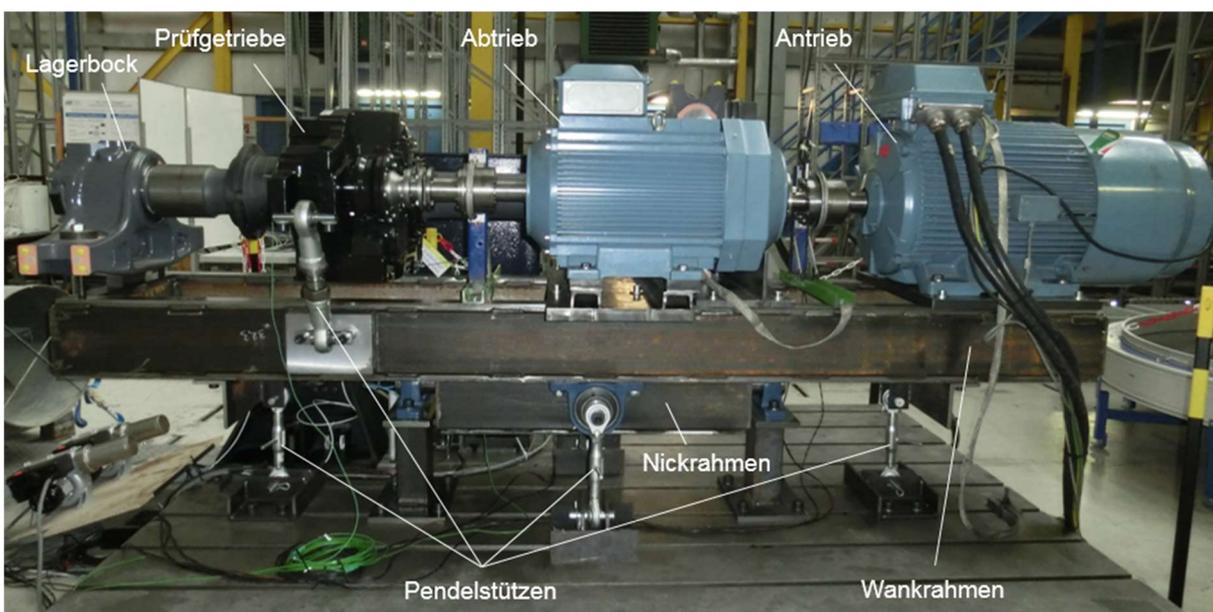


Abbildung 36: Frontalansicht von Nick- und Wankrahmen

Die Beurteilung der Schmierölfunktion erfolgte einerseits visuell mittels Endoskop und andererseits durch Temperaturmessung im Ölsumpf und am gefährdeten Lager.

Letztlich führt auch die versuchsgestützte Bestätigung oder Falsifikation von Hypothesen, bestenfalls als quantitative Bestimmung der Abweichung zwischen Vorhersage und Versuchsergebnis, zu einem erhöhten Systemverständnis. Des Weiteren ist es eventuell möglich zusätzliche Abhängigkeiten und Einflussgrößen aufzuzeigen.

Versuche mit diesen Charakteristika bzw. dieser Zielsetzung können als Prinzipversuche ebenfalls in frühen Stadien einer Entwicklung eingesetzt werden und unter Umständen zu einer Effizienzsteigerung des Entwicklungsprozesses beitragen sowie andernfalls notwendige Iterationszyklen vorbeugen oder zumindest deren Aufwand reduzieren.

3.2 Systemtheoretische Gegenüberstellung von klassischen Versuchen und Prinzipversuchen

Nur in seltenen Fällen industrieller Produktentwicklungsprozesse dienen Versuche als Informationsbasis für die Gestaltungs- und Ausarbeitungsphase bzw. werden empirische Untersuchungen im Anfangsstadium als Support-Maßnahme in Betracht gezogen.

Versuche werden in der Praxis vielmehr erst zur Verifikation des Systemverhaltens realisierter Bauteile oder Baugruppen, unter möglichst realen Betriebsbedingungen, eingesetzt.

Die nachfolgende Auflistung veranschaulicht exemplarisch mögliche Ausprägungen industriell eingesetzter empirischer Untersuchungen, in Abhängigkeit der Komplexitätsebene des Produktes:

- Gesamtprodukt: Betriebs- bzw. Feldversuche, Energieeffizienzanalysen, Schallanalysen
- Baugruppen: Dauerlauftests, NVH (Noise, Vibration, Harshness) Analysen, Verschleißuntersuchungen, Verlust- und Wirkungsgradanalysen, Vergleichsanalysen neuer Entwicklungen auf Komponenteneben
- Komponentenebene: Komponententests unter möglichst realitätsnahen, eindeutigen und reproduzierbaren Bedingungen

Erkenntnisse aus Versuchen an ausgearbeiteten bzw. freigegebenen Entwicklungen können jedoch erst in nachfolgenden Iterationszyklen, deren Anzahl es prinzipiell gezielt zu reduzieren gilt (Kapitel 2.2, S. 19), verwertet und technisch umgesetzt werden.

Industrielle Entwicklungsaufgaben basieren dabei in den allermeisten Fällen auf Vorgängerprodukten oder etablierten Technologien. Vollständige Neuentwicklungen stellen Ausnahmesituationen dar bzw. beschränken sich diese auf abgrenzbare Teilbereiche. Obwohl es aufgrund dieses Umstandes in der Regel möglich ist auf erfahrungsbasiertes Wissen zurückzugreifen, kann eine in Serie bewährte Entwicklung nur dann erfolgreich übernommen werden, wenn sich Rahmen- und Einsatzbedingungen nicht ändern bzw. die Auswirkungen etwaiger Änderungen bekannt sind.

Dies bedeutet, eine Produktbeschreibung mit allen Eigenschaften und Einschränkungen müsste theoretisch auf Anrieb ein perfektes Verhalten ergeben. Allerdings repräsentiert die real gegebene unvollkommene Beschreibung der Anforderungen typischerweise den Hauptgrund für erforderliche Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess.

Im Kontext einer systemtechnischen Strukturierung (Kapitel 2.3.1, S. 21) entsprechen „klassische“ Versuche Analysen von, respektive Untersuchungen an, Elementen höherer Ordnung und Komplexität (Abb. 37).

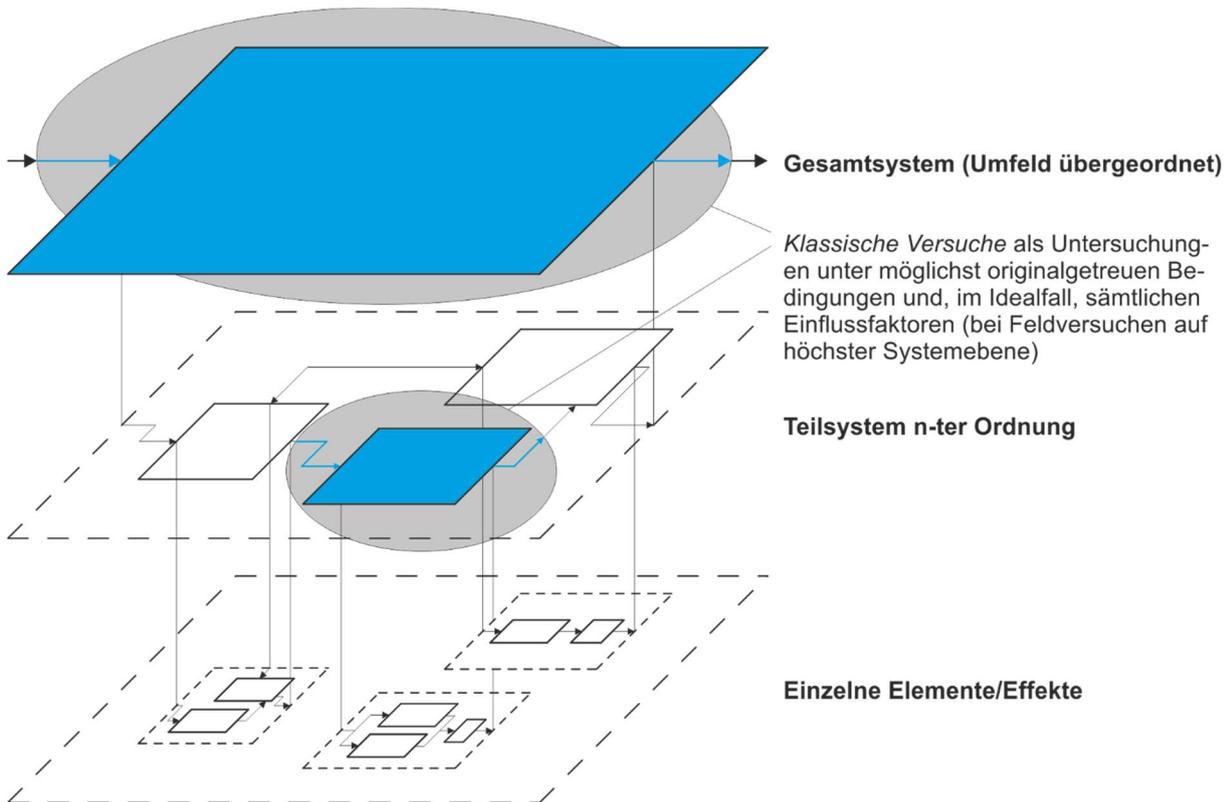


Abbildung 37: Klassische Versuche als Methode zur Analyse und Beschreibung komplexer Systeme

Wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt begründet sich diese Gegebenheit durch den mit Empirie einhergehenden Aufwand, wodurch Versuche oftmals auf ein Mindestmaß reduziert werden und deren Ergebnisse in vielen Fällen nur noch den Gütegrad der vorhergehenden Auslegung widerspiegeln sollen, und die Prüfkörperverfügbarkeit als essentiellen und zugleich limitierenden Faktor.

Während die Rechtfertigung des Versuchsaufwandes eine Frage der Effektivität und Effizienz im Rahmen des Entwicklungsvorhabens darstellt, handelt es sich bei der Prüfkörper- bzw. Prüfsystemverfügbarkeit um eine elementare Grundvoraussetzung.

Infolgedessen werden speziell in frühen Entwicklungsstadien vermehrt analytische und numerische Methoden eingesetzt, welche jedoch ohne Verifikation der betreffenden Resultate ein hohes Fehlerpotential in sich bergen.

Die Abdeckung des Informationsbedarfes am Beginn einer Entwicklung, als konsequente Maßnahme zur Fehlervorbeugung (Kapitel 2.1.4, S. 16), legt vor allem bei analytisch und numerisch schwer beschreibbaren Gegebenheiten den Einsatz empirischer Untersuchungen nahe.

Dieser Bedarf an versuchstechnischen Untersuchungen führt jedoch zu einem gewissen Widerspruch.

Einerseits sind Versuche die prinzipiell realitätsnahe Methode zur Analyse und Beschreibung eines spezifischen Systemverhaltens und andererseits soll Empirie als Werkzeug bzw. Hilfsmittel im Entwicklungsprozess eingesetzt werden um eben jenes zu definieren und gestalten.

Der Einsatz von Versuchen vor bzw. zur Erarbeitung des eigentlichen Prüfkörpers ist allerdings nicht grundsätzlich ausgeschlossen, sondern erfordert besondere Maßnahmen. Vor allem sind Versuchsplanung und -vorbereitung individuell zu gestalten und gesondert zu behandeln, da die Ergebnisse der notwendigen Modell- bzw. Prüfsystembildung auf die noch unbekannt und zu definierenden realen Elemente übertragbar sein müssen.

Prinzipversuche bieten dieses Potential durch die systematische Betrachtung isolierter, charakteristischer Effekte (Kapitel 6, S. 85ff).

Die Intention liegt dabei auf der gezielten Reduktion, Abgrenzung und Dekomposition von Systemen, um spezifische Effekte in Abhängigkeit ausgewählter Parameter empirisch zu analysieren (Abb. 38).

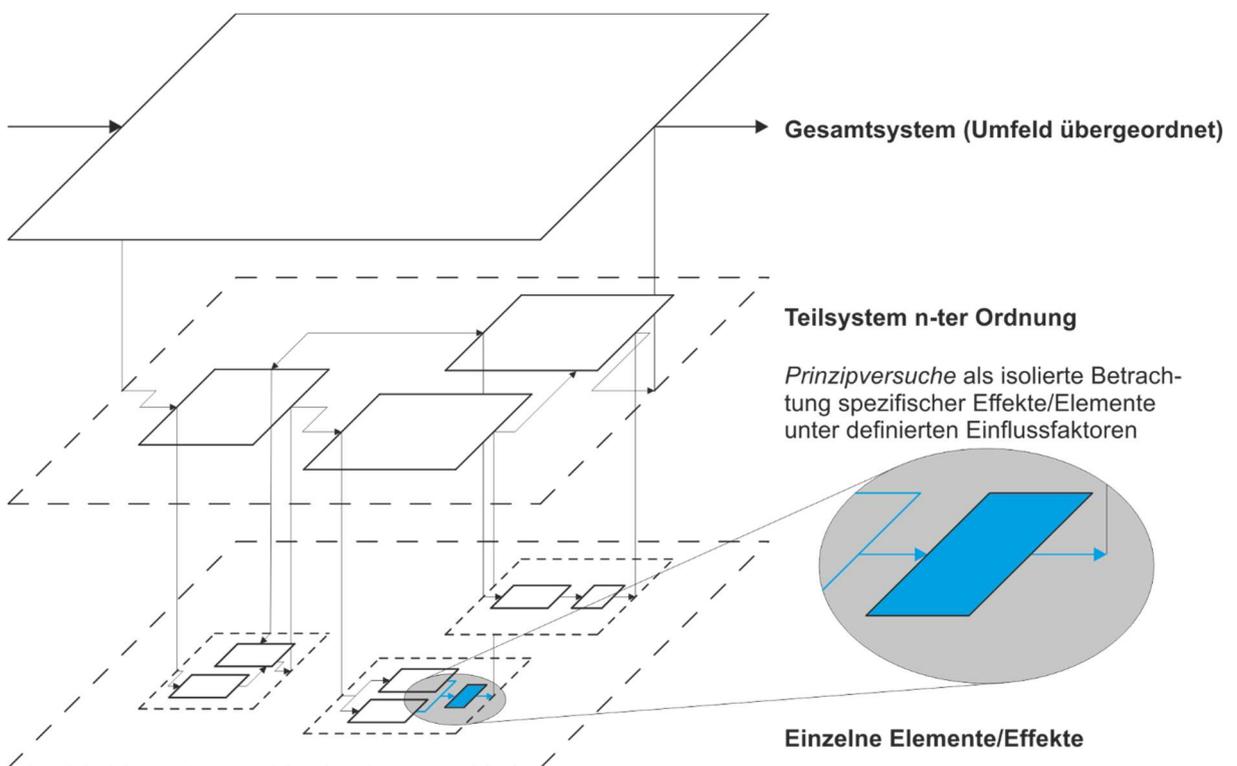


Abbildung 38: Prinzipversuche als Methode zur Analyse und Beschreibung gezielt isolierter Effekte unter festgelegten Parametern

Die erforderliche Reduktion sollte dabei auf Basis einer beim Produkt erwarteten, abstrahierten Betriebssituation, bei der der zu analysierende Effekt eindeutig in Erscheinung tritt, erfolgen. Im Falle der Durchführung eines Prinzipversuches im Sinne einer Voruntersuchung für eine geplante Entwicklungsschleife eines bereits realisierten Produktes, sollte die Separation der zu untersuchenden Wirkung zweckmäßigerweise ausgehend von der entsprechenden realen Komponente bzw. Baugruppe passieren.

3.3 Reflexion

Empirische Untersuchungen können im gesamten Entwicklungsprozess vielfältig eingesetzt werden, nicht nur als Kontrolle eines fertigen Produktes.

Die Variabilität der Zielsetzungen, und die damit einhergehenden differenzierenden Ausprägungen, bilden gemeinsam mit der Struktur der Prüfsysteme die Basis der Flexibilität und Vielseitigkeit der Methode Versuch.

Der Einsatzbereich „klassischer“ Versuche reicht von der Überprüfung, Testung und Durchführung von Grenzbetrachtungen ausgearbeiteter Entwicklungen und Baugruppen bzw. Bauteile, der Analyse des Betriebsverhaltens im realen Einsatz, bis hin zur Beurteilung definierter Lösungskonzepte im Sinne eines Proof of Concept.

Je nach Zielsetzung kann es sinnvoll sein, diese an einer Kombination aus kompletten (Teil-)Systemen und reduzierten Elementen durchzuführen, im Sinne einer Ressourcen-Optimierung. Beispielsweise ist es nicht notwendig bei der Überprüfung der Haptik eines Innenraums, oder der Sitzposition, ein komplettes Fahrzeug aufzubauen.

Speziell in den frühen Phasen einer Entwicklung können durch den gezielten Einsatz von, in der Regel verhältnismäßig aufwandsarmen, Prinzipversuchen grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten von technischen Systemen gewonnen werden. Das Ziel liegt dabei in der zweckgerichteten Analyse isolierter Effekte unter definierten Einflussfaktoren.

Abweichend von „klassischen“ Versuchen bedingt die Durchführung von Prinzipversuchen eine vorangeschaltete Erarbeitung eines Prüfsystems. An dessen Gestaltung wird der Anspruch der Übertragbarkeit des Systemverhaltens auf komplexere Strukturen, unter idealen Umständen auf das gesamte Produkt, gestellt. In diesem Zusammenhang repräsentiert die Verwertung und Dokumentation der Versuchsergebnisse einen weiteren essentiellen Punkt, welcher bereits in der Versuchsplanung berücksichtigt werden sollte.

Abbildung 39 veranschaulicht die divergierenden Einsatzmöglichkeiten von Versuchen im Entwicklungsprozess, in Abhängigkeit der Struktur des Prüfsystems.

Der Grundgedanke empirische Untersuchungen an möglichst einfachen Prüfkörpern, unter eindeutigen und reproduzierbaren Bedingungen, durchzuführen repräsentiert keine absolute Neuheit. Beim **klassischen Zugversuch**, als quasi **erstem Prinzipversuch**, werden empirische Tests an abstrakten Proben ausgeführt, um final Rückschlüsse auf die Festigkeit von Bauteilen ziehen zu können.

Versuchs-Kategorie	I		„Klassische“ Versuche				Analyse des Betriebsverhaltens im realen Einsatz	
	II	Analyse des Systemverhaltens ausgearbeiteter und realisierter Produkte auf allen Ebenen als Basis iterativer Entwicklungszyklen				- Validierung des Produktes - Überprüfung auf Konformität		
	III		- Analyse des Bauteilverhaltens kritischer Komponenten - Analyse des Zusammenspiels von Bauteilen - Überprüfung der Funktionserfüllung gemäß Anforderungsliste					
	IV							
	V		Prinzipversuche					
	VI	- Quantitative Beschreibung des Verhaltens des Prüfsystems - Ermittlung elementarer Zusammenhänge - Generierung von Wissen über schwer beschreibbare Systeme						
		Klären und Präzisieren	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten	Fertigung/ Montage	Einsatz	

Abbildung 39: Zielsetzungen von Versuchen in Abhängigkeit ihrer Kategorie sowie den jeweiligen Produktentwicklungs- und lebensphasen

Neben dem genormten, quasistatischen Zugversuch werden auch dynamische Dauerschwingversuche an Zugproben durchgeführt. Darüber hinaus können durch spezifische atmosphärische Bedingungen, wie beispielsweise Versuche unter definierter Umgebungstemperatur, mehrparametrische Informationen generiert werden. Die Ergebnisse zielgerichteter Versuche an einem reduzierten Probekörper-Typ können somit universell verwertet werden. Im Laufe der Zeit etablierte sich der Zugversuch als wichtigstes mechanisches Prüfverfahren, dessen Systematik wurde jedoch bislang kaum auf andere Bereiche übertragen.

Der Neuheitsgrad im Kontext Entwicklungsmethodik liegt nun im Aufgreifen dieser grundsätzlichen Überlegung, der systematischen Aufbereitung und Verwertung als generell einsetzbare Analysemethode in der Produktentwicklung.

Diese Basis eröffnet prinzipiell zwei große potentielle Einsatzgebiete von Prinzipversuchen, einerseits die Generierung direkt verwertbarer Informationen im Rahmen konkreter Entwicklungsaufgaben (Beispiele siehe Kapitel 6.3 und 6.4, S. 93ff) und andererseits die Generierung allgemein anwendbarer Beschreibungen technischer Sachverhalte, beispielsweise als reduzierte empirische Untersuchungen von Werkstoffverhalten und spezifischen Konditionierungen (Kapitel 6.2, S. 88ff). Die inhärente Reduktion bzw. Abstraktion des Prüfsystems erlaubt es in der Regel große Parameterbereiche flexibel sowie aufwandsarm versuchstechnisch abzudecken und führt somit zu einer breiten Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse, speziell in frühen Phasen einer Entwicklung.

4 Theoretische Aspekte zur Durchführung von Prinzipversuchen

Entsprechend der in Kapitel 1.2 (Abb. 3) dargestellten Vorgehensweise für die Entwicklung einer Systematik zur Durchführung von Prinzipversuchen bedarf es einer Analyse der theoretischen und praktischen Basis.

Die nachfolgenden Ausführungen geben einen Überblick über theoretische Aspekte hinsichtlich Planung, Durchführung und Auswertung von Eigenschaftsanalysen im Allgemeinen und von Versuchen im Speziellen.

4.1 Globale Perspektiven

Die Diversifikation von Methoden in Abhängigkeit der jeweiligen Zielsetzung bzw. des Verwendungszwecks beschränkt sich nicht nur auf Versuche (Kapitel 3.1, S. 36ff), sondern stellt ein prinzipielles Merkmal von Methoden zur Eigenschaftsanalyse dar (Abb. 40).

Zweck Art der Methode	Grundsätzliches Verhalten	Vergleich zwischen Alternativen	Eigenschaftsermittlung	
			überschlägig	genauer
Überlegung, Gedankenmodell	Interdisziplinäre Diskussion	Vorteils-/Nachteilsvergleich, Portfolio-Analyse	Abschätzung, Szenariotechnik	Logische Argumentation
Berechnung, Optimierung, Kennzahlenvergleich	Kinematische, dynamische Berechnung, Berechnung von Verformung, Verschleiß, Kosten	ABC-Analyse, Vergleichsrechnung, Marktanalyse (z.B. Conjoint-Analyse), Kennzahlen	Auslegungsrechnung, Überschlagsrechnung	Nachrechnung
Simulation mit dem Rechner	Kinematische, dynamische Simulation, Virtual Reality, Digital Mock-Up	Simulation mit unterschiedlichen Alternativen	Testmarkt, Rechnersimulation mit einfachem Modell	Finite-Elemente-Methode Rechnung, Rechnersimulation mit genauem Modell
Versuch	Handversuch, orientierender Versuch (Pappe, Draht, Plastik), Rapid Prototyping	Vergleichsversuche, Modellversuche	Laborversuch, spannungsoptischer Versuch, Modellversuch	Prototypversuch, Prüfstandsversuch für Berechnungsformel

Abbildung 40: Klassifikation von Analysemethoden nach dem Zweck bzw. der Genauigkeit (vgl. Bild 7.8-1: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 515)

Die Abbildung dieser Möglichkeit, Analysemethoden je nach Anforderungen zu adaptieren und problemspezifisch zu gestalten, in einer systematischen Vorgehensweise bedingt den Einsatz von deskriptiven Modellen (Kapitel 2.2, S. 19).

4.1.1 Allgemeine Problemlösungsprozesse als methodische Basis

Der im systemtechnischen Vorgehensmodell (Kapitel 2.3.1, S. 22) als prinzipielle Problemlösungsstrategie bzw. Mikro-Logik propagierte Problemlösungsprozess (Abb. 19) kann grundsätzlich auch als methodische Basis für die Generierung einer spezifischen Vorgehensweise zur Problembearbeitung herangezogen werden.

Weitere bekannte Modelle zur Beschreibung von elementaren Abfolgen in Denkprozessen zur Problemlösung sind das sogenannte TOTE-Modell (Miller/Galanter/Pribram, 1960) und der von Deming (1982) entwickelte PDCA-Zyklus (Abb. 41).

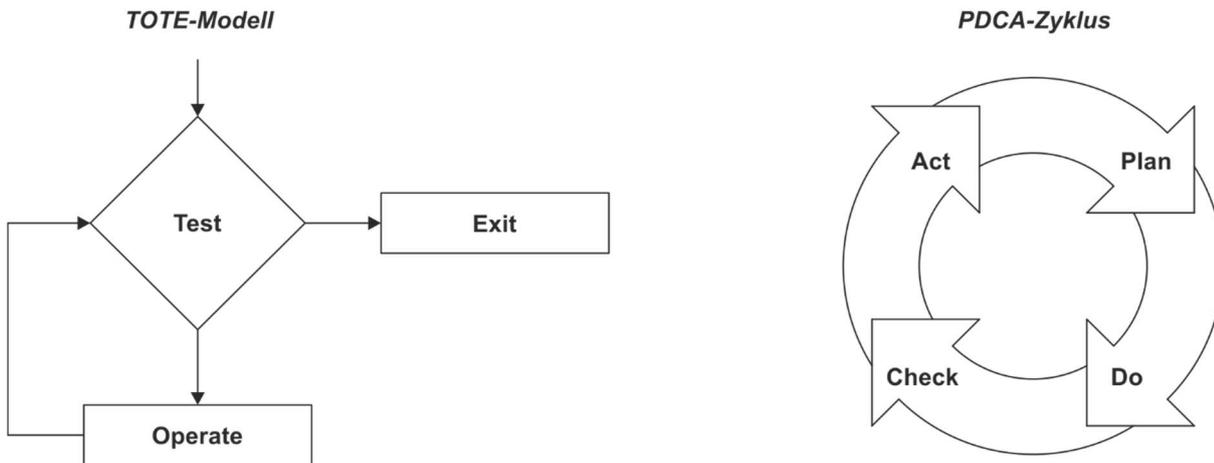


Abbildung 41: TOTE-Modell (Miller/Galanter/Pribram, 1960) und PDCA-Zyklus (Deming, 1982) als elementare Denk- und Handlungseinheiten

Beim **TOTE-Modell** geht einer Handlungsoperation zunächst eine Prüfoperation (**Test**), im Sinne einer Analyse der Ausgangssituation, voraus. Die danach durchgeführte Handlungsoperation (**Operate**) ist wiederum gefolgt von einer Prüfoperation (**Test**), welche den erreichten Zustand evaluiert. Bei einem zufriedenstellenden Ergebnis wird der Prozess verlassen (**Exit**) oder ein entsprechender Iterationszyklus eingeleitet. (Pahl et. al., 2007, S. 63)

Der **PDCA-Zyklus** repräsentiert eine kontinuierliche Rückkoppelungs-Schleife zur Koordination stetiger Verbesserungsmaßnahmen. In einem Planungsschritt finden eine Analyse des Problems und eine Synthese von Lösungen statt (**Plan**). Im Anschluss daran finden erste Ausführungsmaßnahmen in begrenztem Umfang statt (**Do**), welche in einem weiteren Schritt (**Check**) direkt überprüft werden. Ist das Resultat positiv, folgen schließlich die vollständige Umsetzung der Maßnahmen (**Act**) und ein Neubeginn des Zyklus. Durch die Implementation einer zusätzlichen Probestand und deren Überprüfung vor der eigentlichen Umsetzung unterstreicht der PDCA-Zyklus die aktive Reflexion des Handelns. (Lindemann, 2009, S. 40f)

Aufbauend auf diesen allgemein formulierten Denk- und Handlungsanweisungen zur Problemlösung ist es möglich für individuelle Aufgabenstellungen zweckmäßige Prozessfolgen zu definieren.

Am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der Technischen Universität Graz wurde im Rahmen einer Dissertation (Joch, 2007) eine **Systematik zur Planung, Durchführung und Dokumentation von Messungen**, in Anlehnung an einen generischen Problemlösungsprozess, erarbeitet.

Die Messung, als zu realisierende Aufgabenstellung, wird dabei in die Arbeitsschritte Sammeln und Interpretieren von Informationen zur **Ist-Situation**, **Zielformulierung**, **Lösungssuche** sowie **Bewerten** von Lösungen und **Entscheidung** unterteilt.

Ergänzt wird dieser Prozess von den umsetzungsspezifischen Aktivitäten **Durchführung der Messung**, **Plausibilitätskontrolle** und **Dokumentation**.

In Abbildung 42 wird diese generische Vorgehensweise grafisch dargestellt (**Adaptierter Prozess**) und den jeweiligen Prozessbausteinen die äquivalenten Schritte der Mikro-Logik (**Originaler Prozess**), als auch die entsprechenden Lebensphasen der Makro-Logik, des allgemeinen systemtechnischen Vorgehensmodells (Abb. 18) zugeordnet.

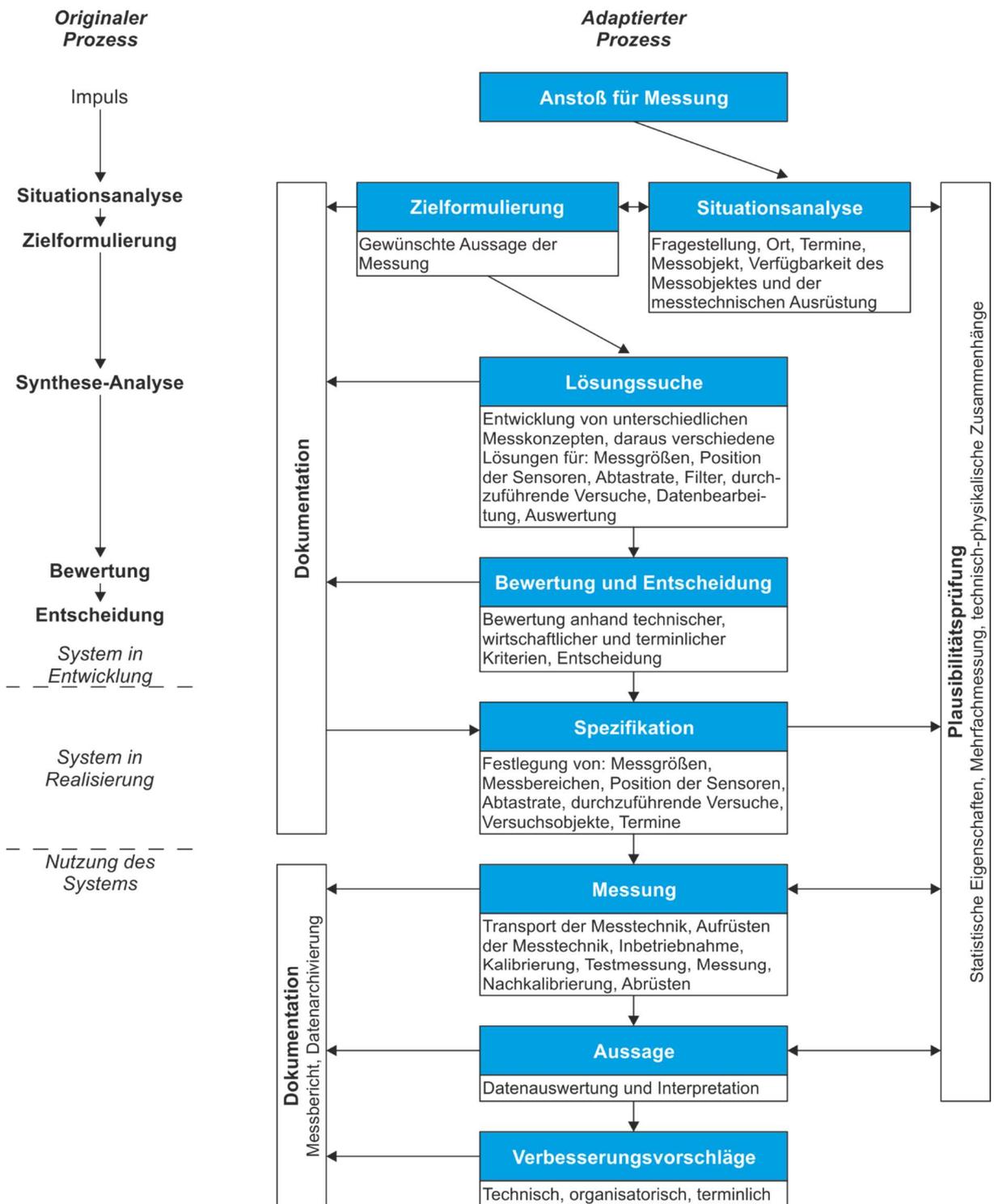


Abbildung 42: Vorgehensweise und Ablaufplan von Messung (Joch, 2007, S. 137)

Ein weiteres Beispiel für eine auf einem allgemeinen Problemlösungsprozess basierende Methodik repräsentiert eine vom Autor (Lang, 2012) definierte **Vorgehensweise zur zielgerichteten Durchführung von sogenannten Technologieentwicklungsprojekten**, im Rahmen eines industriellen Vorentwicklungsprozesses.

Das Ziel von Technologieentwicklungsprojekten liegt grundsätzlich darin, potentielle Technologien zu identifizieren und entwicklungsspezifisch vor- bzw. aufzubereiten, um das dabei generierte technologische Wissen in der nachgeschalteten Produktentwicklung effizient und nutzbringend verwerten zu können.

Das Vorgehensschema setzt sich aus einem Phasenplan und einem zyklischen Prozess als konkrete Handlungsanweisung zu deren Bearbeitung, ähnlich der Mikro-Logik des systemtechnischen Vorgehensmodells (Abb. 18), zusammen (Abb. 43).

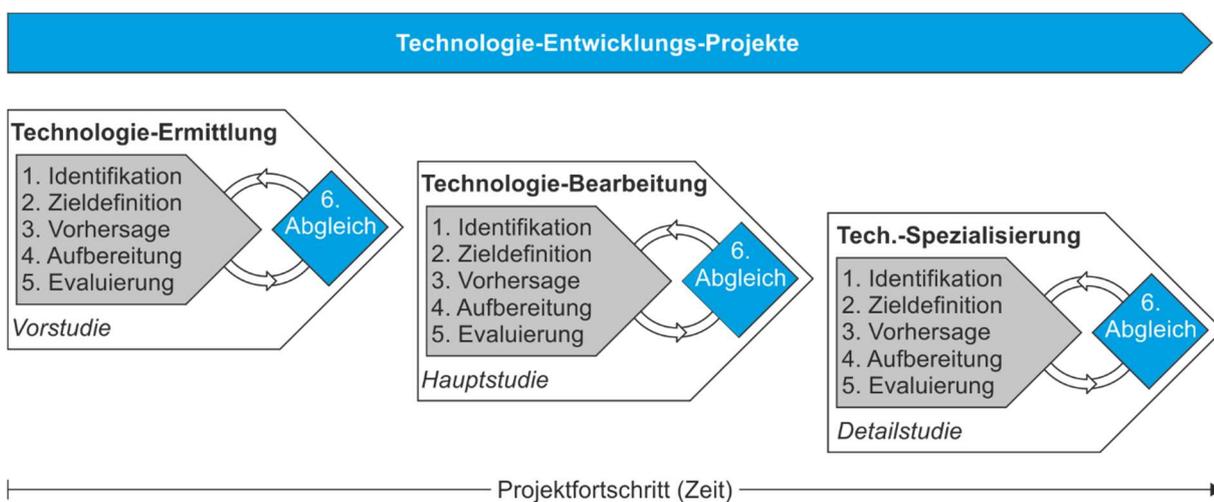


Abbildung 43: Generischer Phasenplan zur Durchführung von Technologieentwicklungsprojekten (Lang, 2012, S. 71)

Die spezifischen Phasen **Technologie-Ermittlung**, **Technologie-Bearbeitung** und **Technologie-Spezialisierung** erzeugen dabei, im Sinne einer Abfolge bestehend aus Vor-, Haupt- und Detailstudie, einen Konkretisierungsprozess.

Ausgangspunkt der konkreten Handlungen repräsentieren die **Identifikation** von Technologien, um vorher definierte technische Widersprüche, die den Zielen der Gesamtentwicklungsvorhabens gegenüberstehen, zu überwinden sowie eine Detaillierung der **Zieldefinition**.

Eine Herausforderung bei der Generierung von technologischem Wissen stellt die erforderliche **Vorhersage** über die Entwicklung des technologischen Fortschritts und die Abschätzung von Trends dar. In diesem Zusammenhang gilt es anzumerken, dass Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung einer spezifischen Technologie prinzipiell sehr schwierig und mit einem hohen Unsicherheitsfaktor behaftet sind. Vielfach führen diese Aktivitäten zur Generierung von „Schubladenwissen“, welches nicht unmittelbar bzw. unter Umständen nie verwertet werden kann. Um potentiell, zu einem späteren Zeitpunkt, auf dieses Wissen zurückgreifen und es effizient anwenden zu können, sollten die abzulegenden Informationen jedenfalls bis zu einem entsprechenden Reifegrad ausgearbeitet werden.

Im Anschluss an die Identifikation und Prognostizierung technologischer Potentiale ist es notwendig Strategien zu erarbeiten ob und wie man diese unternehmensspezifisch beschaffen und verwerten könnte (**Aufbereitung**), gefolgt von einer entsprechenden **Evaluierung** des bisher generierten Wissens zu spezifischen Technologien. Mit dem **Abgleich** potentieller Technologien erfolgt der entscheidende Schritt um das Vorgehensschema zur Bearbeitung von Technologieentwicklungsprojekten zu vervollständigen. Ziel dieser Aktivität ist die Identifikation von Interdependenzen, die Ableitung prinzipieller Voraussetzungen und Bedingungen für den Einsatz spezifischer Technologien sowie eine Einschätzung zu welchem Grad die Gesamtheit von Technologien die Anforderungen der Produktentwicklung erfüllen können.

Weiterführende Informationen und Details zu den einzelnen Teilschritten des betreffenden Vorgehensmodells werden in Lang (2012) erörtert.

Die Gestaltung der Abfolge der einzelnen Aktivitäten als zyklischen Prozess, der mehrmals gesamt oder teilweise in jeder Phase durchlaufen werden kann, begründet sich durch die Absicht nicht die beste technologische Lösung für ein singuläres Problem zu erarbeiten, sondern ein vielversprechendes Technologie-Paket für die übergeordnete Entwicklungsaufgabe. Die prinzipielle Definition der Vorgehensweise erfolgte dabei auf Basis eines allgemeinen Problemlösungsprozesses. Abbildung 44 stellt diesen (**Originaler Prozess**) dem spezifisch angepassten Vorgehensmodell (**Adaptierter Prozess**) gegenüber.

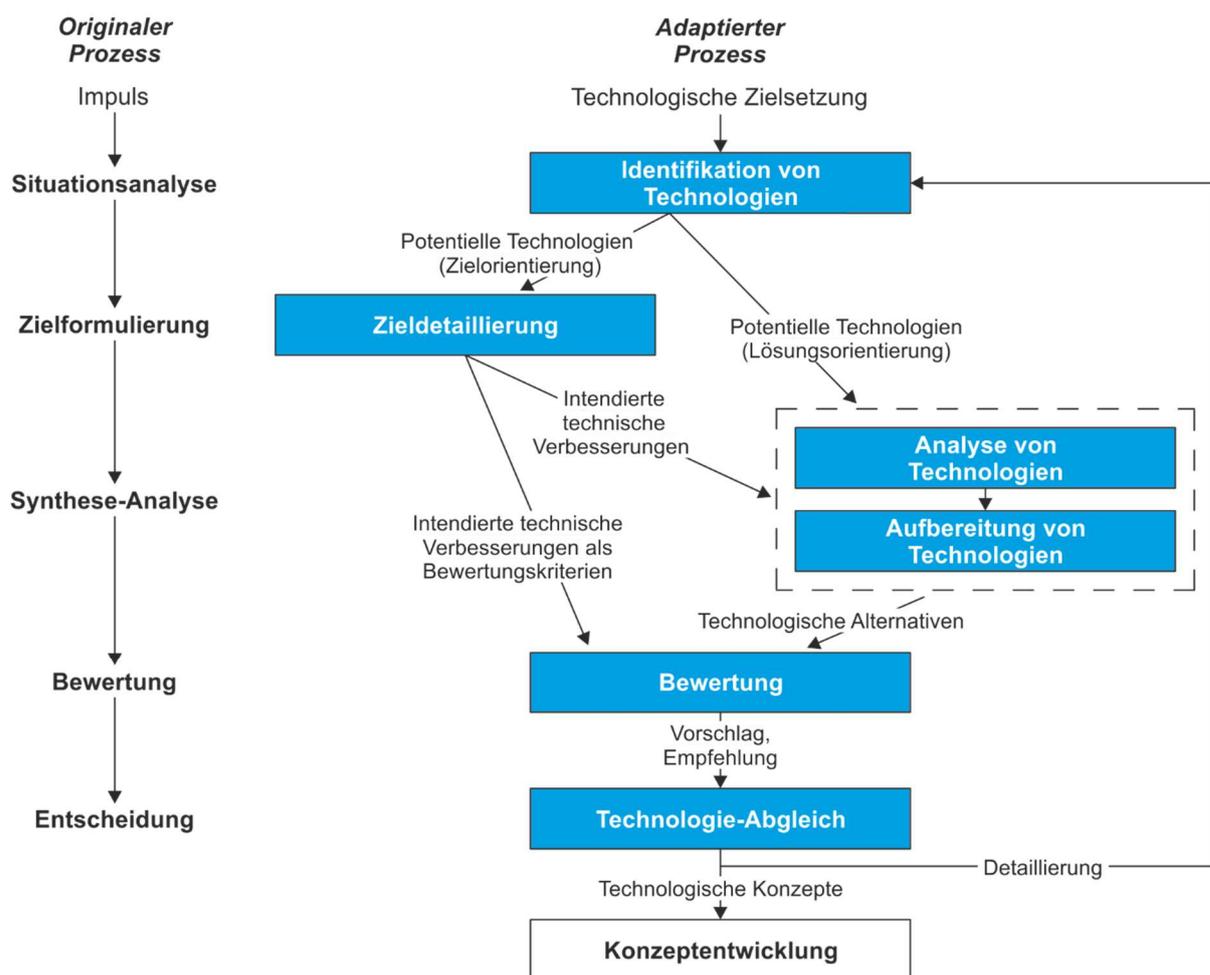


Abbildung 44: Prozessschritte zur spezifischen Bearbeitung von Technologieentwicklungsprojekten (Lang, 2012, S. 73)

4.1.2 Vorgehensweise zur systematischen Planung und Durchführung von Eigenschaftsanalysen

Das nachfolgend beschriebene Vorgehensschema behandelt die Durchführung von Eigenschaftsanalysen im Rahmen der Eigenschaftsfrüherkennung (Kapitel 2.4, S. 30). Aufgrund der spezifischen Fokussierung auf frühe Entwicklungsphasen besitzt dieses einen tendenziell präskriptiven Charakter, beinhaltet allerdings bewusst keine Einschränkungen in Hinblick auf anzuwendende Analysemethoden.

Durch den gezielten Einsatz von Methoden wird versucht möglichst frühzeitig und zugleich aufwandsarm die benötigten Informationen zu erzeugen (Abb. 45).



Abbildung 45: Klären von Informationsbedarf (vgl. Abbildung 3-8: Schwankl, 2002, S. 116)

Der nachfolgend dargestellte Prozess (Abb. 46) zeigt die generische Vorgehensweise für eine systematische Planung und Durchführung von orientierenden Analysen zur Klärung von Informationsbedarf. (Schwankl, 2002, S. 119ff)

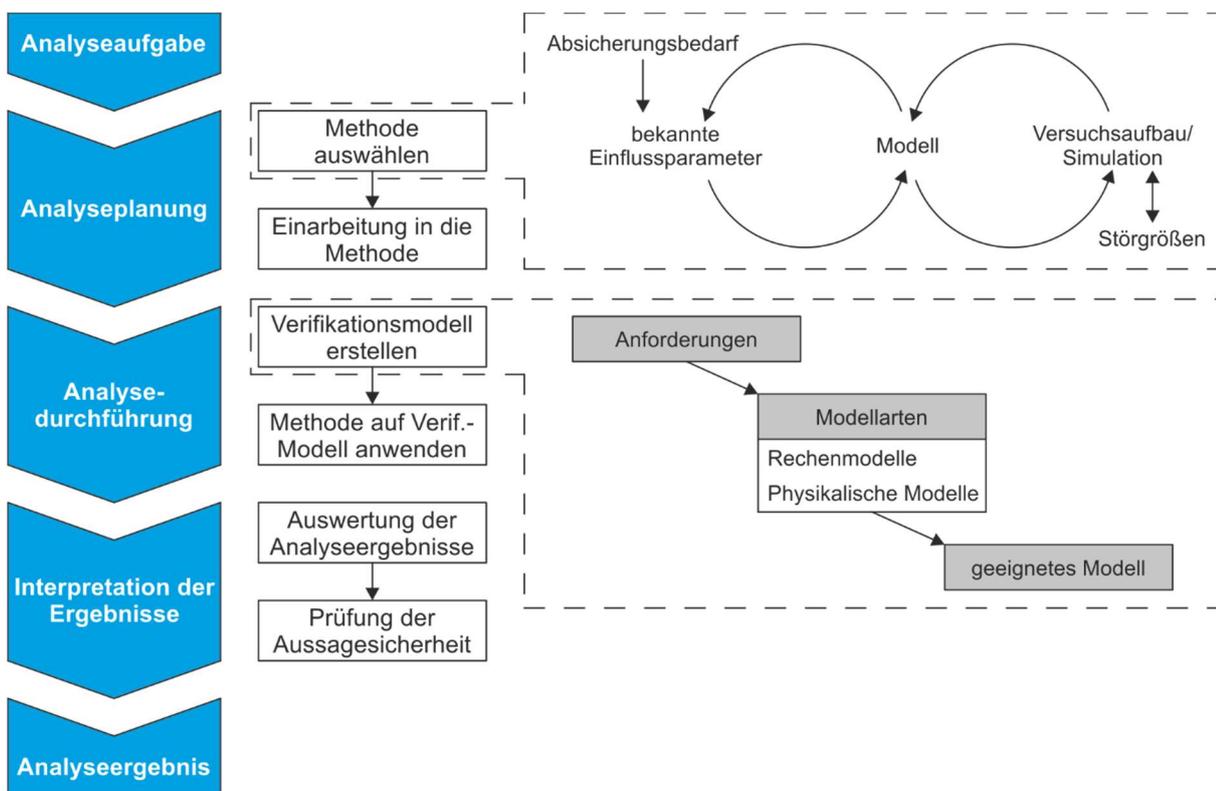


Abbildung 46: Planung und Durchführung einer Analyse (vgl. Abbildung 3-10: Schwankl, 2002, S. 119)

Der erste Schritt dieses Prozesses stellt die **Identifikation der Analyseaufgabe bzw. das Erkennen des Absicherungsbedarfs** dar. **Wesentlich hierbei ist die Klärung welche Eigenschaften genau untersucht werden sollen um die Komplexität und den Aufwand der Analyse möglichst gering zu halten.**

Die **Analyseplanung** beinhaltet die Erarbeitung sämtlicher Parameter, welche die Analyse beeinflussen, um darauf aufbauend Überlegungen hinsichtlich zu verwendender Modelle und Methoden anzustellen. Des Weiteren sollte bereits in der Planung der Analyse der Umgang mit etwaigen Störgrößen, die die Ausprägungen der Ausgangsgrößen beeinflussen können, berücksichtigt werden (Abb. 47). (Stetter/Spindler, 2001, S. 391; Lindemann, 2009, S. 161)

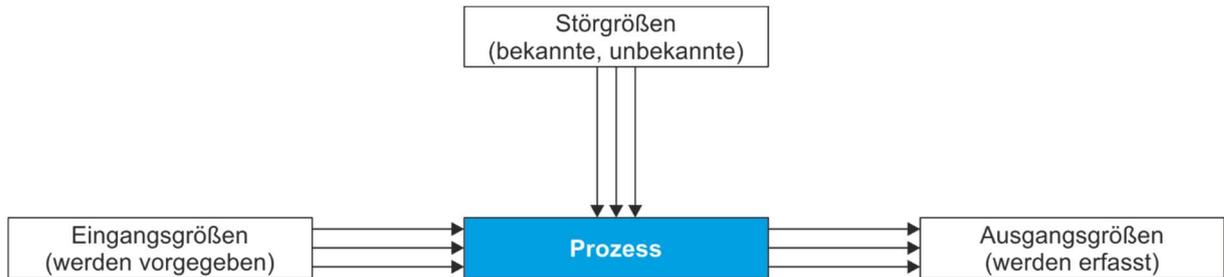


Abbildung 47: Wichtige Größen bei der Eigenschaftsanalyse (vgl. Abb. 88: Lindemann, 2009, S. 162)

Die Auswahl der einzusetzenden Methode hängt dabei von entwicklungs- als auch anwenderspezifischen Aspekten ab (Kapitel 2.4, S. 31f).

Bei dem von Schwankl (2002, S. 119ff) vorgestellten und in Abbildung 46 dargestellten Ablauf der Planung und Durchführung einer Analyse werden Modelle zur Produktrepräsentation eingesetzt, auf denen die entsprechenden Methoden in weiterer Folge angewandt werden. Auch für die Wahl der Modelle und die entsprechende Modellbildung gilt es möglichst exakte Anforderungen zu definieren.

Der Prozessschritt der **Analysedurchführung** impliziert dementsprechend deren Auswahl und Gestaltung. Der Aufwand und die Art des Methodeneinsatzes hängen dabei grundsätzlich von der intendierten Zielsetzung ab.

Die **Auswertung und Interpretation der Ergebnisse** bildet den letzten Schritt der Systematik zur Durchführung von Eigenschaftsanalysen, wobei die kritische Überprüfung der gesamten Analyse sowie der Gültigkeit der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen Basis einer hohen Aussagesicherheit ist. Grundlage hierfür sind wiederum Überlegungen bezüglich Eingangs- und Ausgangsparameter sowie Kenntnisse über die verwendeten Modelle und angewandten Methoden. (Schwankl, 2002, S. 123)

Als Möglichkeit einer prozessbegleitenden Dokumentation der Analyse wird die Verwendung einer sogenannten Parametercheckliste (Abb. 48) vorgeschlagen.

In diesem Zusammenhang wird auch auf die grundsätzliche Problematik hinsichtlich Dokumentation, Verwertbarkeit und Transfer von generiertem Wissen hingewiesen. (Schwankl, 2002, S. 123)

Parametercheckliste als Anlage zu Versuchsaufträgen im Rahmen der Eigenschaftsfrüherkennung			
Versuchsauftrag Nr.:		Versuchsbezeichnung:	
Fragestellung: Wozu wird untersucht? Welche Fragen sollen durch den Versuch beantwortet werden?			
Modell: Welches Modell des Produkts wird untersucht?			
Bauteil/Baugruppe:	Geometrie:	Material:	Herstellung:
Vergleichsmodell: Wird das Modell mit einem weiteren Modell verglichen? Wie ist dieses beschaffen?			
Bauteil/Baugruppe:	Geometrie:	Material:	Herstellung:
Versuchsaufbau: Welche Versuchseinrichtungen werden verwendet? Wie wird untersucht?			
Direkt zu ermittelnde Parameter: Welche möglichst isolierten und zahlenmäßig fassbaren Parameter sind zu ermitteln?			
Nr.:	Direkt zu ermittelnde Parameter		
1			
2			
Indirekt zu ermittelnde Parameter: Welche Parameter sollen über die direkt zu ermittelnden Parameter abgeschätzt werden?			
Nr.:	Indirekt zu ermittelnde Parameter		
1			
2			
Varierte Parameter: Welche einzelnen Parameter werden zielgerichtet verändert?			
Nr.:	Varierte Parameter	Zahlenwerte	
1			
2			
Störgrößen: Welche weiteren Parameter können die zu ermittelnden Parameter beeinflussen?			
Nr.:	Störgröße	Zahlenwert	Behandlung
1			<input type="checkbox"/> konstant gehalten <input type="checkbox"/> ignoriert
2			<input type="checkbox"/> konstant gehalten <input type="checkbox"/> ignoriert
Ergebnisse			
Ermittelte Parameter: Welche Werte für die Parameter wurden abhängig von den variierten Parametern ermittelt?			
Nr.:	Ermittelte Parameter	Ergebnis/Zahlenwerte	
1			
2			
Zusammenfassung: Was ergaben die Versuche? Was sagen die Ergebnisse aus?			
Schlussfolgerungen bzgl. realem Einsatz und weitere Entwicklung: Welche Rückschlüsse sind möglich?			
Weitere Erkenntnisse: Welche weiteren Erkenntnisse wurden während des Versuches gewonnen?			

Abbildung 48: Parametercheckliste zur Eigenschaftsfrüherkennung (vgl. Abbildung 9-14: Schwankl, 2002, S. 272)

4.2 Versuche als spezifische Experimente

Laut Rodenacker (1976, S. 17f) hat das Experiment, als Synonym für das Aufsuchen relevanter Einflussgrößen eines physikalischen Geschehens und der Auswahl einer unabhängigen und einer abhängig veränderlichen Einflussgröße zwischen denen ein gesetzmäßiger Zusammenhang festzustellen ist, für die Ingenieurarbeit die größte Bedeutung, da jede neue Information einer Konstruktion aus diesem gewonnen werden muss, sofern sie nicht in der Literatur greifbar ist.

Für die Beschreibung der spezifischen Arbeitsschritte zur Durchführung eines Experiments wählte Rodenacker den Fallversuch von Galilei (Abb. 49).

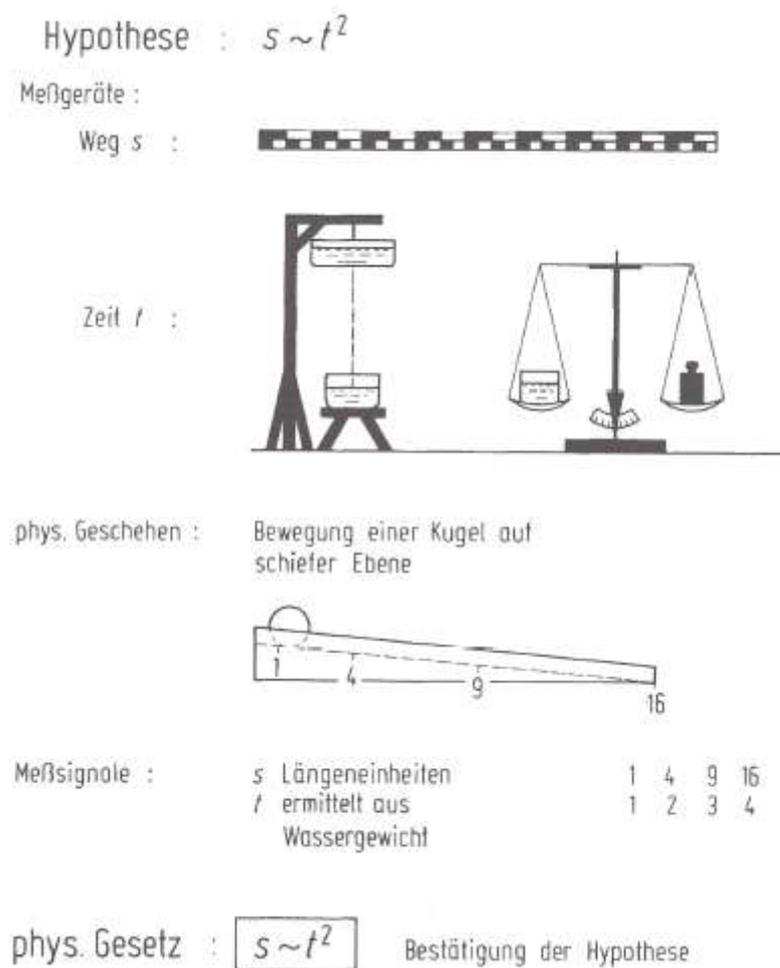


Abbildung 49: Experiment: Fallversuch von Galilei im Jahre 1604 (vgl. Abb. 1/6: Rodenacker, 1976, S. 17)

Ausgangspunkt eines Experiments stellt dabei eine Hypothese über Abhängigkeiten der Einflussgrößen des physikalischen Geschehens untereinander dar, wobei jede beteiligte Einflussgröße messtechnisch erfassbar und das physikalische Geschehen reproduzierbar sein muss. Die Auswertung der bei der Durchführung der Versuche erhaltenen Messergebnisse, als mittels Experiment gewonnene Informationen, führt zu einer Bestätigung oder Ablehnung der Hypothese. (Rodenacker, 1976, S. 18f)

Die durch Versuche gewonnenen Erkenntnisse gilt es in weiterer Folge für die Erfüllung einer bestimmten logischen Funktion einzusetzen. Rodenacker führt das Beispiel der „Schiefen Ebene“ von Galilei fort und zeigt mögliche konstruktive Anwendungsfälle auf (Abb. 50).

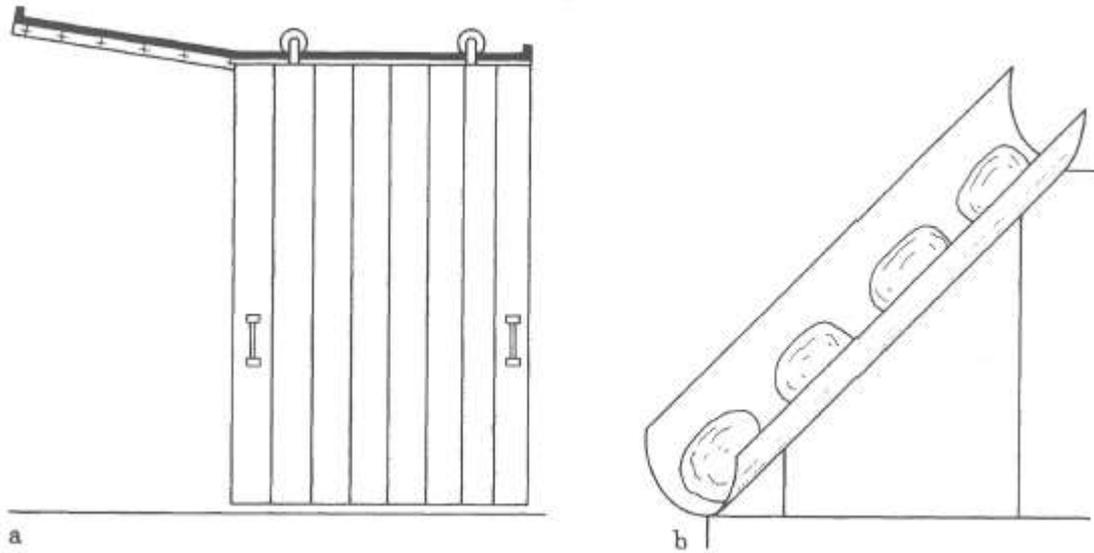


Abbildung 50: Konstruktionen mit physikalischem Effekt „Schiefe Ebene“ a) Selbstschließendes Tor b) Sackrutsche (vgl. Abb. 1/8: Rodenacker, 1976, S. 26)

Aus diesem Übergang vom Experiment zur Konstruktion, die Kenntnis der physikalischen Gesetze zu benutzen, sie für einen bestimmten Zweck zu verwenden und daraus Konstruktionsmerkmale zu definieren, leitet Rodenacker (1976, S. 26f) eine allgemeingültige Vorgehensweise für einen Konstrukteur, als **Umkehrung der Tätigkeiten bei einem Experiment**, ab (Abb. 51).

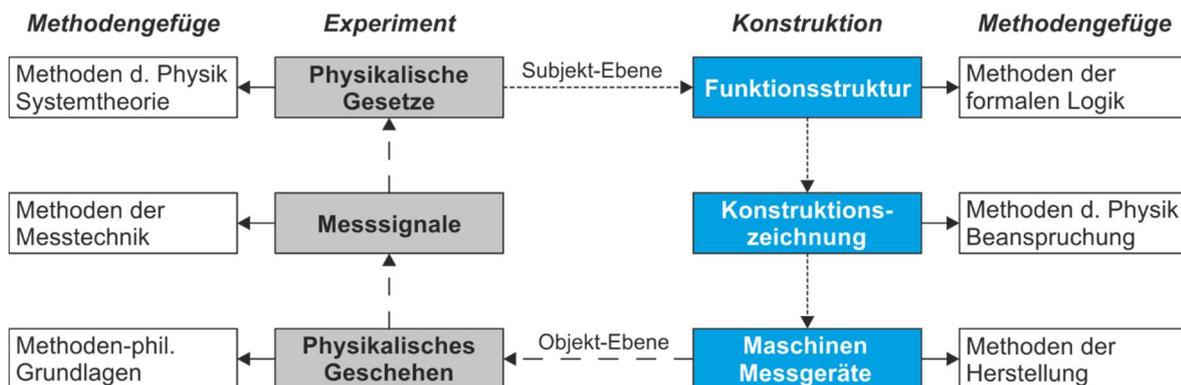


Abbildung 51: Methodengefüge: Experiment und Konstruktion (vgl. Abb. 1/9: Rodenacker, 1976, S. 26)

Der in Abbildung 51 dargestellte Kreislauf entsteht durch die Verwendung fertig konstruierter Maschinen, im konkreten Fall Messgeräte, um vom realen physikalischen Geschehen über Messsignale zu physikalischen Begriffen und deren Verknüpfungen zu gelangen, welche wiederum in Konstruktionen verwertet werden können.

Die Ausführungen von Rodenacker implizieren, dass es sich bei einem Experiment stets um einen realen Versuch mit physikalischen Prüfkörpern handelt.

Mittlerweile wird der Begriff Experiment, im Kontext Produktentwicklung, weiter gefasst und beinhaltet neben den traditionellen Versuchen auch den Einsatz neuer, vorwiegend Informationstechnologie-basierter, Methoden wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (vgl. Smith, 2007, S. 86f; Thomke, 2003, S. 19).

Der Einsatz und vor allem die Kombination neuer Technologien und Werkzeuge der Produktentwicklung, zu einem möglichst frühen Zeitpunkt, stellt dabei eine prinzipielle Möglichkeit zur Handhabung der frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses dar (Kapitel 5.1, S. 75ff).

Diese Breite des Terminus Experiment erfordert allerdings in Hinblick auf Planung, Durchführung und Auswertung Vorgehensmodelle mit einem hohen Abstraktionsgrad, um diese auf die jeweilig vorherrschende spezifische Situation anwenden bzw. übertragen zu können.

Das Schema zur Durchführung eines Experiments nach Smith (2007, S. 90ff) intendiert eine Basis für effektive Untersuchungen zur Verfügung zu stellen und dem Bedarf eines flexibel gestaltbaren Entwicklungsprozesses gerecht zu werden (Abb. 52).

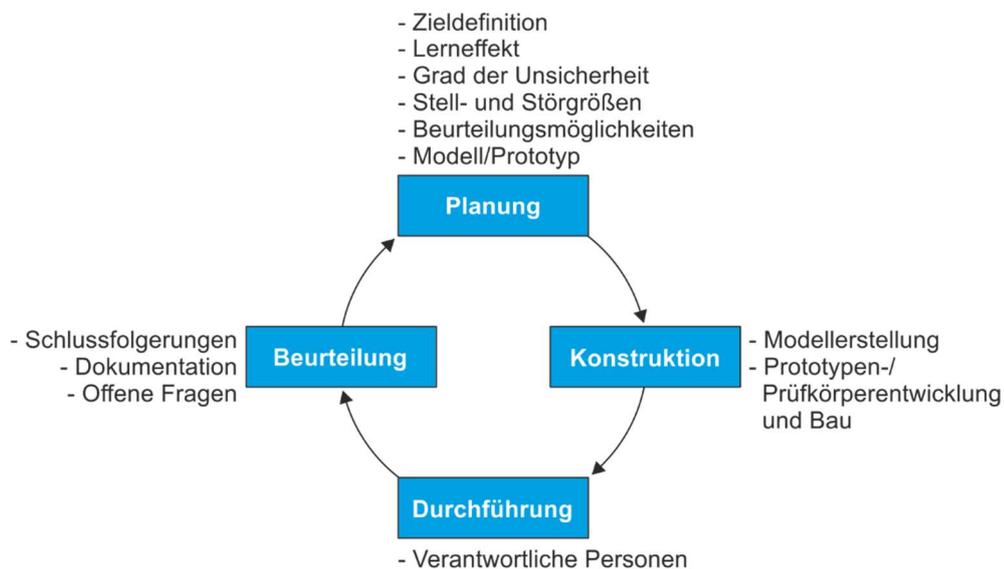


Abbildung 52: Iterativer 4-Stufen Untersuchungsprozess (vgl. Figure 4.2: Smith, 2007, S. 91)

Während der **Planung** der Untersuchung sollten dazu verschiedene Fragen beantwortet werden (Smith, 2007, S. 92):

- Welches Ziel wird mit der Untersuchung verfolgt?
- Was ist der erwartete Lerneffekt?
- Welche Ergebnisse werden erwartet und wie „sicher“ ist diese Einschätzung?
- Wie soll das Ergebnis beurteilt werden?
- Können zielführende Messungen durchgeführt werden?
- Wie erfolgt der Umgang mit subjektiven Faktoren?
- Wie erfolgt der Umgang mit Störgrößen?
- Welche äußeren Faktoren müssen kontrolliert werden? Wie genau?
- Wie „vollständig“ muss die Untersuchung sein?
- Wie detailliert muss das Modell bzw. ein Prototyp sein?

Im nächsten Schritt (**Konstruktion**) werden die erforderlichen Modelle, Prüfkörper, Prototypen und Apparaturen gestaltet und hergestellt. In Abhängigkeit der Zielsetzung gilt es die jeweils einfachsten und kostengünstigsten Varianten auszuarbeiten, die ein valides Experiment gewährleisten.

Wesentliches Element bei der **Durchführung** von Experimenten ist der Faktor Mensch. Eine Vielzahl an Informationen wird ausschließlich subjektiv erfasst bzw. wahrgenommen, vor allem wenn diese messtechnisch nicht erfasst werden können.

Vervollständigt wird die Prozessfolge nach Smith mit der **Beurteilung**. Die aus den gewonnenen Erkenntnissen gezogenen Schlussfolgerungen repräsentieren entweder die Basis einer Iterationsschleife oder führen zu einem Voranschreiten im übergeordneten Entwicklungsvorhaben. Demzufolge bezweckt dieser Schritt die Bearbeitung folgender Punkte:

- Die Begründung und Dokumentation von Wissenszuwachs.
- Die Ermittlung von Wissenslücken.
- Die Unterstützung der Entscheidungsfindung ob weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Smith (2007, S. 91) weist explizit darauf hin, dass der Prozess des Experimentierens stets Teil eines Produktentwicklungsprozesses ist und jeder Untersuchungszyklus Aktivitäten im Sinne einer Verwertung der durch experimentieren gewonnenen Erkenntnisse beinhaltet. Diese Aussage korrespondiert mit der These eines methodischen Einsatzes von Prinzipversuchen, mit dem Ziel den Aufwand empirischer Untersuchungen möglichst gering zu halten.

Eine ähnliche Systematik zur zielgerichteten Durchführung aufwandsarmer und iterativ gestalteter Untersuchungen wird von Thomke (2003, S. 92ff) vorgeschlagen (Abb. 53).

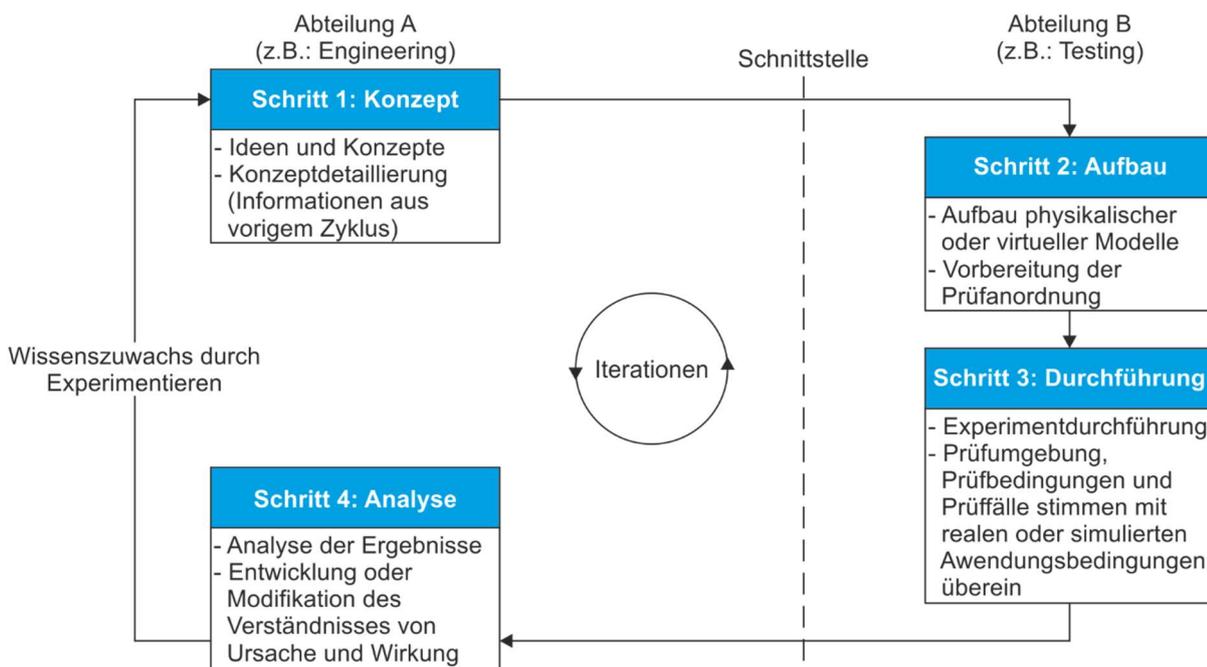


Abbildung 53: Das Experiment als 4-stufiger iterativer Zyklus mit verteilten Verantwortlichkeiten (vgl. Figure 3-2: Thomke, 2003, S. 94)

Ausgehend von vorhandenem Wissen und Informationen aus bereits durchgeführten Untersuchungen, werden im Schritt **Konzept** Ideen generiert und Hypothesen aufgestellt, wie man fehlenden Informationsbedarf durch Experimente abdecken könnte.

Anschließend erfolgen wie beim Vorgehensmodell nach Smith der **Aufbau** physikalischer oder virtueller Modelle und die Vorbereitung der Prüfanordnung, die eigentliche **Durchführung** der Untersuchungen und die anschließende **Analyse** der Ergebnisse.

Die zu bearbeitenden Schritte beinhalten neben inhaltlichen und thematischen Aufgabenstellungen unter Umständen auch organisatorische Herausforderungen, wie beispielsweise die Koordination zwischen beteiligten Personen und Abteilungen. Gemäß Thomke (2003, S. 205ff) sind im Standard-Prozess (Abb. 53), bei den spezifischen Teilschritten, verschiedene Teams bzw. Abteilungen mit teils unterschiedlicher Motivation involviert, woraus ein verlangsamter Prozessfortschritt resultieren kann. Ein möglicher Ansatzpunkt diesem Umstand zu begegnen stellt die Organisation von bereichsübergreifenden Entwicklungsteams, im Sinne einer Gesamtverantwortlichkeit für den Untersuchungsprozess, dar (Abb. 54).

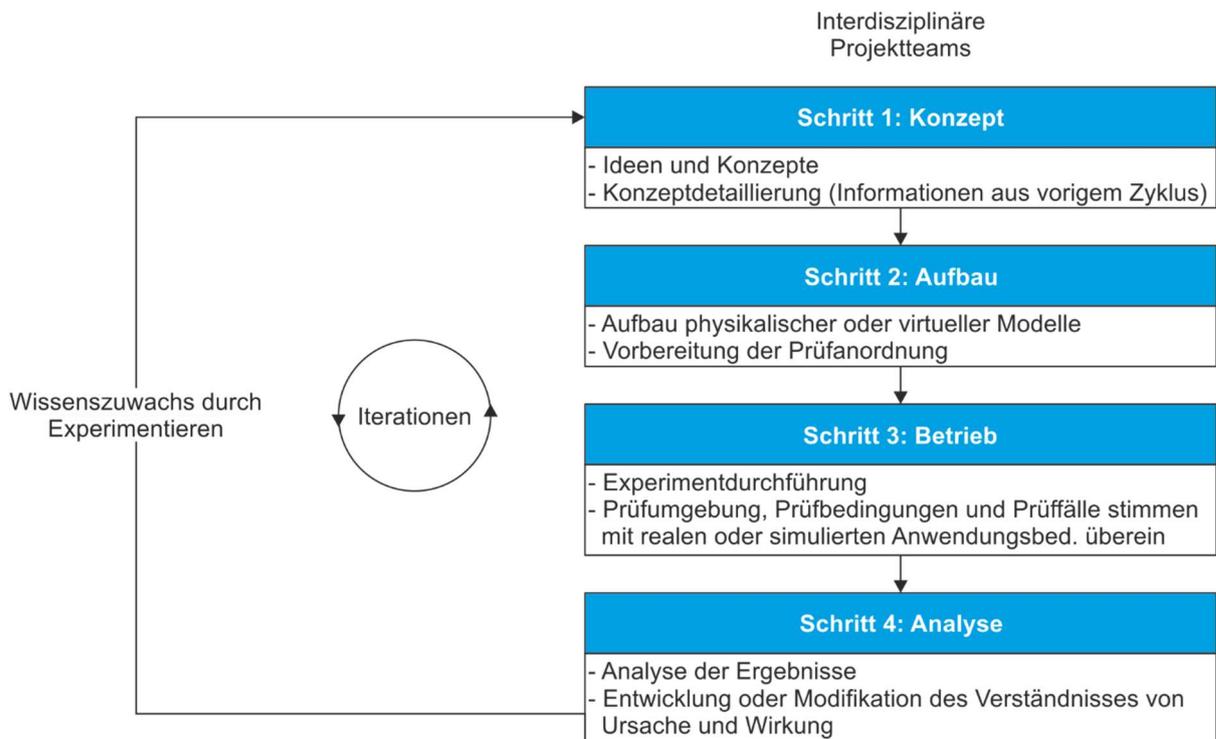


Abbildung 54: Das Experiment als 4-stufiger iterativer Zyklus als interdisziplinäre Aufgabenstellung (vgl. Figure 6-1: Thomke, 2003, S. 205)

Die Gestaltung der Vorgehensmodelle nach Smith und Thomke als zyklische Prozesse, die in mehreren Iterationsschleifen durchlaufen werden sollten, beruht auf der in Entwicklungsvorhaben gegebenen Komplexität.

Die Idealvorstellung vom Ablauf eines Experiments, eine unabhängige Variable von einer abhängigen zu separieren um dann die unabhängige zu variieren und die Auswirkungen auf die abhängige zu beobachten, berücksichtigt keine permanent wechselnden Bedingungen, vielschichtige Abhängigkeiten oder unbekannte Einflussgrößen bzw. Verhaltensweisen.

Aus diesem Grund werden bewusst Iterationsschleifen vorgesehen, um die Untersuchungen schrittweise aufzubauen und flexibel detaillieren zu können.

4.3 Versuche als spezifische Analysemethoden

Die bisher in diesem Kapitel dargestellten Vorgehensmodelle intendieren einen prinzipiellen Leitfaden zur Durchführung von Untersuchungen im Rahmen der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen, allerdings ohne strikte Einschränkung auf anzuwendende Analysemethoden.

Die nachfolgend diskutierten Vorgehensweisen thematisieren den spezifischen Einsatz von Versuchsmethoden.

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung, als anwendungsorientierte und mathematisch fundierte Methodik zur Aufwandsoptimierung bei der Durchführung von Versuchen, definiert Kleppmann (2013, S. 17ff) die prinzipiellen Teilschritte aus denen ein geplanter Versuch besteht wie folgt:

1. **Ausgangssituation beschreiben:** Neben projektspezifischen und organisatorischen Fragestellungen, wie etwa maximal zur Verfügung stehende Ressourcen oder Verantwortlichkeiten, gilt es zu definieren, welches (Teil-)Problem durch die Untersuchung gelöst werden soll und was darüber bereits bekannt ist.
2. **Untersuchungsziel festlegen:** Eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen befriedigender Ergebnisse stellt die eindeutige Festlegung des Untersuchungsziels, unter Einbeziehung aller beteiligter Personen, dar.
3. **Zielgrößen und Faktoren festlegen:** Bei der Auswahl von Zielgrößen und relevanter Faktoren gilt es vor allem die Aspekte Quantifizierbarkeit und Vollständigkeit, im Sinne eines Erfassens aller wesentlichen Produkteigenschaften und Einflussgrößen, zu beachten. Nicht untersuchte Einflussgrößen, insbesondere Störgrößen, sollten möglichst konstant gehalten werden, um die Zufallsstreuung zu minimieren. Als Faktoren werden in diesem Zusammenhang Einflussgrößen bezeichnet, welche im Versuch gezielt verändert werden sollen.
4. **Versuchsplan aufstellen:** Aufgrund des erforderlichen Aufwands soll die Anzahl an Einzelversuchen möglichst gering sein. Zugleich muss die Menge an Untersuchungen allerdings groß genug sein, um relevante Unterschiede aufzuzeigen. Dieser Widerspruch bedingt eine Planung des Versuchsumfangs. Der optimale Versuchsplan ist dabei abhängig vom Untersuchungsziel, der Anzahl an Faktoren, der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse sowie von der Größe der Zufallsstreuung.
5. **Versuche durchführen:** Der Versuchsdurchführung geht eine entsprechende Vorbereitung in Form der Überprüfung der Messgeräte und Messverfahren, der Festlegung des Versuchs- und Messablaufs und der Durchführung eines Pilotversuchs inklusive Plausibilitätscheck voraus. Bei der eigentlichen Durchführung empirischer Untersuchungen können unvorhergesehene Zwischenfälle und Unwägbarkeiten, trotz aller Sorgfalt, auf- bzw. in Erscheinung treten. Deshalb ist eine Dokumentation sämtlicher Besonderheiten und Abweichungen vom Plan, aus Gründen der Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit, jedenfalls erforderlich.

Sofern es nicht möglich ist Umgebungsbedingungen oder Anlagenzustand während der Versuche konstant zu halten, sollten auch diese Veränderungen aufgezeichnet werden. Dadurch kann unter Umständen nachträglich deren Einfluss auf die Ergebnisse erkannt werden.

6. **Versuchsergebnisse auswerten:** Der Verzicht auf eine statistische Auswertung von Versuchsergebnissen ist nur dann möglich, wenn die Zufallsstreuung sehr viel kleiner ist als technologisch relevante Unterschiede. Des Weiteren können verschiedenste Fehler bei Versuchen Ausreißer, Ergebnisse welche offensichtlich nicht zu den anderen passen, zur Folge haben, die in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt werden dürfen. Allerdings können diese nicht nur die ermittelten Resultate verfälschen, sondern als sogenannte scheinbare Ausreißer auch auf bislang unbekannte Einflüsse hinweisen. Aus diesem Grund sollten Messergebnisse idealerweise möglichst sofort analysiert und ausgewertet werden. Ist dies der Fall, können Versuche bei Bedarf wiederholt werden, um beispielsweise zu untersuchen, ob es sich im Falle eines Ausreißers um einen singulären Messfehler oder einen reproduzierbaren Sachverhalt handelt.
7. **Ergebnisse interpretieren und Maßnahmen ableiten:** Das Ergebnis der statistischen Auswertung (Punkt 6) sind Zahlenwerte für die Größe der erfassten Wirkungen, die Breite der Vertrauensbereiche und daraus abgeleitete Aussagen über die Signifikanz der Effekte, als Maß ob der Effekt größer ist als seine Zufallsstreuung. Diese gilt es in weiterer Folge technisch zu verstehen und interpretieren sowie in Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen.
8. **Absicherung, Dokumentation, weiteres Vorgehen:** Die Sicherstellung der tatsächlichen Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse und daraus abgeleiteter Handlungen zu deren Verwertung ist die Grundvoraussetzung für eine Qualitätssteigerung einer übergeordneten Produktentwicklung.

Nachfolgende Abbildung zeigt die beschriebenen Teilschritte der Versuchsdurchführung als iterative Prozessfolge (Abb. 55).



Abbildung 55: Teilschritte eines geplanten Versuchs auf Basis der statistischen Versuchsplanung

Das Vorgehensschema nach Kleppmann bzw. die spezifischen Teilschritte repräsentieren eine logische und durchgängige Vorgehensweise um den Versuchsumfang, die Anzahl der Einzelversuche, zu minimieren. Demzufolge thematisiert es jedoch nicht die prinzipielle Gestaltung des Versuchs bzw. des Prüfsystems im Sinne einer effizienten und zielgerichteten Eigenschaftsanalyse, sondern behandelt einen impliziten Teilaspekt.

Gemäß Ehrlenspiel/Meerkamm (2013, S. 526f) erfolgt die Beschreibung eines systematisierten Vorgehens zur Versuchsplanung und -durchführung anhand eines aus dem Problemlösungsprozess der Systemtechnik (Abb. 18) abgeleiteten Vorgehenszyklus (Abb. 56). Die Strukturierung eines Versuchs mittels eines allgemeinen Problemlösungsprozesses wird dabei mit der grundsätzlichen Notwendigkeit eine Vielzahl von Problemen zu lösen, um eine schnelle und kostengünstige Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation von Versuchen zu gewährleisten, begründet.

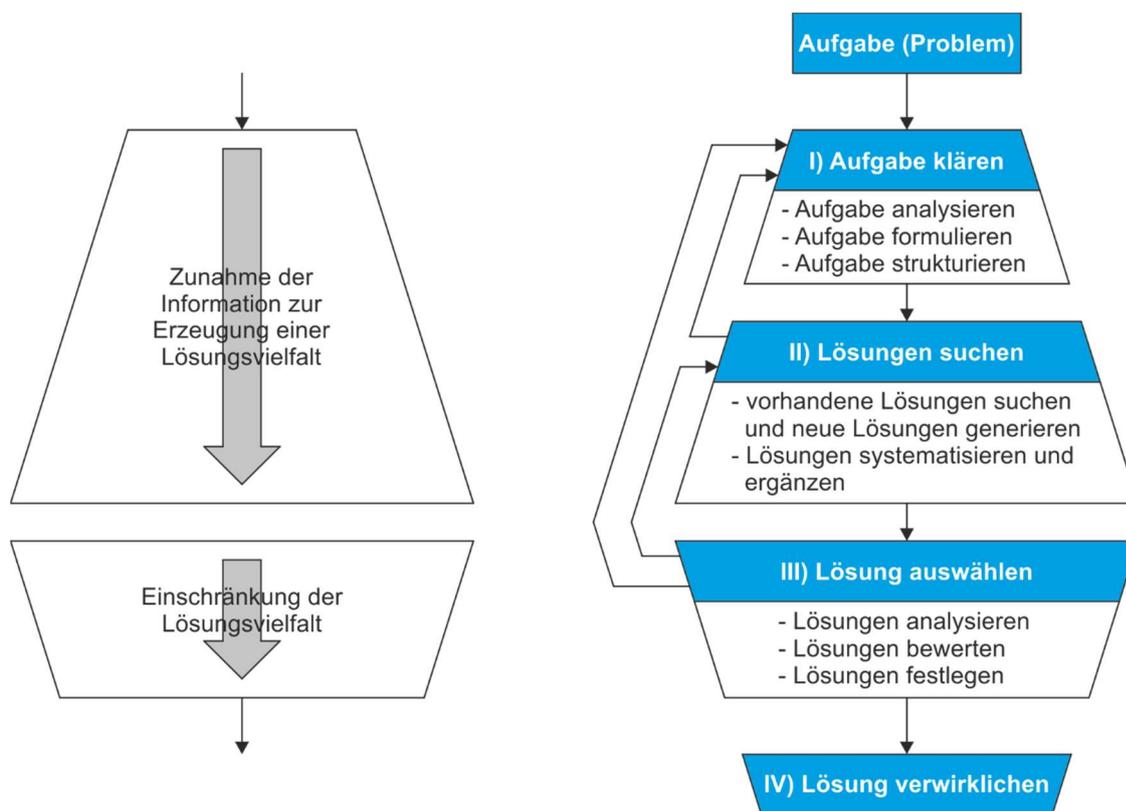


Abbildung 56: Vorgehenszyklus für die Systemsynthese, abgeleitet aus dem Problemlösungszyklus der Systemtechnik (vgl. Bild 3.3-14: Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 92)

Ausgangspunkt der Prozessfolge ist stets eine **Aufgabe** in Form einer unbekanntenen Eigenschaft eines Objekts.

In Arbeitsabschnitt I **Aufgabe klären** gilt es eine hypothetische Modellvorstellung vom Funkzionieren, Ablaufen und Verhalten des zu untersuchenden Objektes sowie eine Modellvorstellung für die Erfassung und Variation von Einflussgrößen zu erarbeiten. Nachfolgend werden, entsprechend Arbeitsabschnitt II und III, **Lösungen gesucht und ausgewählt**. Dazu sollten Versuchsmethoden, in Abhängigkeit der jeweiligen Erfordernisse, und etwaige notwendige experimentelle Einrichtungen ermittelt und ausgewählt respektive konstruiert und gebaut werden.

Die Durchführung, Auswertung und Interpretation von Versuchen, nach Arbeitsabschnitt IV **Lösung verwirklichen**, komplettiert den Vorgehenszyklus zur Durchführung und Planung von Versuchen.

In der Regel sind Versuchsdurchführungen bzw. demzufolge die aktive Ausführung des Vorgehenszyklus geprägt von Iterationen zwischen den einzelnen Arbeitsabschnitten (Abb. 56). Nur in seltenen Fällen, überwiegend nur bei Routineversuchen, können die ursprünglichen Modellvorstellungen und die Wahl der Versuchsparameter bzw. der Versuchseinrichtungen von Anfang an realistisch eingeplant werden. (Ehrlenspiel/Meerkamm, 2013, S. 526)

Lindemann (2009, S. 53f) weist beispielhaft auch auf die Einsatzmöglichkeit des sogenannten Münchener Vorgehensmodells (Abb. 57), als prinzipielle Systematik zur Planung, Orientierung und Reflexion von Prozessen zur Problemlösung, zur Organisation und Gestaltung einer Versuchsdurchführung hin.

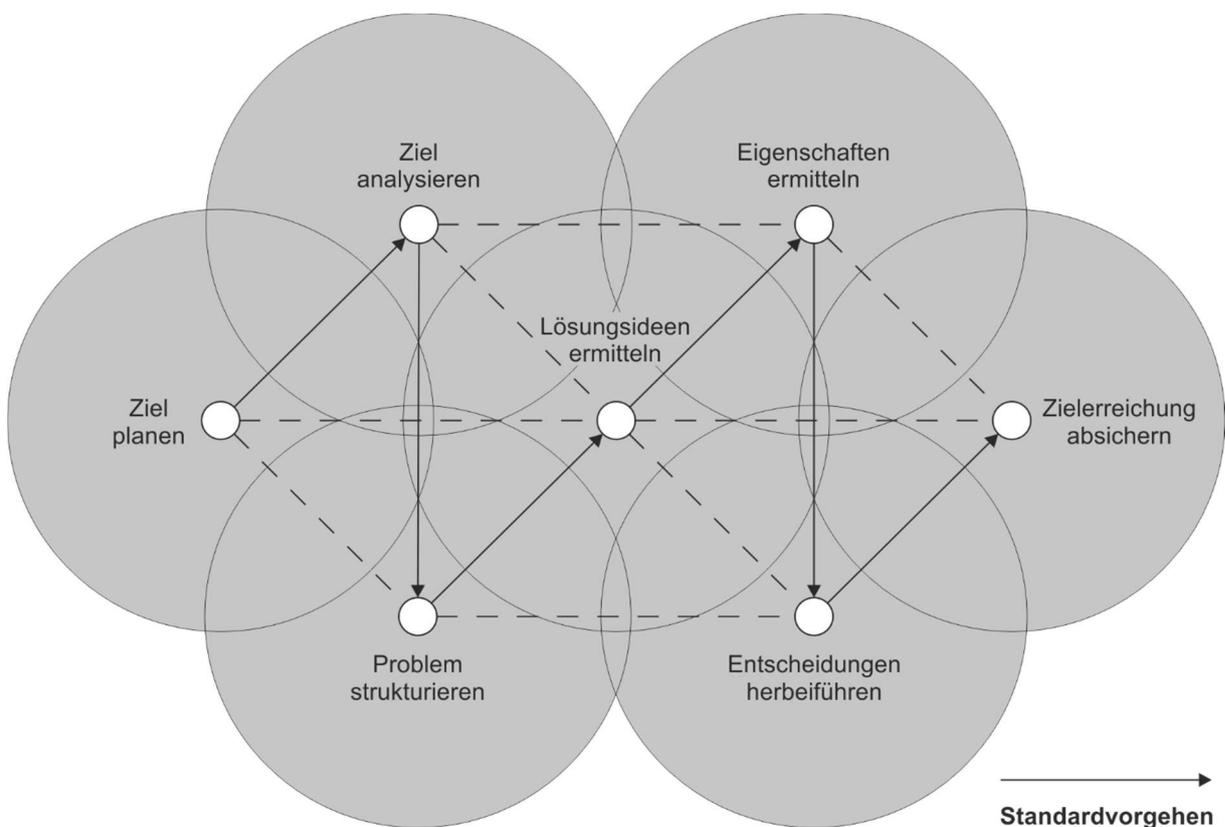


Abbildung 57: Standardvorgehen bei der Problemlösung gemäß Münchener Vorgehensmodell (vgl. Abb. 27: Lindemann, 2009, S. 51)

Das Münchener Vorgehensmodell besteht grundsätzlich aus folgenden sieben Schritten respektive Elementen, welche eine Art Entwicklungslandkarte aufspannen:

- **Ziel planen:** Analyse der Situation sowie Ableitung konkreter Maßnahmen
- **Ziel analysieren:** Klärung und Beschreibung des gewünschten Zielzustandes
- **Problem strukturieren:** Ermittlung von Handlungsschwerpunkten
- **Lösungsideen ermitteln:** Suche nach vorhandenen Lösungen und Generierung neuer Lösungen

- **Eigenschaften ermitteln:** Ermittlung der Ausprägungen relevanter Systemmerkmale
- **Entscheidungen herbeiführen:** Bewertung und Auswahl von Lösungsideen
- **Zielerreichung absichern:** Risiken erkennen, bewerten und gegebenenfalls Maßnahmen festlegen und umsetzen

Die spezifischen Arbeitsschritte können dabei vom Entwickler situations- und prozessspezifisch verbunden und entsprechend bearbeitet werden, wodurch die Adaptierbarkeit und der flexible Charakter des Modells hervorgehoben werden soll. Der in Abbildung 57 dargestellte Prozessverlauf repräsentiert ein, von der konkreten Entwicklungssituation unabhängiges, Standardvorgehen, welches vor allem Entwicklern mit wenig Erfahrung in der Methodenanwendung unterstützen soll (Lindemann, 2009, S. 50).

Die Möglichkeit der Darstellung von Rekursionen, im Sinne einer Verschachtelung mehrerer Vorgehensmodelle auf verschiedenen Ebenen, wird von Lindemann (2009, S. 53) am Beispiel einer Versuchsdurchführung aufgezeigt. Dabei wird von einem Szenario eines Entwicklungsvorhabens ausgegangen, bei dem nach der Generierung von Lösungsmöglichkeiten festgestellt wird, dass zur Ermittlung von Eigenschaften Versuche erforderlich sind (Abb. 58).

Die Planung und in weiterer Folge Durchführung der Versuche erfolgt anhand eines rekursiven Zyklus auf einer tieferen Ebene. Für die Lösungssuche eines Teilproblems, wie etwa der Konzeptionierung des Versuchsaufbaus, wird ein weiteres Münchener Vorgehensmodell durchlaufen. Entsprechend eines Bottom-up Ansatzes werden anschließend die bereits begonnenen Vorgehensmodelle zu ihrem Abschluss gebracht.

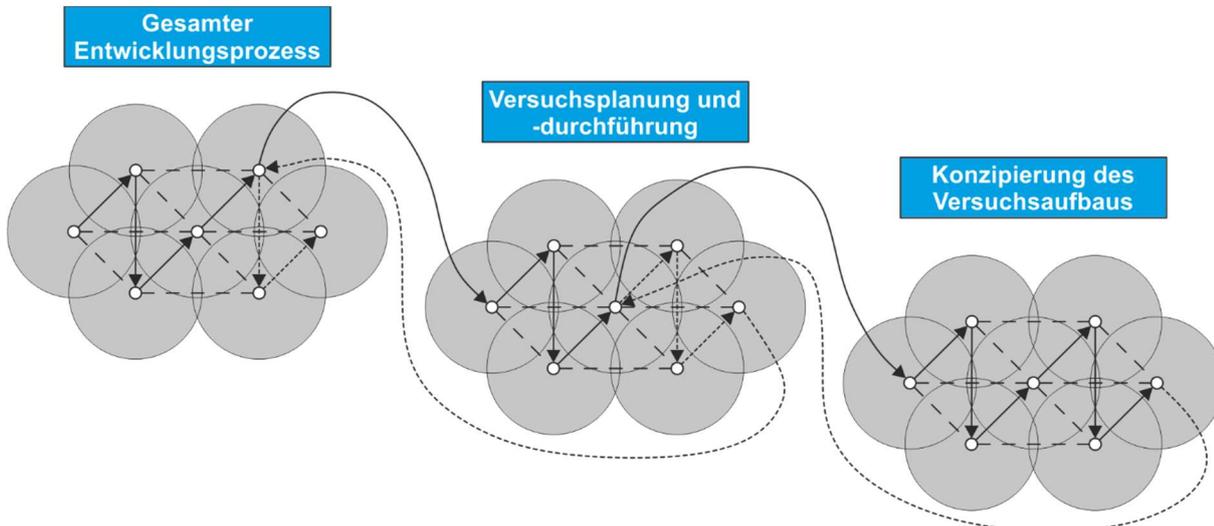


Abbildung 58: Gestaltung eines Versuchsablaufs als Beispiel für eine rekursive Anwendung des Münchener Vorgehensmodells (vgl. Abb. 30: Lindemann, 2009, S. 54)

Grundsätzlich wird bei der praktischen Anwendung des Münchener Vorgehensmodells auf eine Reflexion des eigenen Vorgehens anhand des Modells verwiesen (Lindemann, 2009, S. 53), um Lernprozesse zu unterstützen und Wissen über geeignete Vorgehensweisen zu generieren.

Lindemann (2009, S. 167) bezeichnet wie Ehrlenspiel/Meerkamm (2013, S.612) Versuche, im Sinne von orientierenden Versuchen (Kapitel 2.4, S. 33), als effiziente Methode der Eigenschaftsfrüherkennung und weist im Rahmen der angehängten Methodenbeschreibung auf diverse elementare Aspekte der Methode hin (Abb. 59).

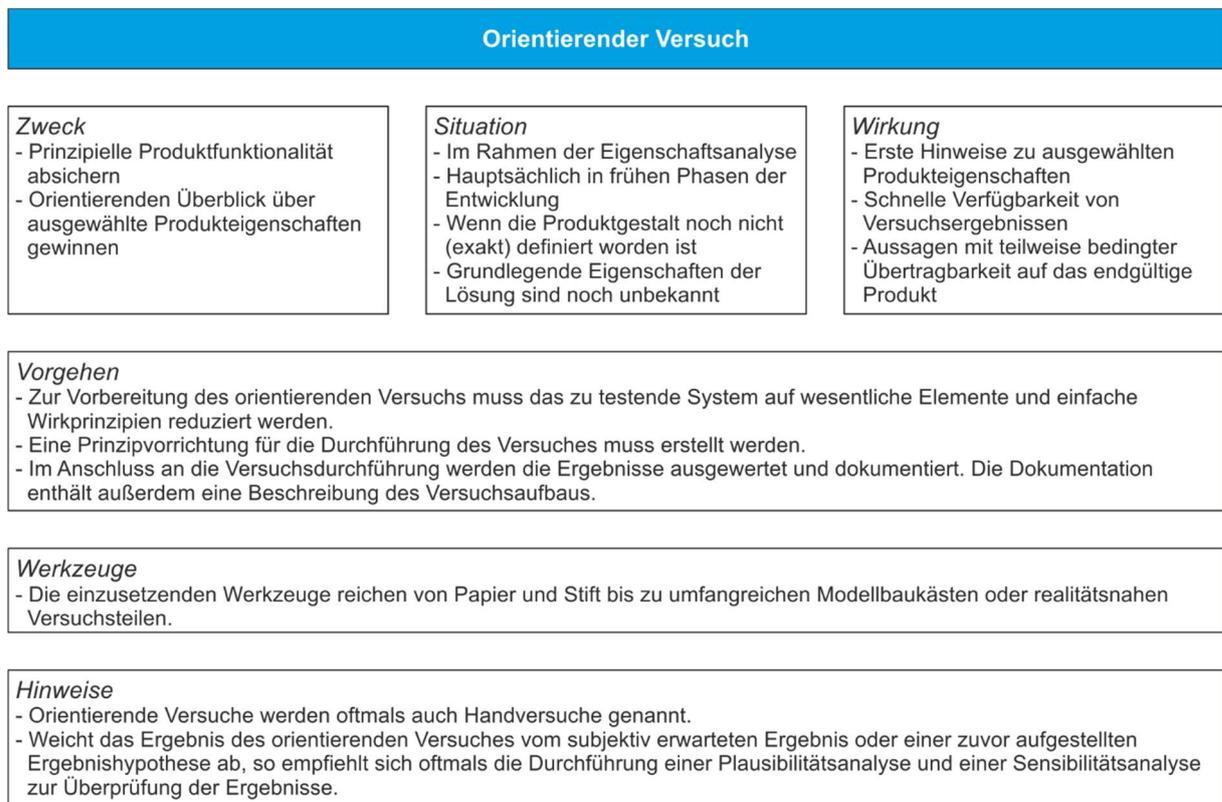


Abbildung 59: Methodenbeschreibung „Orientierender Versuch“ (Lindemann, 2009, S. 288)

Der Unterschied zwischen Prinzipversuchen und orientierenden Versuchen liegt grundsätzlich in der globaleren Verwendung des Terminus „Orientierender Versuch“ für empirische Analysen in frühen Entwicklungsphasen. Dementsprechend können Prinzipversuche ebenfalls als orientierende Versuche interpretiert bzw. dieser Versuchsart zugeordnet werden. Das Spezifikum von Prinzipversuchen liegt in der quantitativen Beschreibung gezielt isolierter physikalischer Effekte unter definierten Bedingungen. Die in Abbildung 59 angeführten elementaren Perspektiven, vor allem jene betreffend des Vorgehens, haben somit auch für Prinzipversuche Gültigkeit und sollten daher von einem spezifischen Prozessmodell zu deren Durchführung abgebildet werden.

Beispiele für den Einsatz orientierender Versuche in Entwicklungsprozessen werden u. a. von Lindemann (2009, S. 169ff), Ehrlenspiel/Meerkamm (2013, S. 524f) und Schwankl (2002, S. 210ff) aufgezeigt.

4.4 Reflexion

Die Entwicklung bzw. Definition eines Vorgehensschemas für Analysemethoden ist stets mit einer Abstraktion verbunden, sofern sämtliche Ausprägungen und Einsatzmöglichkeiten (Kapitel 4.1, S. 53) damit abgebildet werden sollen.

Die Anwendung der Systemtechnik im Allgemeinen bzw. grundsätzlicher Problemlösungsprozesse als Ordnungs- bzw. Strukturierungsgrößen hat sich daher im Bereich der methodischen Produktentwicklung weitgehend etabliert (Kapitel 2.3.1, S. 20ff) und spiegelt sich auch in den analysierten Vorgehensstrategien zur Versuchsdurchführung wider.

Elemente der Systemtechnik werden in diesem Zusammenhang zum Teil auch als elementare Gestaltungselemente des Vorgehens in der Produktentwicklung angesehen und sind somit implizit Teil jedes Entwicklungsvorhabens.

Beispielsweise wird das Systemdenken, neben anderen, als „Philosophie“ (Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 4ff) im Sinne eines Teils des geistigen Überbaus des Systems Engineering, als „Grundprinzip des Handelns“ (Lindemann, 2009, S. 55ff) oder als „Allgemeine Methode“ (Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 286ff) und somit Grundlage für methodisches Arbeiten bezeichnet.

Die betrachteten spezifischen Methoden zur Versuchsdurchführung können, aufgrund ihres relativ hohen Abstraktionsgrades, grundsätzlich bei jedem Versuchsvorhaben angewendet werden und geben eine prinzipielle Ablaufstruktur bzw. logische Teilschritte vor. Ähnlich der Möglichkeit holistische Entwicklungs- und Konstruktionsmethodiken auf vier elementare Phasen zu reduzieren (Kapitel 2.1.3, S. 12) kann man auch die einzelnen Aspekte der Vorgehensmodelle im Sinne einer ablaforientierten Prozessfolge harmonisieren (Abb. 60).

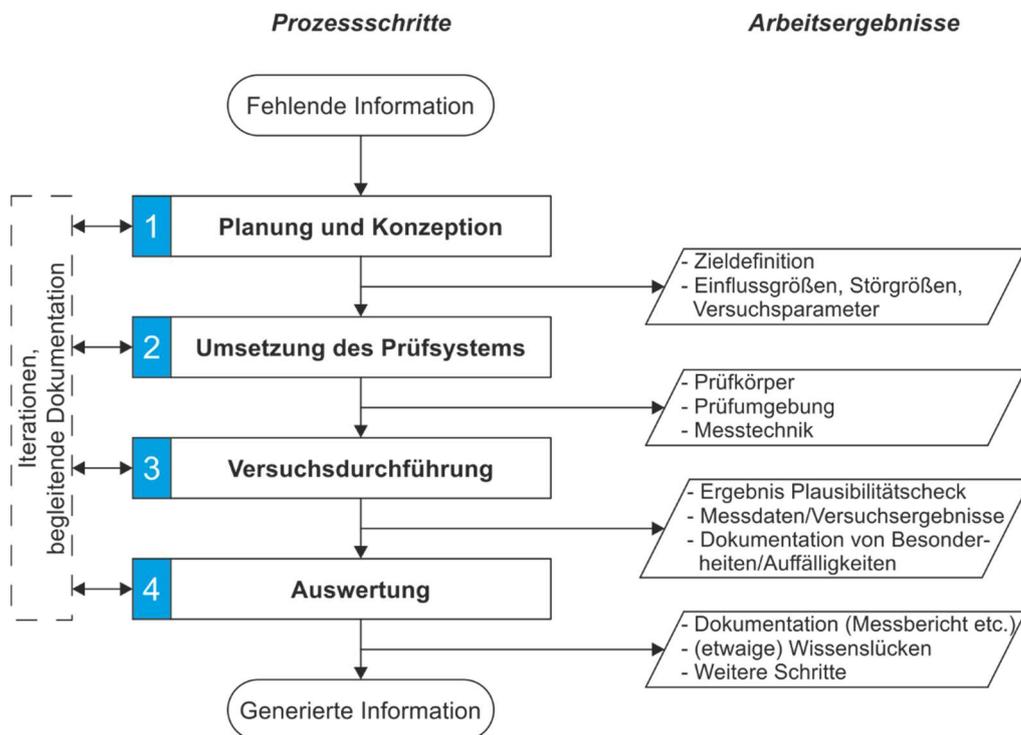


Abbildung 60: Harmonisierte Prozessfolge zur Versuchsdurchführung

Ein wesentliches Element der **Planungsphase** eines Versuchs repräsentiert die Überprüfung ob die fehlenden Informationen, als eigentlicher Impuls für die Versuchsdurchführung, auch durch diesen generiert werden können.

Aufbauend auf der prinzipiellen Zielsetzung des Versuchs und der dazu zu analysierenden Parameter, stets im Kontext eines technischen Systems unterschiedlicher Komplexität, muss ein entsprechender **Versuchsaufbau gestaltet und realisiert** werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, ob und in welcher Form der prinzipielle Versuchsaufbau oder die Versuchsumgebung das eigentliche Verhalten des Prüfkörpers beeinflussen.

Bei der anschließenden **Durchführung der Versuche** gilt es zunächst sowohl die Funktionalität der Prüfanordnung als auch die Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen, bevor die geplanten Einzelversuche durchgeführt respektive die erforderlichen Daten generiert werden.

Wesentlich bei der **Auswertung** und Ergebnisdarstellung ist die Vollständigkeit der Beschreibung des Prüfkörperverhaltens. Um Informationsverlust aufgrund einer nicht gegebenen Erfassbarkeit von Einflussgrößen vorzubeugen, können subjektive oder semiquantitative Kriterien, beispielsweise eine Klassifizierung, zu deren Bewertung herangezogen werden. Daraus abgeleitet bedingt die ganzheitliche Erfassung des Verhaltens eines Prüfkörpers, vor allem wenn dies als unwägbar und divers wahrgenommen wird, eine physische Anwesenheit beim Prüfbetrieb. (Bader, 2014, S. 60f)

Durch den generischen Charakter der Vorgehensmodelle wird die Frage **Was?** bei einem Versuchsvorhaben zu tun ist schlüssig, nachvollziehbar und durchgängig beantwortet. Die Frage **Wie?** dies erfolgen soll, gemäß einer präskriptiven Beschreibung, steht dazu allerdings, aufgrund der gegebenen Diversifikation von Versuchen als Analysemethode in der Produktentwicklung, im Widerspruch.

Ein weiterer grundsätzlicher Aspekt bei der Durchführung von Versuchen, und somit auch für die Gestaltung eines spezifischen Vorgehensmodells für Prinzipversuche, wird von Smith (2007, S. 87ff) und Thomke (2003, S. 213f) aufgegriffen, der Umgang mit Misserfolg. Der Begriff Misserfolg bezeichnet dabei ein unerwartetes Untersuchungsergebnis und ist somit von Misserfolg im Sinne eines schlecht geplanten bzw. ausgeführten Versuchs abzugrenzen.

Hohe Lerneffekte sind demzufolge nur möglich, wenn das tatsächliche Versuchsergebnis nicht mit dem erwarteten übereinstimmt, was jedoch nicht der typischen Zielsetzung von Versuchen, als Methode zur Überprüfung abgeschlossener Entwicklungen, entspricht. (Smith, 2007, S. 87ff)

Im Unterschied zum klassischen Einsatz von Versuchen zur reinen Verifizierung, typischerweise am Ende des Entwicklungsvorhabens, soll durch den methodischen Einsatz von Prinzipversuchen, als ausgewiesene Methode der Eigenschaftsfrüherkennung (Kapitel 3, S. 35), die Systemkenntnis in frühen Entwicklungsphasen erhöht werden. Dementsprechend spiegelt die Nicht-Übereinstimmung von tatsächlichem und erwartetem Versuchsergebnis bei Prinzipversuchen ein realistisches Szenario wider.

Diese Perspektive und die prinzipielle Unterscheidung zwischen Misserfolg als klassischem Fehler und einem unerwarteten, jedoch charakterisierbaren, Versuchsergebnis sind entscheidend für die Interpretation und Beurteilung eines Prinzipversuchs.

5 Prinzipversuche als Komplettierung des virtuellen Methodeneinsatzes in frühen Phasen der Produktentwicklung

Die Zielsetzung Systemeigenschaften in frühen Entwicklungsphasen, möglichst effizient und mit geringem Ressourceneinsatz, zu beschreiben und abzusichern bedingt vielfach den Einsatz virtueller Methoden. Allerdings ist der Einsatz analytischer und numerischer Verfahren nicht immer möglich bzw. an entsprechende Voraussetzungen gebunden.

Die phänomenologische Beschreibung mit Abgleich und Bedatung durch virtuelle Methoden ist oftmals hinreichend und zielführend, wobei hierfür die physikalische Abbildung von Einzeleffekten nicht erforderlich ist. Hingegen ist die Beschreibung lokaler Effekte oftmals schwer bzw. nicht möglich und somit auch nicht das Gesamtsystemverhalten.

Der Fokus einer methodischen Implementation von Prinzipversuchen liegt in der Komplettierung des virtuellen Methodeneinsatzes durch abstrahierte empirische Analysen eben solcher Effekte.

Nachfolgend werden, ausgehend vom Front-Loading Ansatz als entwicklungsmethodischer Basis zur Handhabung und Aufwertung der frühen Phasen, potentielle Zielsetzungen und Kriterien für die Zweckmäßigkeit von Prinzipversuchen, als Ergänzung virtueller Methoden, aufgezeigt und diskutiert.

5.1 Front-Loading als entwicklungsmethodische Basis

Der angestrebten frühen bzw. ehestmöglichen Bereitstellung von Wissen über Produkteigenschaften wird entwicklungsmethodisch durch die Strategie des sogenannten Front-Loading Rechnung getragen. Gegenstand des Front-Loading ist die Vorverlagerung von Ressourcen und ergebniskritischen Teilprozessen in frühe Entwicklungsphasen. (Thomke/Fujimoto, 2000, S. 128ff; Eigner/Stelzer, 2009, S. 41)

Die Vorverlagerung von Eigenschaftsanalysen führt laut Thomke (2003, S. 170f) zu einer früheren Identifikation sowie Auseinandersetzung mit potentiellen Entwicklungsrisiken und in weiterer Folge früheren Problemlösungen, wobei ein solcher Prozess auf drei Arten erreicht werden kann (Abb. 61):

1. Neue Methoden und Analysewerkzeuge erlauben frühere und schnellere Iterationen, wodurch der übliche Problemlösungsverlauf einer Produktentwicklung nach links verschoben werden kann.
2. Erfahrung aus ähnlichen Entwicklungsprojekten reduziert die Anzahl an zu erarbeitenden Lösungen, dies führt zu einer Anhebung des üblichen Verlaufs.
3. Die Möglichkeit unterschiedliche Analysen parallel zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess durchführen zu können kann zu einem grundsätzlich besseren Ergebnis führen.

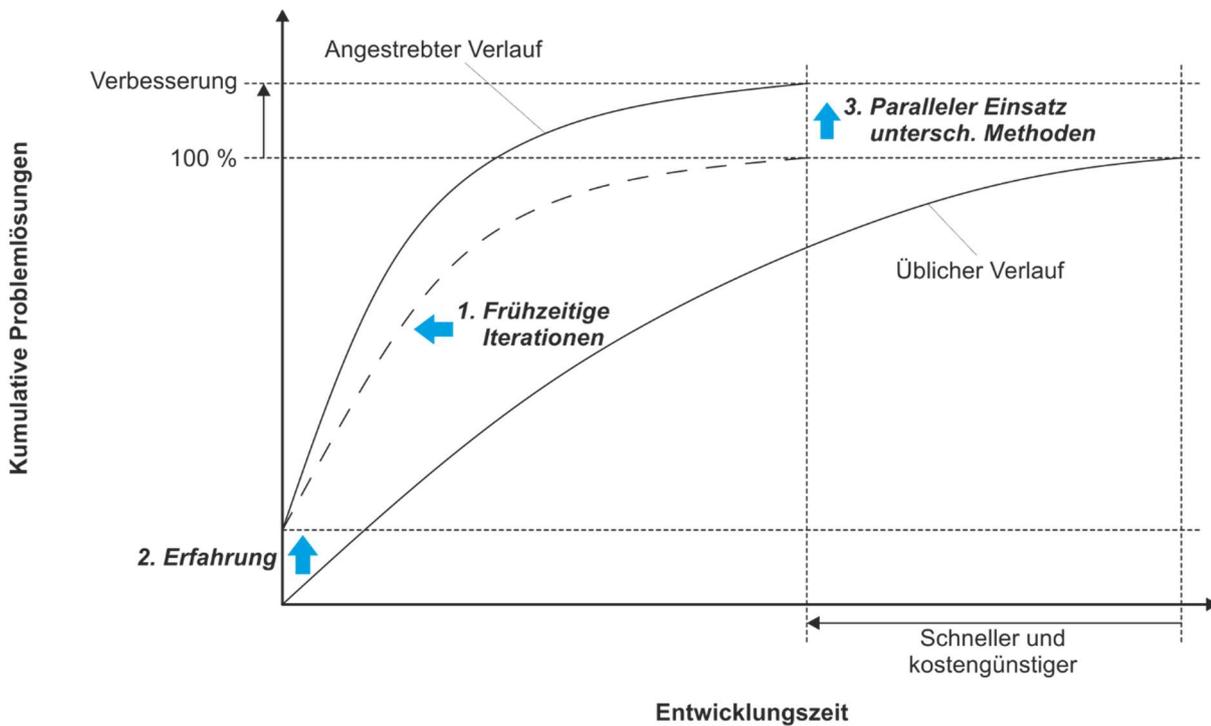


Abbildung 61: Drei Perspektiven zur Implementation von Front-Loading in einem Entwicklungsprozess (vgl. Figure 5-3: Thomke, 2003, S. 171)

Die kombinierte Wirkung der aufgelisteten und in Abbildung 61 veranschaulichten Wege zur Realisierung einer Eigenschaftsfrüherkennung resultiert in einer potentiellen Reduktion von Entwicklungszeit und Aufwand sowie in einer möglichen Verbesserung des Gesamtergebnisses. Die vom Front-Loading Ansatz angestrebte frühe Bereitstellung von (Teil-)Problemlösungen bedingt unweigerlich eine Verlagerung von Entwicklungsressourcen. Abbildung 62 stellt diesen „Ressourcen-Shift“ qualitativ einem konventionellen, und somit sequentiellen, Entwicklungsprozess gegenüber und veranschaulicht das Potential zur Verkürzung der Produktentwicklungs- und Fertigungsimplementationszeit durch Front-Loading.

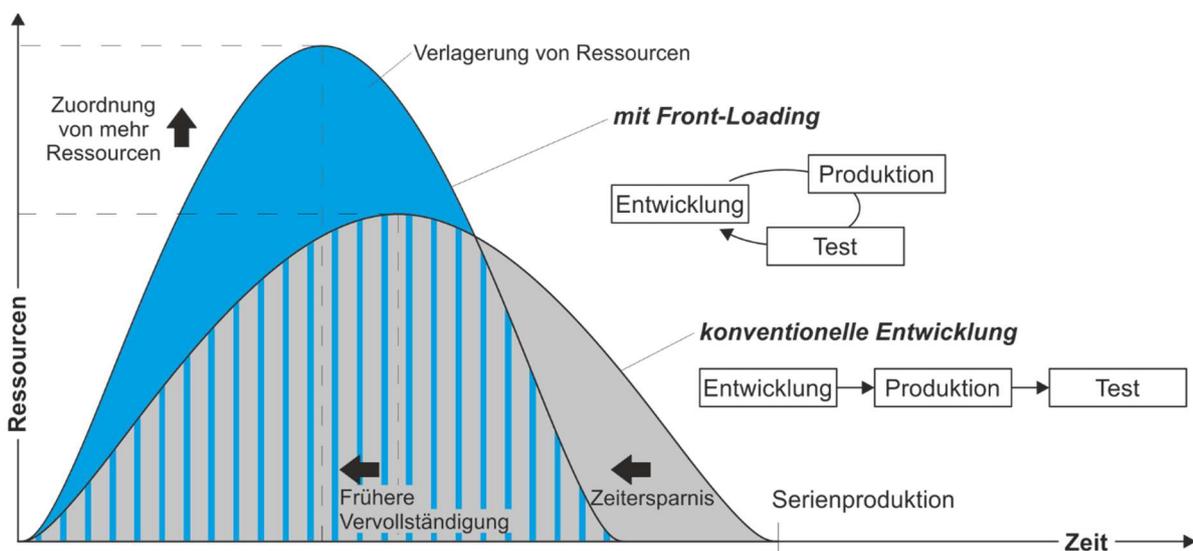


Abbildung 62: Verlagerung von Ressourcen zur Verkürzung der Produktentwicklungs- und Fertigungsimplementationszeit mittels Front-Loading (Ovtcharova/Weidlich, 2003, S. 161ff)

Die Herausforderung in Hinblick auf den Methodeneinsatz in frühen Phasen liegt vor allem im Umgang mit unscharfen und unvollständigen Informationen sowie dem aus diesem geringen Detaillierungslevel resultierendem großen Lösungs- bzw. Änderungsraum. Der aus diesen Randbedingungen hervorgehende Bedarf an frühzeitigen und raschen Iterationen legt den Einsatz virtueller Methoden nahe und spiegelt auch den allgemeinen Trend der industriellen Praxis, mehr Numerik und weniger Empirie, wider.

5.2 Prinzipversuche als zusätzliches Potential

Im Kontext der Beschreibung von Produkteigenschaften haben folgende virtuelle Lösungen respektive Methoden zur numerischen Simulation und Berechnung, vor allem in produzierenden bzw. produktionsnahen Unternehmen, die größte Bedeutung (Eigner/Stelzer, 2009, S. 51ff):

- **Ablauf- und Funktionssimulation:** Abbildung und Optimierung komplexer Produkte hinsichtlich der Bewegungsabläufe
- **Finite Elemente Methode (FEM):** Analysen im Bereich der Strukturmechanik (Berechnungen von Verformungen, Kräften, inneren Spannungen in Festkörpern) und darüber hinaus Analysen thermischer, rheologischer oder strömungsmechanischer Prozesse
- **Mehrkörpersimulation (MKS):** Kinetik-Analysen von Systemen durch deren Abbildung mittels starrer Körper (reale Körper werden auf Massen, Trägheitseigenschaften und geometrische Abmessungen reduziert)
- **Computational Fluid Dynamics (CFD):** Beschreibung von Strömungsverhalten mittels spezifischer numerischer Methoden (z.B. Finite Elemente Methode, Finite Volumen Methode, Finite Differenzen Methode)
- **Noise Vibration Harshness (NVH):** Simulation und Berechnung von Geräuschen, Schwingungen und Steifigkeiten durch den Einsatz von Elementmethoden (z.B. Finite Elemente Methode) oder Methoden welche auf Energieformulierungen beruhen (z.B. Statistische Energie Analyse)

Diese numerischen Simulationsmethoden werden auch unter dem Begriff Computer Aided Engineering (CAE) zusammengefasst.

Für eine Vielzahl technischer Problemstellungen ist der Einsatz von CAE-Methoden etabliert. Allerdings gibt es physikalische Effekte und Zusammenhänge deren numerische Beschreibung nach wie vor eine große Herausforderung darstellt (Kapitel 5.3.2, S. 80ff). Eine weitere Problemstellung repräsentiert die Kombination virtueller Methoden. Derzeitige Ansätze bedienen sich entsprechender Integrationsplattformen, um Systeme bzw. deren Komplexität ganzheitlich abbilden zu können und somit eine Verbindung der Entwicklungsdomänen zu generieren.

Die Vorteile virtueller Methoden liegen vor allem in der Wiederverwendbarkeit sowie Variabilität der zugrundeliegenden Modelle und dem daraus resultierenden Potential Analysen und somit auch etwaige erforderliche Iterationen tatsächlich früher als bei einem konventionellen Entwicklungsprozess bereitstellen zu können.

Allerdings ist der ausschließliche Einsatz virtueller Methoden nicht kategorisch anzustreben. Unter entsprechenden Gegebenheiten ist deren Anwendung nicht zweckmäßig bzw. möglich (Kapitel 5.3.1, S. 79f) oder bedarf zusätzliche respektive ergänzende Aktivitäten.

Speziell in frühen Phasen der Produktentwicklung ist es wichtig Aussagen über Sensitivitäten, Tendenzen und rudimentäre Abhängigkeiten treffen zu können, um darauf aufbauend einen zielgerichteten Detaillierungsprozess aufsetzen zu können. Neben analytischen und numerischen Verfahren zur Eigenschaftsanalyse können auch in diesem Stadium, potentielle Prüfkörper (Komponenten, Bauteile, Module) gilt es in der Regel erst zu definieren, empirische Analysen in Form von Prinzipversuchen durchgeführt werden. Deren spezifische Charakteristika und Unterschiede zu „klassischen“ Versuchen (Kapitel 3.1, S. 40) erfordern jedoch eine individualisierte Vorgehensweise.

Die Zielsetzungen von Prinzipversuchen können dabei differenzierende und vielschichtige Ausprägungen annehmen:

- **Analyse von Sensitivitäten und Interdependenzen:** Die Identifikation und quantitative Beschreibung von Sensitivitäten und Interdependenzen spezifischer Systemparameter dient vor allem der Schaffung einer Basis für eine weiterführende Modellbildung. Die Intention liegt hierbei in einem möglichst frühzeitigen Erkennen signifikanter und eventuell kritischer Abhängigkeiten, um diese im weiteren Entwicklungsprozess entsprechend berücksichtigen zu können.
- **Bedutung virtueller Modelle:** Ein bestimmender Faktor der Ergebnisgüte numerischer Simulationen ist die Qualität der zugrunde gelegten Randbedingungen. Die Bedutung virtueller Modelle kann hierbei, im Bedarfsfall, durch elementare empirische Untersuchungen (Prinzipversuche), beispielsweise durch Ermittlung von Stützstellen oder die Beschreibung spezifischen Materialverhaltens, unterstützt werden.
- **Verifikation und Optimierung virtueller Modelle:** Am Ende jedes Entwicklungsprozesses gilt es das entstandene Produkt hinsichtlich dessen Anforderungserfüllung zu verifizieren. Dieser fundamentale Anspruch, Resultate einer Verifikation auf Gültigkeit zu unterziehen, sollte prinzipiell bei jedem Methodeneinsatz bestehen. Vor allem bei der Simulation numerisch schwer beschreibbarer physikalischer Effekte (Kapitel 5.3.2, S. 82) kann dieser Prozess durch Prinzipversuche, als abstrahierte empirische Plausibilitätsüberprüfung, unterstützt und das betreffende Modell unter Umständen optimiert werden.
- **„Erlebbarkeit“ spezifischer physikalischer Effekte:** Das „Erleben“, im Sinne von Eindrücken und Erfahrungen, spezifischer Systemeigenschaften bzw. Effekte kann nur eingeschränkt virtuell abgebildet werden. Der bewusste Umgang mit Sinneswahrnehmungen und implizitem Wissen kann ein zusätzliches Potential repräsentieren, um über quantifizierte technische Anforderungen und Bewertungskriterien hinaus den produktnutzerseitigen Qualitätsanspruch bestmöglich erfüllen zu können (Bader/Lang, 2015, S. 324ff).

Der Einsatz von Prinzipversuchen kann dazu beitragen Funktionen, Teilaspekte sowie Strukturen und Abhängigkeiten einer Entwicklung, in frühen Phasen, synthetisch in Form eines analytischen oder numerischen Modells zu beschreiben.

Diese empirisch unterstützte Vorgehensweise („**Hybrider Methodeneinsatz**“) dient vor allem dem Erkennen von bzw. Umgang mit kritischem, nicht hinreichend beschreibbarem oder unbekanntem Systemverhalten. Prinzipversuche können demzufolge sogar als immanente Methode der virtuellen Produktentwicklung interpretiert werden.

5.3 Indikatoren für die Zweckmäßigkeit von Prinzipversuchen

Abstrahiert man den Einsatz bzw. die Anwendung von Entwicklungsmethoden, so impliziert dieser eine Synthese aus Ansatz, Werkzeug, Objekt (Modell, Prüfkörper, System, etc.), Umgebung, Vorgehensweise und Kompetenz. Dementsprechend müssen Methoden prinzipiell geeignet sein den identifizierten Informationsbedarf abdecken zu können, für das Unternehmen verfügbar sein (Software-Lizenzen, Prüfstände, Messtechnik, etc.) und für die Methoden-anwendung erforderliche Rahmenbedingungen müssen erfüllt werden. Weitere essentielle Aspekte stellen anwendungsspezifisches Knowhow und Erfahrung hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse dar.

Nachfolgend werden systematisch-organisatorische Situationen und Szenarien sowie mögliche technisch-physikalische Problemstellungen aufgezeigt, die grundsätzlich den Einsatz empirischer Analysen nahelegen und somit auch als Indikatoren für die Zweckmäßigkeit von Prinzipversuchen angesehen werden können.

5.3.1 Systematisch-organisatorische Indikatoren

Der Einsatz virtueller Analysemethoden in frühen Entwicklungsphasen, entsprechend eines konsequenten Front-Loading Ansatzes, ist stets an Voraussetzungen gebunden. Durch die Kombination virtueller Methoden mit Prinzipversuchen ist es unter Umständen möglich die **Grenzen des virtuellen Methodeneinsatzes** teilweise zu verschieben.

Derzeitige limitierende Aspekte des virtuellen Methodeneinsatzes repräsentieren beispielsweise (Seiffert/Rainer Hrsg., 2008, S. 28f):

- **Unzureichende Simulationsmethoden** (unzureichend validiert oder numerisch instabil): Das darzustellende Phänomen ist modelltechnisch nicht beschreibbar und damit virtuell nicht abbildbar.
- **Unbekannte Phänomene**: Sind technische Zusammenhänge physikalisch in ihrer Wirkungskette nicht klar, können entsprechende Modelle nicht erzeugt und validiert werden.
- **Unzureichende Datenqualität / Datenverfügbarkeit** im Produktprozess: Die Datenqualität wächst kontinuierlich im Produktentstehungsprozess durch den direkten Abgleich mit Hardwareversuchen. Liegen in der frühen Entwicklungsphase nur unzureichend hoch qualitative Daten vor, schmilzt der virtuelle Entwicklungsvorteil gegenüber der Hardware.
- **Nicht wettbewerbsfähiger Simulationsaufwand**: Ist der Aufwand für Modellierung, Bedatung, Simulation und Bewertung im direkten Vergleich zum Versuchsaufwand zu hoch, greift man zu konventionellen Methoden.

- **Unterbrochene Prozessketten:** Einzelne Simulationsmethoden, meist zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess verankert, decken die Fragestellung nicht oder nur ungenügend ab. Erforderliche Daten, die als Ergebnis einer Simulation als Eingangsgröße für eine darauffolgende Methode verwendet werden sollten, liegen nicht vor, da die gesamte Prozesskette nicht geschlossen ist.

Der besondere Bedarf an anwendungsspezifischem Knowhow und Erfahrung hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse von virtuellen Methoden kann einen weiteren systematisch-organisatorischen Indikator für den Einsatz empirischer Untersuchungen darstellen. Numerische Simulationen führen, die formale Richtigkeit vorausgesetzt, immer zu einer Lösung. Bei deren Anwendung bestehen jedoch potentielle Fehlerquellen, wie unkorrekte Randbedingungen oder unzulässige Vereinfachungen in der Modellbildung, welche die Qualität des Ergebnisses negativ beeinflussen (Klein, 2015, S. 8f). Darüber hinaus ist die Nachvollziehbarkeit der zugrundeliegenden Lösungsalgorithmen, im Speziellen bei kommerziellen Software-Lösungen, vielfach nicht gegeben. Ob das Berechnungsergebnis tatsächlich das reale Systemverhalten widerspiegelt, muss letztlich durch ingenieurmäßigen Sachverstand überprüft werden.

Gerade die vorgeschaltete Analyse unbekannter Systemzusammenhänge und deren Sensitivitäten auf Basis von Prinzipversuchen sowie eine etwaige empirisch gestützte Bedatung und Verifikation numerischer Simulationen bietet das Potential einen zielführenden und effizienten Methodenmix für frühe Phasen bereitzustellen respektive den Einsatz virtueller Methoden erst zu ermöglichen.

Neben diesen, als systematisch-organisatorische Indikatoren bezeichneten, globalen Aspekten gibt es nach wie vor numerisch schwer beschreibbare physikalische Effekte, im Sinne von Bauteil- bzw. Systemspezifika, welche empirischen Untersuchungen typischerweise einfacher zugänglich sind als einer analytischen Berechnung bzw. numerischen Simulation.

5.3.2 Technisch-physikalische Indikatoren

Betrachtet man den prinzipiellen Ablauf einer virtuellen Bauteil- bzw. Systemanalyse, wie er beispielsweise in der Automobilentwicklung eingesetzt wird, so ergibt sich folgende Methodenkette (Abb. 63).

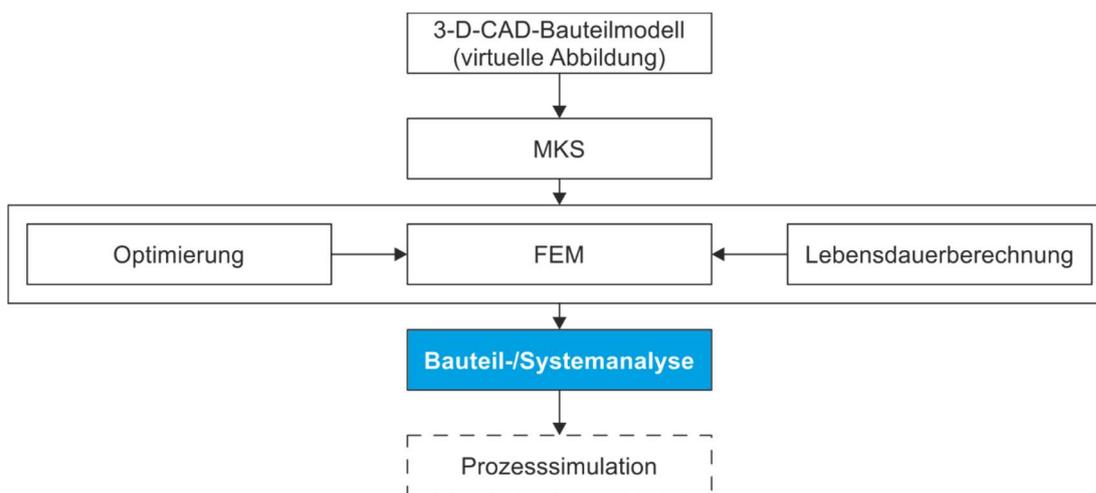


Abbildung 63: Methodenkette einer virtuellen Systemanalyse (vgl. Abb. 2.4: Klein, 2015, S. 17)

In fortgeschrittenen Entwicklungsstadien kann, entsprechend einer ganzheitlichen virtuellen Systembetrachtung, die Bauteil- bzw. Systemanalyse durch eine Prozessanalyse, in der Fertigungsabläufe und -verfahren abgebildet sind, ergänzt werden. Die Basis der virtuellen Analysen repräsentiert dabei stets eine numerische Modellbildung.

Die Modellerstellung erfordert dabei eine Vielzahl von Festlegungen, die letztlich die Qualität des Modells und somit jene der Analyse bestimmen. Die zur Erstellung eines FEM-Modells, als repräsentatives Beispiel aufgrund des Status eines zentralen Elements vieler virtueller Analyseprozesse in der Produktentwicklung (Tab. 2), notwendigen Definitionen ergeben sich wie folgt (Fröhlich, 1995, S. 35):

- **Vereinfachte Geometrie** („Träger“ der Knoten und Elemente): Linien-, Flächen- oder Volumenmodell
- **Idealisierte Auflagerbedingungen** (vorgegebene Verschiebungen): Loslager, Festlager, Einspannung (max. 6 Freiheitsgrade)
- **Idealisierte Lasten**: Kraft, Moment, Streckenlast, Druck, Temperatur, Beschleunigung
- **Elementtypen**: Stab, Balken, Scheibe, Platte, Schale, Volumen, Sonderelemente
- **Elementdaten**: Querschnitt, Trägheitsmomente, Dicke, Vorspannungen, etc.
- **Elementgröße (FE-Netz) und -verteilung**: Knoten- und Elementpositionen (Netzfeinheit), Elementvorzugsform
- **Werkstoffeigenschaften**: Elastizitätsmodul, Querkontraktion, Dichte, nichtlineare Materialgesetze, Wärmeausdehnung, Dämpfung, etc.

Die erfolgreiche Anwendung einer FEM bedingt somit die charakteristische Definition von Rand- und Übergangsbedingungen, Materialkenngrößen, Elementwahl und numerischer Approximation der physikalischen Struktur sowie des Analyseverfahrens mit allen Optionen. (Silber/Steinwender, 2005, S. 230)

Anwendungsbereich	Exemplarische Beispiele
lineare Elastostatik	Hooke'sches Materialverhalten ($\sigma = E \cdot \epsilon$)
nichtlineare Elastostatik	nichtlineares Materialverhalten (Plastizität); geometrisch nichtlineare Probleme; impulsartige große Verformungen (Crash); Umformprozesse
lineare Elastodynamik	Eigenschwingungen; freie und erzwungene Schwingungen; zufallserregte Schwingungen
nichtlineare Elastodynamik	zeit- und verschiebungsabhängige Kräfte; Stabilität, Kreiselbewegung
Starrkörperdynamik	MKS
Elastohydrodynamik	Schmierfilm
Ermüdungsfestigkeit	Schädigung, Lebensdauer, Rissbruch
Aeroelastizität	elastisches Strukturverhalten unter Anströmung
Wärmeübertragung	stationäre und instationäre Wärmeleitung
Thermoelastizität	mechanische Beanspruchung unter hohen Temperaturen
Flüssigkeitsströmungen	Sickerströmung, Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturfelder
Elektrotechnik	elektrisches Strömungsfeld, Magnet- und Wellenfelder
Akustik	Schalldruckverteilung, Druckstöße
Gießtechnologie	Spritz- und Druckgießen, Schwerkraftgießen
Multiphysik	gekoppelte Strömung, Temperatur mit Elastik

Tabelle 2: Methodenstammbaum der FEM (vgl. Abb. 2.1: Klein, 2015, S. 14)

Vor allem die bereits angeführte empirisch gestützte Bedatung (Kapitel 5.3.1, S. 80) des numerischen Modells stellt hierbei ein potentielles Anwendungsgebiet für den effizienten Einsatz von Prinzipversuchen dar.

In diesem Kontext stellt die Grenze zu nichtlinearen Aufgabenstellungen einen relevanten Aspekt hinsichtlich Empirie bzw. versuchstechnische Unterstützung erfordernder Grundprinzipien dar. Die numerische Behandlung nichtlinearer Problemstellungen hat in vielen Fällen noch nicht den Status von Standardberechnungen erreicht, respektive hängt diese im besonderen Maße von repräsentativen Eingabekriterien ab (Wriggers, 2008, S. 3; Rust, 2011, S. V).

Dieser Umstand legitimiert es numerisch schwer beschreibbare Effekte bzw. Grundprinzipien, welche nicht zufriedenstellend linear analysiert werden können, als physikalisch-technische Indikatoren für den zweckmäßigen Einsatz von Empirie, in Kombination mit bzw. als Alternative von virtuellen Analysen, zu interpretieren.

Die folgende Auflistung stellt eine Reihe technisch relevanter Nichtlinearitäten, auf Basis einer in einschlägiger Literatur üblichen Klassifizierung, dar (Fröhlich, 1995; Klein, 2015; Rust, 2011; Wriggers, 2008):

- **Geometrische Nichtlinearität** (Kennzeichen sind große Verschiebungen und Verdrehungen bei kleinen Verzerrungen. Treten große Verschiebungen, Verdrehungen und Verzerrungen auf so spricht man üblicherweise von großen Deformationen):
 - Große Verformungen (z.B. Bauteile aus Gummi, Federn)
 - Verformungsabhängige Lastrichtung
 - Stabilitätsprobleme (neben den geometrischen Stabilitätsproblemen Knicken, Kippen und Beulen existieren auch Materialinstabilitäten wie z.B. Einschnürungen von Proben oder die Bildung von Scherbändern in Metallen)
- **Werkstoff-Nichtlinearität** (Kennzeichen ist ein nicht proportionaler Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen):
 - Nichtlineares elastisches Verhalten (z.B. Gummi)
 - Elastoplastisches Verhalten (z.B. Stahl, Beton, Erdmaterialien)
 - Viskoelastisches und viskoplastisches Materialverhalten (Zeitabhängigkeit der Deformationen und Spannungen, z.B. Kriechen, Temperaturabhängigkeit von Polymeren)
 - Richtungsabhängiges Verhalten anisotroper Werkstoffe (unterschiedliche Dehnung in verschiedenen Richtungen, z.B. bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen)
 - Rissausbreitung (Lebensdauerberechnung)
- **Kontakt-Nichtlinearität** (Kennzeichen ist die Möglichkeit eines Körperkontaktes infolge Pressung):
 - Reibung/Verschleiß
 - Rollkontaktprobleme (z.B. Rad-Schiene oder Reifen-Straße)
 - Spiel (z.B. Kuppelvorgänge, Schwingungen)
 - Anschläge
 - Stoßvorgänge

Die angeführten Nichtlinearitäten bzw. demzufolge technisch-physikalischen Indikatoren könnten zweifelsohne durch eine Vielzahl weiterer nichtlinearer Aufgabenstellungen erweitert werden.

Exemplarische Beispiele Bezug nehmender realisierter empirischer Untersuchungen sind in der am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik verfassten Habilitationsschrift von Bader (2014, S. 56f) angeführt.

5.4 Reflexion

Parallel zur Weiterentwicklung und kontinuierlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit sowie der Einsatzmöglichkeiten virtueller Analysemethoden etablierte sich Front-Loading als entwicklungsmethodischer Ansatz, um das Potential einer Fokussierung auf frühe Entwicklungsphasen realisieren zu können. Die dabei angestrebte frühzeitige Generierung von Wissen über Systemeigenschaften legt den Einsatz virtueller Analysemethoden nahe bzw. bedingt diesen in vielen Fällen.

Das Potential virtueller Methoden liegt vor allem in der **Wiederverwendbarkeit der zugrundeliegenden Module** und der **Variabilität der Modelle**, wodurch Variationen und Iterationen aufwandsarm und ohne Risiko durchgeführt werden können. Demzufolge ist der Trend die Anzahl physikalischer Prototypen bzw. empirischer Versuche im Allgemeinen zu reduzieren nicht die eigentliche Zielsetzung, sondern die logische Konsequenz. Allerdings ist die rein virtuelle Analyse technischer Problemstellungen nicht immer möglich respektive zweckmäßig. Einerseits ist die numerische Simulation an grundsätzliche Voraussetzungen bzw. Limitationen gebunden, beispielsweise hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Berechnungen, und andererseits erfordert diese ein besonderes Maß an methodenspezifischem Knowhow. Im besonderen Maße gilt dies, wenn keine ausreichende Wissensbasis vorliegt.

Eine prinzipielle Herausforderung, unabhängig vom Typ der Analysemethode, repräsentiert der mit frühen Entwicklungsphasen, in Abhängigkeit der Aufgabenstellung, einhergehende Umgang mit unvollständigen Informationen. Daneben führt der allgemeine Trend von kontinuierlich steigenden Produktanforderungen, hervorgerufen durch das Potential neuer Technologien und den globalen Wettbewerb, zu komplexeren Produktstrukturen und somit einen Bedarf an interdisziplinären, domänenübergreifenden Entwicklungsprozessen und -methoden.

Aufgrund dieser Gegebenheiten sollte keine strategische Entscheidung Numerik oder Empirie getroffen werden, sondern vielmehr eine technisch sinnvolle und unternehmerisch wirtschaftliche Ergänzung beider Methoden angestrebt werden, im Sinne der Formulierung von Seifert/Rainer (Hrsg., 2008, S. 29): „Das Beste aus zwei Welten“.

Diese Intentionen können durch den methodischen Einsatz von empirischen Untersuchungen, selbst in frühen Phasen der Produktentwicklung, in Form von Prinzipversuchen unterstützt werden. Dabei soll der Aufwand physikalischer Analysen durch das methodenimmanente abstrahierte und reduzierte Prüfsystem möglichst gering gehalten werden, was allerdings eine abweichende Vorgehensweise im Vergleich zu „klassischen“ Versuchen (Kapitel 3.1, S. 40) erfordert.

6 Praktische Aspekte zur Durchführung von Prinzipversuchen

Basis praxisrelevanter Aspekte zur Durchführung von Prinzipversuchen bilden Erfahrungen und Lerneffekte aus ausgewählten Versuchsvorhaben, welche als Teil von Forschungs- und Industrieprojekten am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik realisiert wurden.

Die dabei gewonnenen spezifischen Erkenntnisse gilt es bei der Definition eines Vorgehensschemas zur methodischen Durchführung von Prinzipversuchen, im Sinne deduktiver Schlussfolgerungen, zu implementieren (Kapitel 7, S. 111ff).

Dazu werden, in Abhängigkeit der jeweiligen Gesamtaufgabenstellung, durchgeführte Prinzipversuche retrospektiv analysiert. Mit dem Ziel eine durchgängige Nachvollziehbarkeit sowie eine strukturierte Dokumentation sicherzustellen, beinhalten die entsprechenden Analyseprozesse die Bearbeitung und Aufbereitung folgender Punkte:

- Beschreibung des übergeordneten Entwicklungsvorhabens
- Darstellung des spezifischen Teilproblems respektive der fehlenden Information, gemäß einer Zieldefinition des Methodeneinsatzes
- Auswahlprozess der Methode Versuch
- Versuchsaufbau und Durchführung
- Fazit und Erkenntnisse über die Methode aus deren Anwendung

Um ein hohes Maß an Diversität zu gewährleisten wurde bei deren Auswahl versucht ein breites Branchenspektrum abzudecken:

- Lebensmittelindustrie
- Anlagenbau bzw. Verfahrenstechnik
- Maschinenbau (Automotive)

Die nachfolgenden Ausführungen repräsentieren die Ergebnisse der retrospektiven Versuchsanalysen in Abhängigkeit der jeweiligen Gesamtaufgabenstellung.

6.1 Prinzipversuch zur Bruchkraftermittlung von Kürbiskernen

Im Rahmen einer von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft unterstützten Diplomarbeit für ein regionales Unternehmen sollte eine, im Vergleich zu am Markt verfügbaren Produkten verbesserte, Schneidmühle für Kürbiskerne bzw. alternative landwirtschaftliche Güter entwickelt werden. Der Fokus lag dabei auf der technischen Optimierung des maschinellen Zerkleinerungsprozesses. Die Basis hierfür sollten experimentelle Parameterstudien, als Ursache-Wirkungs-Analysen, an zwei vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Schneidmühlen-Prototypen bilden.

Um den Zerkleinerungsprozess von Kürbiskernen sowie deren Stoffverhalten zu verstehen und beurteilen zu können, wurden zunächst eine theoretische Analyse von Zerkleinerungsprozessen disperser Materie und eine Evaluierung bestehender, den zur Verfügung gestellten Prototypen ähnlicher, Kürbiskernmühlenkonzepte durchgeführt.

Die theoretische Bearbeitung der Themenstellung verdeutlichte die grundsätzliche Erfordernis von Kenntnissen über die zerkleinerungstechnischen Stoffeigenschaften, um einen Prozess beurteilen, vorausberechnen oder optimieren zu können. Im Kontext Zerkleinerung gliedert Schönert (1977, S. I-26ff) diese spezifischen Stoffdaten in folgende Gruppen:

- Kennwerte für den Widerstand gegen die Zerstörung der Partikel (Festigkeit, flächenbezogene Reaktionskraft, volumen- oder massenbezogene Zerkleinerungsarbeit, assoziierte Energie, Bruchwahrscheinlichkeit, Bruchanteil)
- Kennwerte für das Ergebnis einer Beanspruchung (Verteilungsfunktion der Bruchstücke, erzeugte Oberfläche, Aufschlussgrad, Agglomerationsgrad)
- Kennwerte als Kombination der anderen beiden Gruppen (Energieausnutzung, Mahlbarkeit, Zerkleinerungswiderstand)

Die Verfügbarkeit von Stoffdaten über Kürbiskerne beschränkte sich auf allgemeine Daten wie durchschnittliche Dichte, Geometrie und Gewicht. Diese Erkenntnis war ausschlaggebend für die Entscheidung einen Prinzipversuch zur Ermittlung der Biegebruchspannung von Kürbiskernen aufzubauen. (Danzl, 2010, S. 23)

Der Versuch wurde als 3-Punkt-Biegeversuch ausgeführt, wobei die Kraft über ein vertikal geführtes Cutter-Messer auf die Kürbiskerne eingeleitet und mittels eines Kraftsensors detektiert wurde (Abb. 64).

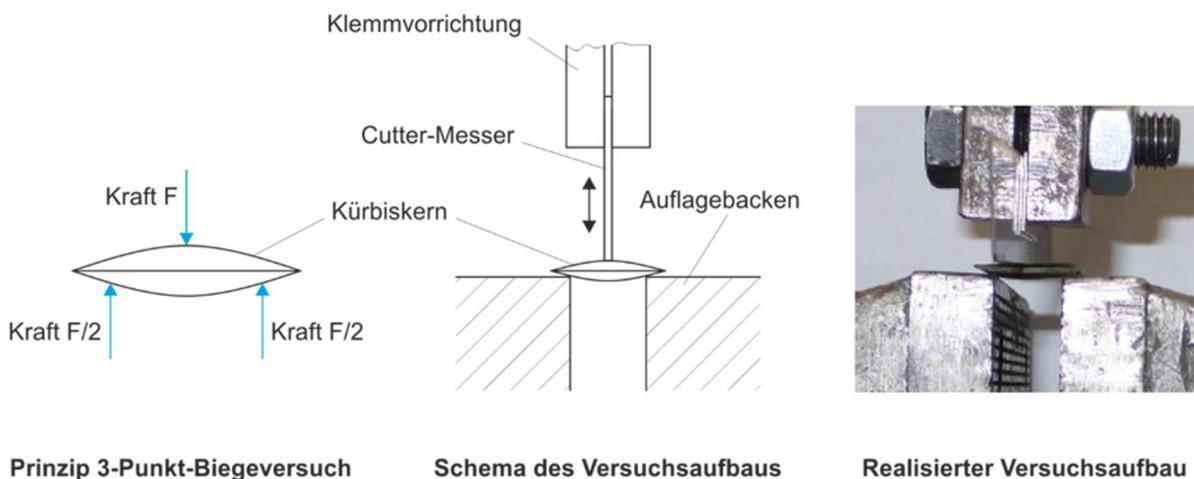


Abbildung 64: Prinzip und Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs zur Ermittlung der Biegebruchspannung von Kürbiskernen

Um auch tatsächlich einen Bruch- und keinen Schneidvorgang versuchstechnisch abzubilden, wurde das eingesetzte Cutter-Messer mit der stumpfen Seite zum Kürbiskern eingespannt.

Die Durchführung und Auswertung der Versuche verdeutlichte eine Abhängigkeit der Bruchkraft mit der Korndicke, allerdings nicht quadratisch, entsprechend einem höheren Biegemomentsmoment, sondern mit einem ausgeprägten Bruchkraftmaximum.

Eine detailliertere Darstellung des Versuchsaufbaus und der Ergebnisse ist in Danzl (2010, S. 23ff) zu finden.

Analysiert man den Prozess der Versuchsabwicklung von der Gestaltung bis zur Auswertung, so spiegelt dieser eine strukturierte und logische Vorgehensweise wider.

Allerdings, und aus diesem Grund auch ein wichtiger Aspekt und Input für diese Arbeit, wurde keine Validierung, im Sinne einer Überprüfung hinsichtlich Verwertbarkeit der generierten Informationen, der Versuchsergebnisse durchgeführt.

Diesem Umstand geschuldet konnten die Resultate der experimentellen Analyse des Bruchverhaltens von Kürbiskernen nicht repräsentativ auf den maschinellen Prozess der beiden Prototypen übertragen werden, da die jeweilige Zerkleinerung der Kerne durch unterschiedliche Beanspruchungsarten erfolgte bzw. der Prinzipversuch nicht jene der Prototypen abbildete.

Die Beanspruchungsart beeinflusst bei Zerkleinerungsprozessen den erforderlichen Energieaufwand respektive die Mahlbarkeit, die gewünschte Korngrößenverteilung sowie den Materialverschleiß an den Mahlfächen. (Müller, 2014, S. 177f)

Bei den Prototyp-Kürbiskernmühlen handelte es sich, nach dem Funktionsprinzip, um sogenannte Prallmühlen und dementsprechend erfolgte die Zerkleinerung des Mahlgutes durch Prallbeanspruchung.

Aufgrund der divergierenden Beanspruchungsart zwischen Versuch und Prototypen wurden weder die Einzelkornuntersuchungen weiter verfolgt, noch nahmen die gewonnenen Erkenntnisse Einfluss auf den weiteren Entwicklungs- bzw. Optimierungsprozess, welcher ausschließlich basierend auf Prototypuntersuchungen fortgesetzt wurde.

Die retrospektive Analyse der experimentellen Biegebruchkraftermittlung von Kürbiskernen zeigt somit ein praxisrelevantes Fehlerpotential bei der Gestaltung von Prinzipversuchen auf.

Die Charakteristik von Prinzipversuche, reale Abläufe auf isolierte physikalische Prinzipien bzw. Effekte zu reduzieren, bedingt eine Ähnlichkeitsbetrachtung, ob durch den abstrahierten Versuch auch dieselben Effekte des komplexen realen Systems abgebildet werden.

Sofern dies gegeben ist, können durch den Einsatz von Prinzipversuchen die Systemkenntnis und somit die Produktreife, entsprechend eines Front-Loading-Ansatzes (Kapitel 5.1, S. 75ff), erhöht werden. Ist dies allerdings nicht der Fall, so resultiert dies in der Generierung von nicht unmittelbar verwertbaren Informationen und in weiterer Folge einem ineffizienten Entwicklungsprozess.

6.2 Prinzipversuche im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Effizienzsteigerung von Zerkleinerungsmaschinen

Bei der Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen aus Haus-, Gewerbe- und Industriemüll, wie sie beispielsweise in der Zementindustrie Verwendung finden, werden unter anderem mechanische Zerkleinerungsmaschinen, sogenannte Schredder, eingesetzt.

Ein möglicher Ansatz zur Effizienzsteigerung dieser Anlagen liegt in einer vorgeschalteten Komprimierung des Schneidgutes. Um dieses Potential industriell verwertbar aufzubereiten wurde eine Machbarkeitsstudie, anhand einer Analyse und Bewertung unterschiedlicher Lösungsalternativen, zur prinzipiellen Umsetzung einer kontinuierlichen Vorverdichtung des zu zerkleinernden Grundmaterials durchgeführt.

Im Sinne einer problemorientierten Vorgehensweise wurde versucht, einen spezifischen analytischen Ansatz für den Verdichtungsprozess, parallel zur lösungsorientierten Ausarbeitung potentieller Varianten, zu generieren. Die grundsätzliche Problematik dieser Aufgabenstellung bestand in der Beschreibbarkeit des Verhaltens von vorgeschreddertem Kunststoffmüll, da weder analytische noch empirische Ansätze bzw. Untersuchungsergebnisse disponibel waren.

Betrachtet man das Schüttgut respektive das Partikelkollektiv als Kontinuum, so weist dieses sowohl Eigenschaften von Newtonschen Fluiden als auch von Hooke'schen Festkörpern auf (Stieß, 2009, S. 451):

- überträgt keine oder nur sehr kleine Zugspannungen
- überträgt ruhend Druck- und Schubspannungen
- fließt unter der Einwirkung von Schubspannungen, wenn sie ausreichend hoch sind (Fließgrenze)
- hat eine vom Spannungszustand abhängige Fließgrenze
- ändert abhängig von Belastung und Bewegung seine Dichte

Zur analytischen Beschreibung des Verdichtungsprozesses und in weiterer Folge Ableitung von Konstruktionsparametern wurde eine Verdichtungskrafthypothese aufgestellt (Pucher, 2013, S. 12ff) bzw. die bekannten Ansätze nach Johanson (Herrmann, 1973, S. 162ff), zur Auslegung einer Walzenpresse, sowie das Rechenmodell von Mittag (1952, S. 38ff) herangezogen. Die Anwendung dieser Berechnungsmodelle bedingt jedoch die Kenntnis von werkstoffspezifischen Kennwerten des Schüttguts. Deren notwendige empirische Ermittlung erfolgte durch den Aufbau und Einsatz mehrerer Prinzipversuche, um jeweils einen isolierten physikalischen Effekt zu untersuchen bzw. beschreiben.

Bei der nachfolgenden Analyse der realisierten Prinzipversuche liegt der Fokus auf die angewandte Art und Weise der Vorgehensweise. Die quantitativen Ergebnisse der Versuche als auch Details zu verwendetem Messequipment sowie zu den Berechnungsmodellen sind in Pucher (2013, S. 17ff) dokumentiert.

6.2.1 Prinzipversuche zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten von vorgeschreddertem Müll

Die versuchstechnische Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten erfolgte im Rahmen der Machbarkeitsanalyse basierend auf zwei divergierenden Ansätzen, einerseits über die messtechnische Erfassung der Reibkraft und andererseits durch empirische Ermittlung des Gleitreibungswinkels.

Bei der Versuchsanordnung zur Bestimmung der Reibkraft wurde eine definierte Menge Schneidgut mittels eines Prüfbehälters über unterschiedliche Oberflächen gezogen und die dazu erforderliche Kraft (entspricht der Reibkraft) mittels Kraftsensor gemessen (Abb. 65). Über das Coulombsche Gleitreibungsgesetz wurde anschließend der Gleitreibungskoeffizient als Funktion von Reib- und Normalkraft ausgewertet.

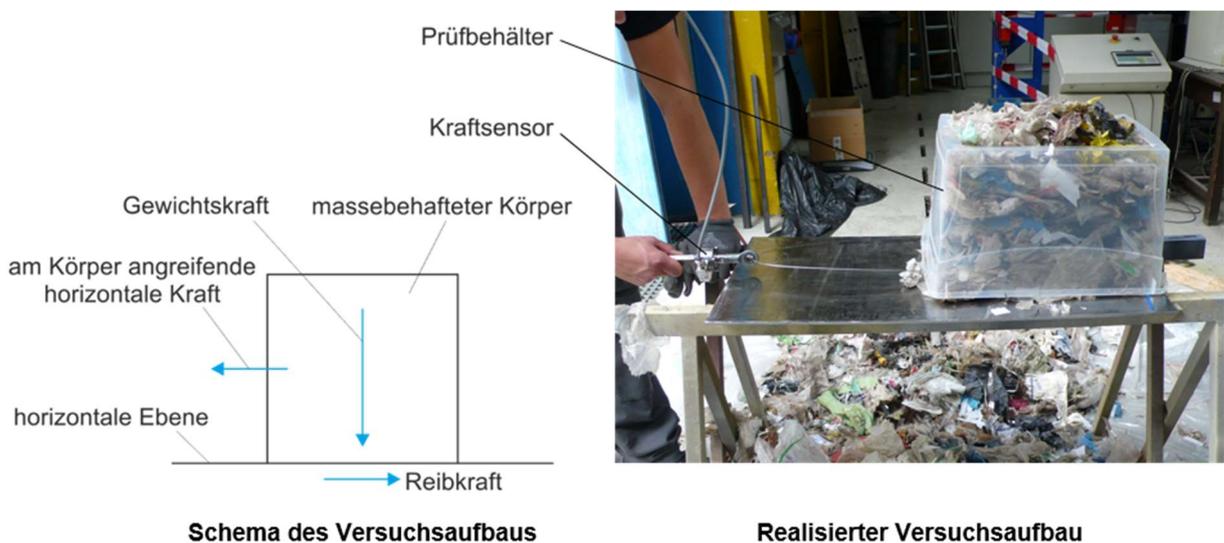


Abbildung 65: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten durch Bestimmung der Reibkraft

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten durch Reibkraftmessung sollte in weiterer Folge auch für Untersuchungen desselben mit höherer Flächenpressung herangezogen werden.

Auf Basis der prinzip-bedingten Einflüsse der Versuchsanordnung auf die Ergebnisse, beispielsweise durch Relativbewegung des Schneidgutes in sich, begründeten sich Überlegungen ein zweites Verfahren zu dessen Verifikation zum Einsatz zu bringen.

Die allgemein einfachste experimentelle Methode zur Bestimmung des Gleitreibungskoeffizienten ist die Messung des Neigungswinkels, bei welchem ein auf einer geneigten Ebene liegender Körper zu gleiten beginnt. Aus dem Kräftegleichgewicht in diesem kritischen Zustand ergibt sich der Gleitreibungskoeffizient als Tangens des Neigungswinkels, unter der näherungsweise Voraussetzung dass der Gleitreibungskoeffizient gleich dem statischen Reibungskoeffizienten ist. (Popov, 2009, S. 133f)

Aufgrund der größeren Reibung zwischen den einzelnen Partikeln des vorgeschredderten Mülls, als zwischen Schneidgut und Stahloberfläche, kam es zu einem Abgleiten des Schüttkegels als Ganzes, wodurch dieses experimentelle Verfahren auch im veranschaulichten Fallbeispiel eingesetzt werden konnte. In Abbildung 66 sind sowohl der schematische, als auch der realisierte Versuchsaufbau dargestellt.

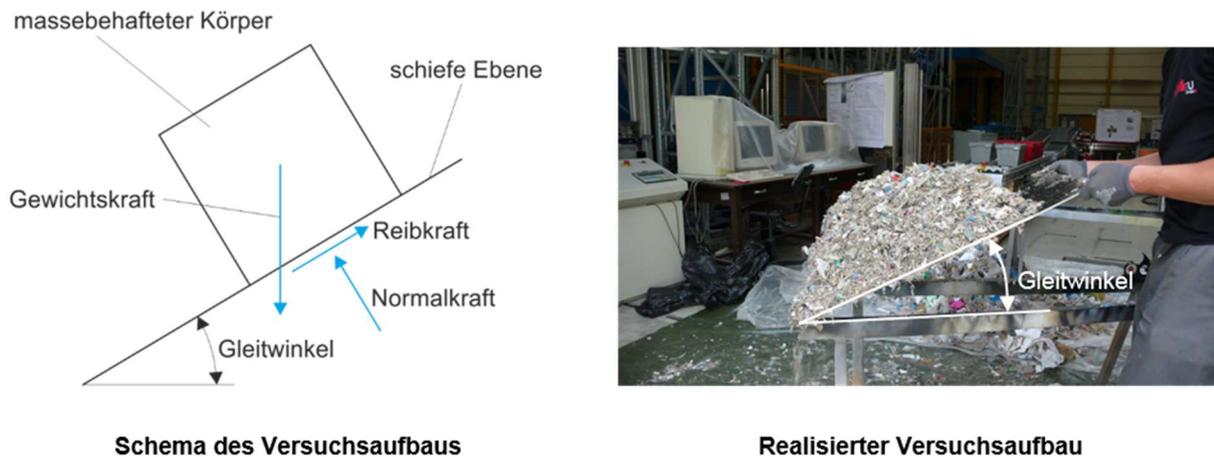


Abbildung 66: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten durch Bestimmung des Gleitwinkels

Die Ergebnisse beider Prinzipversuche wiesen ein hohes Maß an Übereinstimmung auf (Pucher, 2013, S. 22), womit der Nachweis eines mit hinreichender Genauigkeit bestimmbaren Gleitreibungskoeffizienten durch Reibkraftmessung erbracht wurde.

6.2.2 Prinzipversuch zur Ermittlung der erforderlichen Verdichtungskraft

Die analytische Beschreibung des Verdichtungsprozesses bedingte u.a. die Ermittlung der erforderlichen Verdichtungskraft.

Als Ergebnis einer zweckmäßigen Modellbildung, um das Problem versuchstechnisch darstellen zu können, sollte die Verdichtungskraft in Abhängigkeit der jeweiligen Komprimierung bei Verdichtungs Vorgängen unter reproduzierbaren Bedingungen messtechnisch erfasst werden.

Dazu wurde ein quadratischer Prüfbehälter mit Schneidgut befüllt und manuell verdichtet, wobei sowohl die aufgebrauchte Kraft als auch die Volumsänderung des Probematerials, als Funktion einer Längenänderung, sensorisch aufgezeichnet wurden (Abb. 67). Die mittels diesem Versuchsaufbau empirisch ermittelte Verdichtungscharakteristik entspricht einer nichtlinearen Feder mit progressivem Verlauf, welche mittels Regression durch eine Exponentialfunktion für die weiteren Untersuchungen beschrieben wurde.

Im ersten Ansatz wurde der Anteil der Wandreibung, als systematischer Fehler dieses Versuchsaufbaus, als hinreichend gering angenommen. Für die Analyse und Bewertung der Versuchsergebnisse wurde dementsprechend vorausgesetzt, dass die gesamte eingebrachte Kraft als Verdichtungskraft in das Schneidgut eingeleitet wird. (Pucher, 2013, S. 26)

Diese Annahme wurde im weiteren Verlauf der Machbarkeitsstudie widerlegt und eine deutliche Beeinflussung der Messergebnisse durch die Wandreibung aufgezeigt.

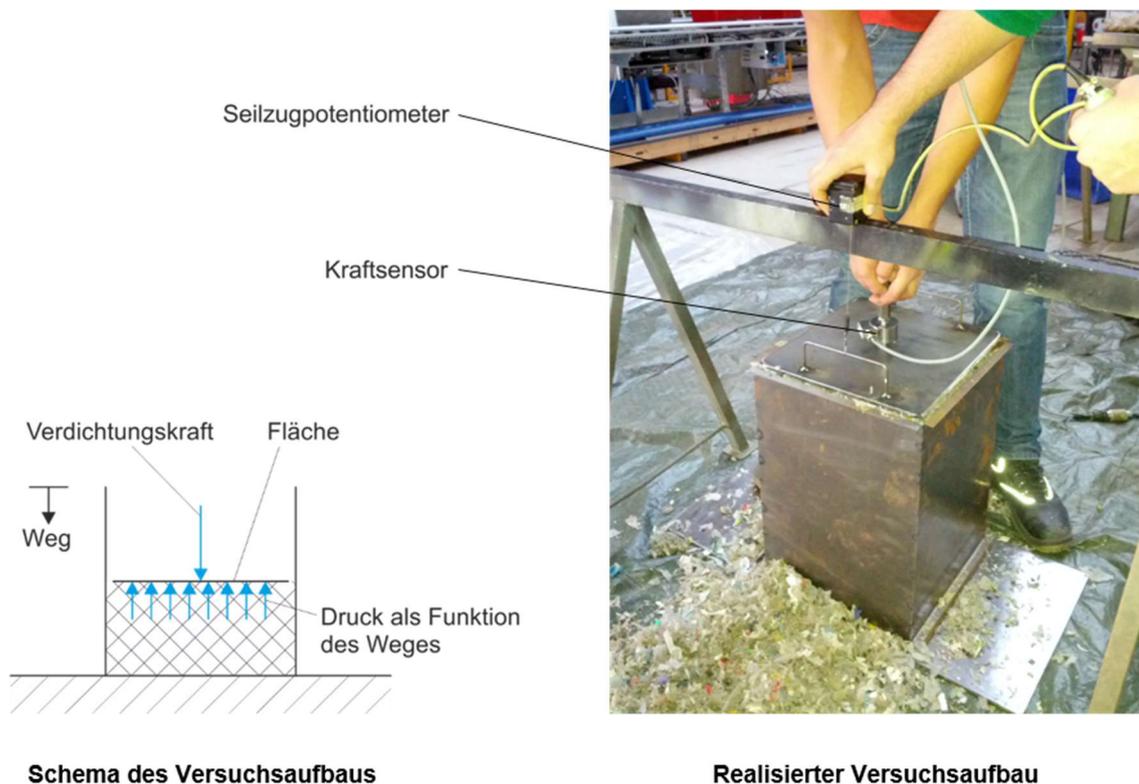


Abbildung 67: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung der erforderlichen Verdichtungskraft in Abhängigkeit der Komprimierung

Die beschriebene Prinzipversuchsdurchführung und die praktischen Erfahrungen aus dem weiteren Projektverlauf verdeutlichen die Notwendigkeit eines Plausibilitätschecks bzw. einer Verifikation der Versuchsergebnisse.

Das Versuchskonzept bzw. dessen geplante Umsetzung sollte grundsätzlich eine quantitative Abschätzung der systematischen Störeinflüsse beinhalten, respektive Überlegungen ob es möglich ist diese zu beseitigen oder zu minimieren.

6.2.3 Prinzipversuch zur Ermittlung der Brückenbildungsneigung

Neben der empirischen Ermittlung des Gleitreibungskoeffizienten und der erforderlichen Verdichtungskraft, wurde im Rahmen der Machbarkeitsanalyse auch die Brückenbildungsneigung von geschreddertem Hausmüll untersucht, mit dem Ziel einer genaueren Beschreibung des Schneidgutverhaltens.

Dazu wurde auf zwei Stahlplatten, eine bewegliche und eine fest eingespannte, Schneidgut bis zur maximal möglichen Schütthöhe, abhängig von der Plattengeometrie und der maximal übertragbaren inneren Schubspannung, aufgeschüttet und die beiden Platten anschließend auseinandergezogen (Abb. 68). Das Verhältnis von messtechnisch ermittelter Schütthöhe zu Spaltweite, ab welcher Schneidgut zwischen den Platten durchfällt, wurde zur Beschreibung der Brückenbildungsneigung herangezogen.

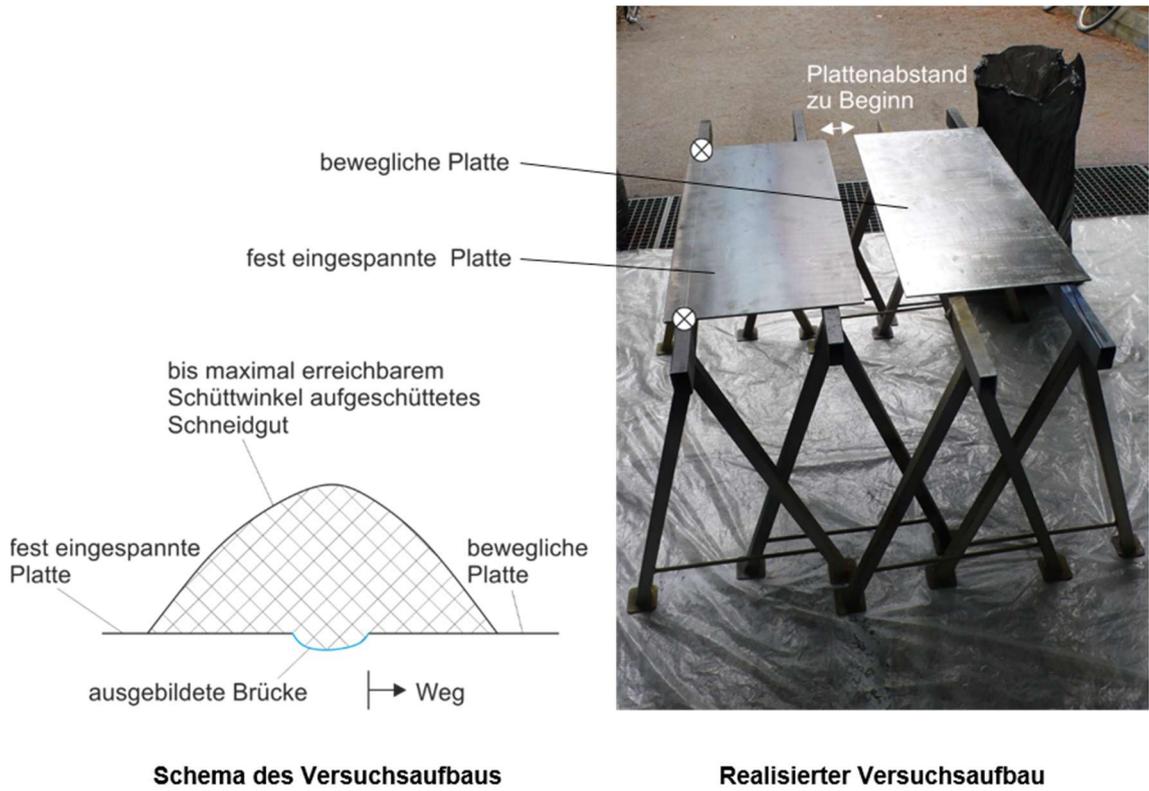


Abbildung 68: Schematischer und realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Ermittlung der Brückenbildungsneigung des betreffenden Schneidgutes

In Abbildung 69 sind das aufgeschüttete Schneidgut vor einer Versuchsdurchführung und eine gerade noch vorhandene Brücke mit einer Breite von ca. 400 mm dargestellt.

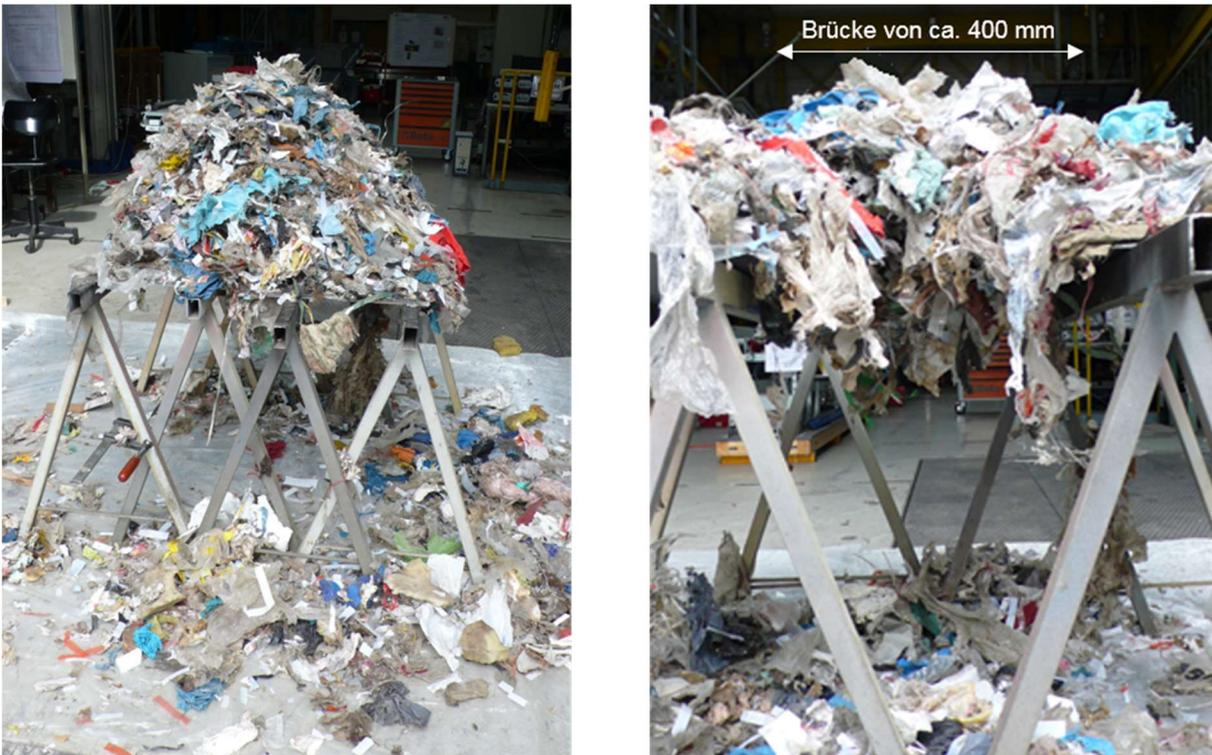


Abbildung 69: Schneidgut zu Versuchsbeginn (links) und ausgebildete Brücke (rechts)

Die Versuchsergebnisse zeigten einen direkten Zusammenhang zwischen mittlerer Schütthöhe und mittlerer Spaltweite auf. Somit wurde eine entsprechende Übertragungsfähigkeit von Schubspannung des Schüttgutes empirisch belegt. (Pucher, 2013, S. 33)

Durch diesen Prinzipversuch konnten unter geringem Zeit-, Material- und Messmittel-Aufwand, zur Bestimmung von Schütthöhe und Spaltweite wurde ein handelsübliches Maßband verwendet, valide Aussagen in einer für das übergeordnete Projekt ausreichenden Genauigkeit getroffen werden.

Die im Rahmen der Machbarkeitsstudie abgewickelten Prinzipversuche sind praktische Beispiele für einen effizienten Einsatz empirischer Untersuchungen in frühen Phasen einer Produktentwicklung. Zugleich verdeutlichen sie reale Problemstellungen sowie zu beachtende Aspekte für die Definition eines holistischen Prozessmodells zur Durchführung von Prinzipversuchen.

6.3 Prinzipversuche zur Verifikation und Optimierung von Simulationsmodellen zur Analyse von mechanischen Stoßvorgängen

Das Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik war einer der Projektpartner eines Förderprojektes zur Entwicklung bzw. technischen Umsetzung eines Getriebekonzeptes für einen hybriden Antriebsstrang in Automotive-Applikationen. Dieses Konzept beinhaltete Aspekte zur Wirkungsgradsteigerung und hinsichtlich der Reduktion von Bauraum, Gewicht und Kosten. Zum einen sollten konventionelle Reibsynchronisationen durch eine elektrische Synchronisationsfunktion ersetzt werden und die Leistungsübertragung sollte durch automatisiert geschaltete Klauenkupplungen realisiert werden.

Aufgrund der komplexen und mit Kontaktproblematik behafteten Belastungssituation, bei einem Schaltvorgang einer Klauenkupplung, wurden im Rahmen dieses Projektes spezifische Analysen von Stoßvorgängen durchgeführt. Das Ziel dieser Analysen bestand in der simulationsgestützten quantitativen Bestimmung der Belastung sowie des zeitlichen Belastungsverlaufes infolge des Stoßvorganges bei einem Einkuppelvorgang.

Die Beschreibung der Beanspruchung bei Berührung zweier Körper basiert grundsätzlich auf der Theorie nach Hertz (1881), welcher folgende Annahmen zu Grunde liegen (Beitz/Grote Hrsg., 2001, S. C37):

- homogenes, isotropes Material
- Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes
- alleinige Wirkung von Normalspannungen in der Berührfläche
- die Deformation, d.h. das Maß der Annäherung (auch Abplattung genannt), beider Körper muss im Verhältnis zu den Körperabmessungen klein sein

In Anbetracht der Vielzahl spezifischer Einflussparameter und Imponderabilien jedes kontakt-behafteten technischen Systems, sollte zunächst ein Prinzipversuch einer Mehrkörpersimulation gegenübergestellt werden, um die grundsätzliche Eignung der Hertzschen Kontakttheorie zur praktischen Beschreibung dieses Problems zu verifizieren.

Die experimentelle Bestimmung des Kontaktkraftverlaufes erfolgte durch einen direkten Stoß eines Stoßkörpers auf einen Kraftsensor. Die Stoßkörper, Segmente aus Stahl-Vollkugeln, bewegten sich dabei von einer definierten Fallhöhe (relativer Höhenunterschied zum Kontaktpunkt) unter Einwirkung der Erdbeschleunigung über eine Kreisbahn bis zum Punkt des Aufeinandertreffens. Zur Messung der Kontaktzeit, also der Gesamtdauer der gegenseitigen Lasteinwirkung, wurde der Prüfstand als elektrischer Stromkreis aufgebaut, welcher nur bei Kontakt der elektrisch leitenden Stoßpartner geschlossen war (Abb. 70).

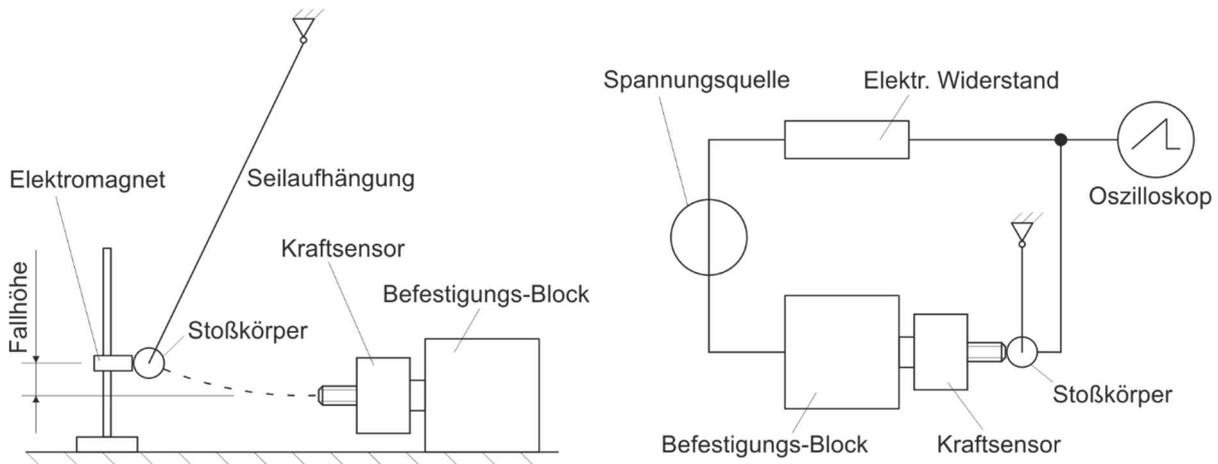


Abbildung 70: Schematischer Prinzipversuchsaufbau zur Anwendbarkeitsstudie der Hertz'schen Theorie (links) inkl. elektrischer Anordnung zur experimentellen Bestimmung der Kontaktzeit (rechts)

Abbildung 71 veranschaulicht den realisierten und auf einer Prüfplatte aufgebauten Versuchsaufbau.

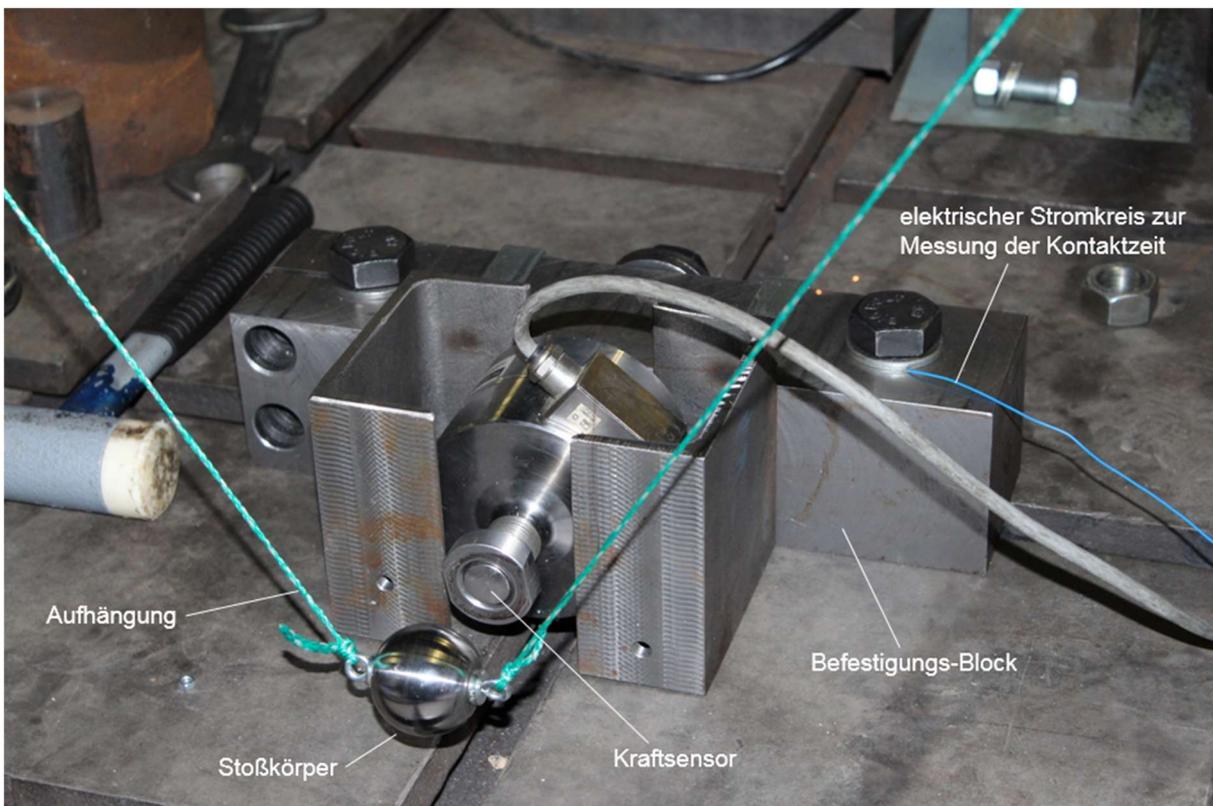


Abbildung 71: Realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Anwendbarkeitsstudie der Hertz'schen Theorie

Aufgrund der verhältnismäßig kurzen Dauer eines Stoßvorganges (im Bereich zwischen 100 und 200 μs) lagen die Schwierigkeiten bei der Gestaltung des Prinzipprüfstands vor allem in der messtechnischen Erfassbarkeit der repräsentativen Größen.

Zur Verifikation der Einsetzbarkeit der Hertzschen Theorie wurde dieser Stoßprüfstand anhand eines Mehrkörpersimulationsmodells, bei dem der Stoß auf Basis der Hertzschen Formeln für Abplattung beschrieben wurde, nachgebildet.

Eine exemplarische Gegenüberstellung der Ergebnisse eines Versuchsdurchgangs mit jenen der zugehörigen Mehrkörpersimulation demonstriert repräsentativ das Maß an Korrelation (Abb. 72).

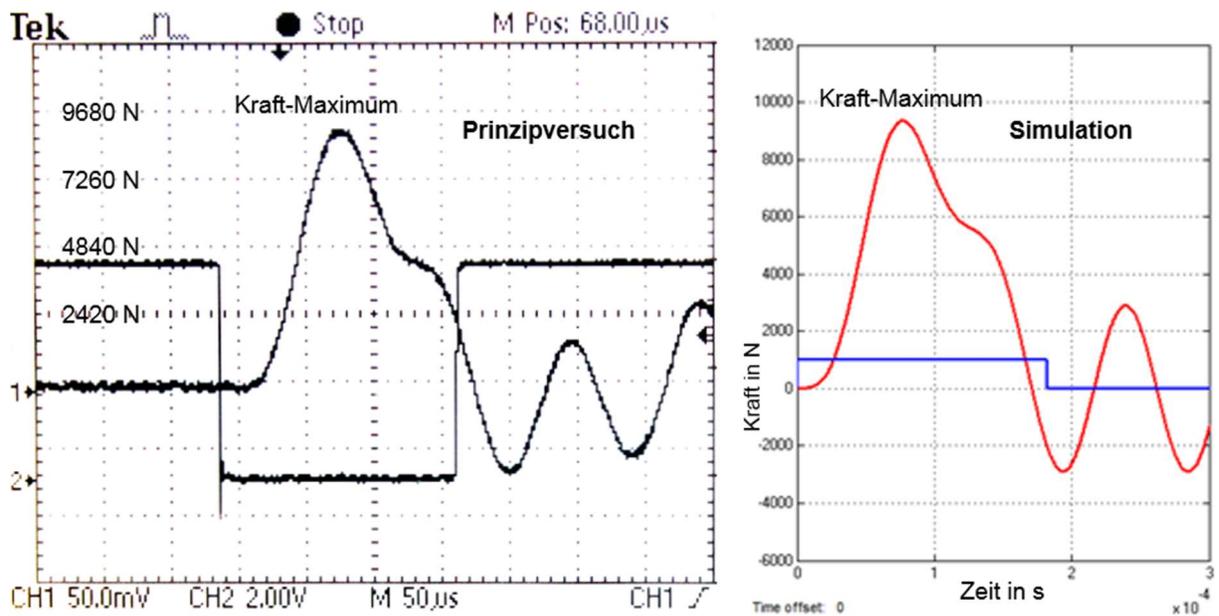


Abbildung 72: Exemplarische Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen im Rahmen der Anwendbarkeitsstudie der Hertzschen Theorie

Auf Basis dieser positiven Verifikation der grundsätzlichen Eignung der Hertzschen Kontakttheorie wurde ein Simulationsmodell zur Bestimmung der Lastsituation beim umfangsseitigen Stoß eines Einkuppelvorgangs, bei definierten Relatvdrehzahlen und an abstrahierten Klauen, erstellt.

Die grundsätzliche Zielsetzung lag in der simulationstechnischen Abbildung des abstrahierten Systems Klaue-Klaue, zur spezifischen Analyse der Stoßdynamik. Die Verifikation dieses Modells bzw. der daraus resultierenden Ergebnisse sollte anhand eines amplifizierten Prinzipversuchs erfolgen. Des Weiteren sollten die generierten Messdaten zu einer etwaigen Optimierung der Simulation herangezogen werden.

Die versuchstechnische Abbildung der, gemäß Lastenheft für einen Schaltvorgang zulässigen, Relatvdrehzahlen erfolgte durch den Einsatz einer fixen und einer beweglichen Welle. Der verbleibende Freiheitsgrad dieser Anordnung war die Rotation der drehbar gelagerten Welle um ihre Längsachse, wodurch die variablen Parameter einzig auf die Relatvgeschwindigkeit der Kupplungshälften reduziert werden konnten (Abb. 73).

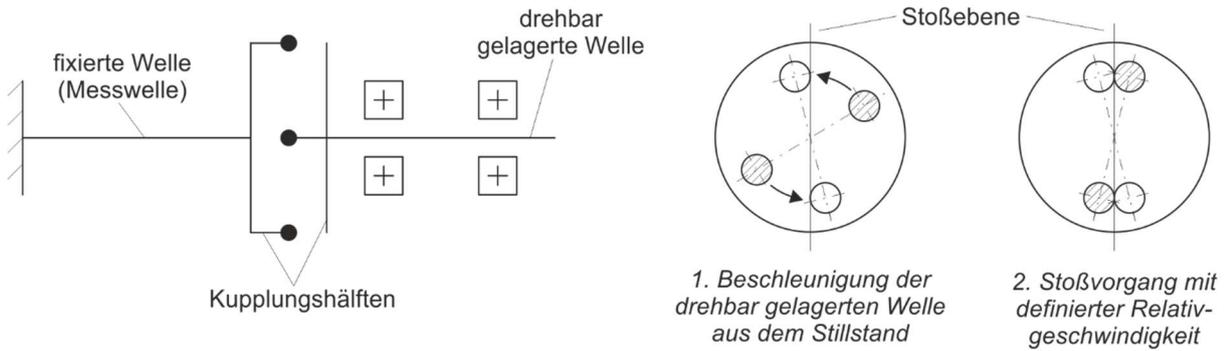


Abbildung 73: Schematischer Prinzipversuchsaufbau zur Analyse des umfangsseitigen Stoßes (links) und allgemeiner Ablauf eines Versuchsdurchgangs (rechts)

Um möglichst keine Querkräfte in die Wellen einzuleiten und eine gleichmäßige Lastverteilung realisieren zu können, wurde jede Welle mit zwei abstrahierten Klauen ausgestattet. Ehe die Stoßpartner bei einem Versuchsdurchgang aufeinandertrafen, erfolgte eine Beschleunigung der drehbar gelagerten Welle, aus dem Stillstand, um die für den Stoß notwendige Relativgeschwindigkeit zu erzeugen (Abb. 73).

Die experimentelle Bestimmung der auf die Klauen wirkenden Kraft erfolgte durch Messung der Verschiebungen mittels Dehnungsmessstreifen. Darüber hinaus wurde die fix eingespannte Welle (Messwelle) mit zusätzlichen Dehnungsmessstreifen ausgestattet, um das infolge der Stoßkraft eingeleitete Torsionsmoment quantitativ bestimmen zu können. Die einem Stoßvorgang zugrundeliegende Relativedrehzahl, zwischen fixierter und drehbar gelagerter Welle, wurde mittels Lasersensor als Umfangsgeschwindigkeit der Klauen gemessen. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den realisierten Versuchsaufbau (Abb. 74).

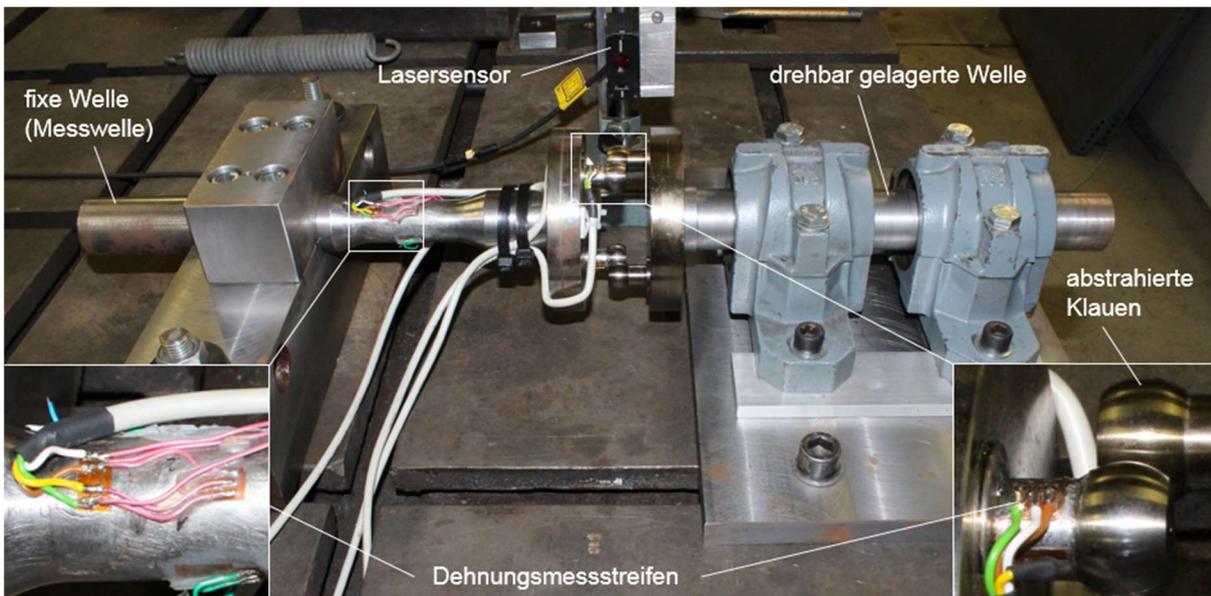


Abbildung 74: Realisierter Prinzipversuchsaufbau zur Analyse der Stoßdynamik des Systems Klauen-Klauen

Die Kalibrierung der an den Klauen und an der fix eingespannten Welle applizierten Dehnungsmessstreifen erfolgte durch eine definierte statische Belastung.

Die Zulässigkeit einer statischen Kalibrierung und der daraus resultierenden Vernachlässigung der Massenkräfte, wurde durch eine Analyse mittels Finite Elemente Methode nachgewiesen. Abbildung 75 zeigt das dafür erstellte und entsprechend vernetzte Modell der Messwelle.

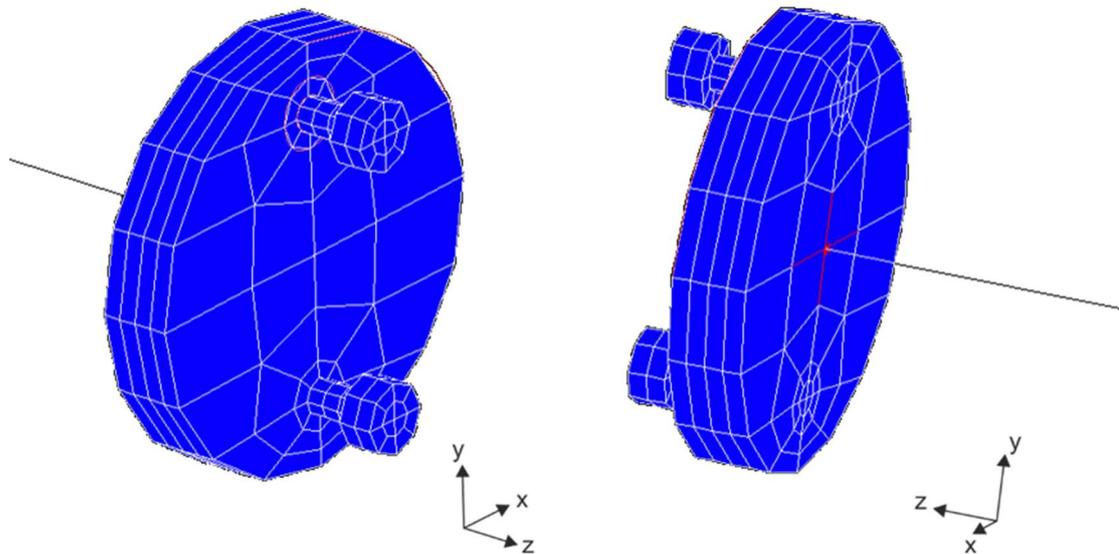


Abbildung 75: Finite-Elemente-Modell der Messwelle

Die durchgeführten Untersuchungen bestanden aus einer numerischen Modalanalyse, zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens der Messwelle, und der Gegenüberstellung einer statischen mit einer transienten bzw. dynamischen Strukturmechanik-Simulation, wobei hierfür zusätzlich ein analytischer Plausibilitätscheck zur Verifikation der Ergebnisse durchgeführt wurde.

Die Ausrichtung der Wellen respektive der Klauen zueinander erfolgte durch Auswertung der Messschriebe, um einen möglichst gleichzeitigen Stoß sicherzustellen.

Auf eine direkte Messung der Kontaktzeit wurde aufgrund der Korrelation zwischen Dauer der Krafteinwirkung und Zeitmessung bei der Anwendbarkeitsstudie der Hertzschen Theorie (Abb. 76) verzichtet. Des Weiteren wäre eine solche Messung bei einem Versuchsaufbau mit zwei Wellen nur durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien, zur elektrischen Isolation, und somit zusätzlichen Paarungssteifigkeiten möglich gewesen.

Der in Abbildung 74 dargestellte realisierte Prinzipversuchsaufbau repräsentierte weitestgehend die physikalische Umsetzung des Mehrkörpersimulationsmodells zur Analyse der Stoßdynamik des Systems Klaue-Klaue. Die für dessen numerische Lösung erforderlichen Feder- und Kontaktsteifigkeiten wurden einerseits durch analytische Berechnungen und andererseits basierend auf der Hertzschen Theorie bestimmt.

Die Auswertung der Analyseergebnisse von Versuch und Simulation wiesen sowohl qualitativ als auch quantitativ ein hohes Maß an Übereinstimmung auf, wodurch die Richtigkeit des numerischen Modells als verifiziert angesehen werden konnte.

Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgte eine Optimierung des Simulationsmodells, indem ein zeitlicher Versatz des Aufeinandertreffens der Klauen berücksichtigt wurde, da weder im Versuch noch in Hinblick auf realisierte Klauenkupplungen ein absolut gleichzeitiges Auftreffen der Klauen in jedem Fall sichergestellt werden kann.

Abbildung 76 zeigt eine exemplarische Gegenüberstellung der Ergebnisse eines Versuchs- und Simulationsdurchgangs. Das Phänomen zwei annähernd idente Stoßkraftverläufe zu messen und zu berechnen zeigte sich über sämtliche Versuchsreihen. Eine Hypothese zu dessen Beschreibung liegt in den definierten Steifigkeiten der abstrahierten Klauen. Der konsistente, nicht lineare Kraftanstieg kann als Indiz für die Abbildung der wesentlichen physikalischen Einflussgrößen in der Simulation interpretiert werden.

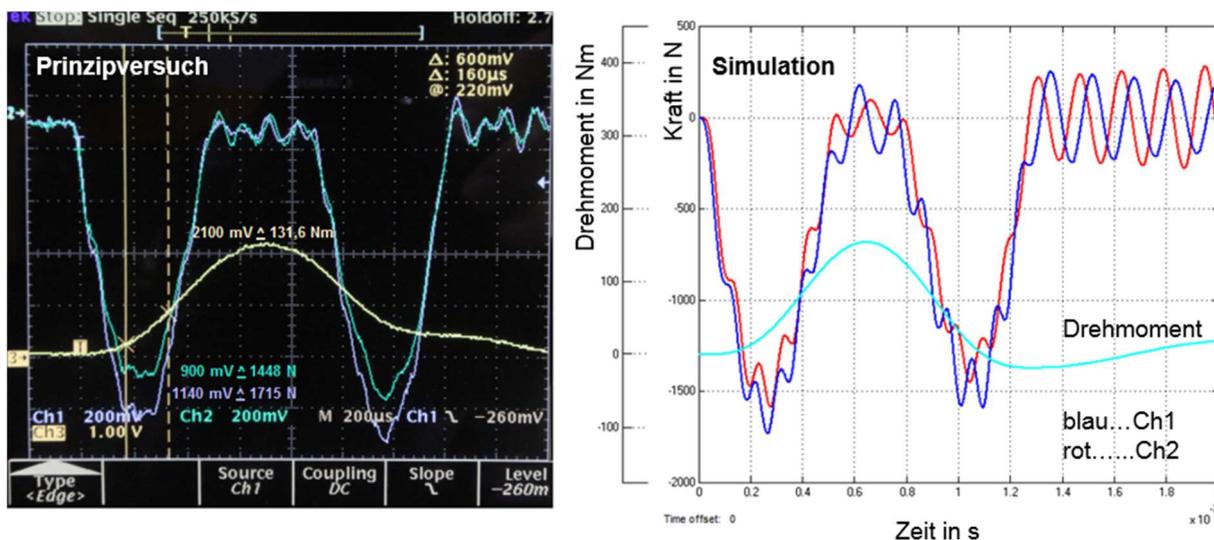


Abbildung 76: Exemplarische Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen im Rahmen der Stoßdynamik-Analyse des Systems Klaue-Klaue

Die nicht identen Verläufe der Klauenbelastung im Simulationsergebnis (blau und rot in Abb. 76) resultieren aus der Berücksichtigung des beschriebenen zeitlichen Versatzes des Aufeinandertreffens der Klauen.

Die quantitativen Ergebnisse dieser Belastungsanalyse repräsentierten die Basis weiterführender Detaillierungen.

Beide im Rahmen dieses Entwicklungsprojektes realisierten Prinzipversuche sind ein praktisches Beispiel dafür, dass Versuche und virtuelle Produktentwicklung nicht im Widerspruch zueinander stehen. Die spezifische Charakteristik von Prinzipversuchen erlaubt es (in der Regel), diese bereits in frühen Entwicklungsstadien, im Sinne einer Simulationsunterstützung, in Kombination mit virtuellen Methoden einzusetzen.

Im Allgemeinen erlauben numerische Simulationen die prognosefähige Abbildung globaler Effekte, sofern die erforderlichen Informationen für eine adäquate Parametrierung zur Verfügung stehen. Vor allem für spezifische Effekte und Phänomene können diese Informationen durch Prinzipversuche zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung ist jedoch ein hohes Maß an Synchronisation Voraussetzung für ein solches Vorgehen.

6.4 Prinzipversuch zur Schnittkraftermittlung von Zellstoffbahnen

Die Verarbeitung von Zellstoff, als beim chemischen Aufschluss von Pflanzenfasern anfallende und vorwiegend aus Zellulose bestehende Masse, repräsentiert einen Teilprozess der industriellen Herstellung von Papier. Dazu werden endlose Zellstoffbahnen (Breite ca. 10 m, Dicke ca. 2 mm) in quadratische Platten mit einer Fläche von 1 m² geschnitten, anschließend in Wasser aufgelöst und zu Papier weiterverarbeitet. Der Schnitt in Querrichtung erfolgt in der Regel durch rotierende Messerwalzen, wobei ein Verdichten des Zellstoffs stattfinden kann. Diese verdichteten Zonen lösen sich im weiteren Verarbeitungsprozess nicht oder nur ungenügend auf und führen somit unweigerlich zu einer Verschlechterung des Produktionsergebnisses.

Das Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik wurde im Rahmen eines Entwicklungsprojektes beauftragt einen solchen Zellstoff-Schneidprozess zu analysieren, um durch entsprechende Auslegung und Parametereinstellungen eine vorausgesetzte Produktionsqualität sicherstellen zu können. Dazu sollten maßgebliche Einflussgrößen identifiziert sowie deren Wechselwirkungen und die beim Schnitt auftretenden Kräfte quantitativ beschrieben werden.

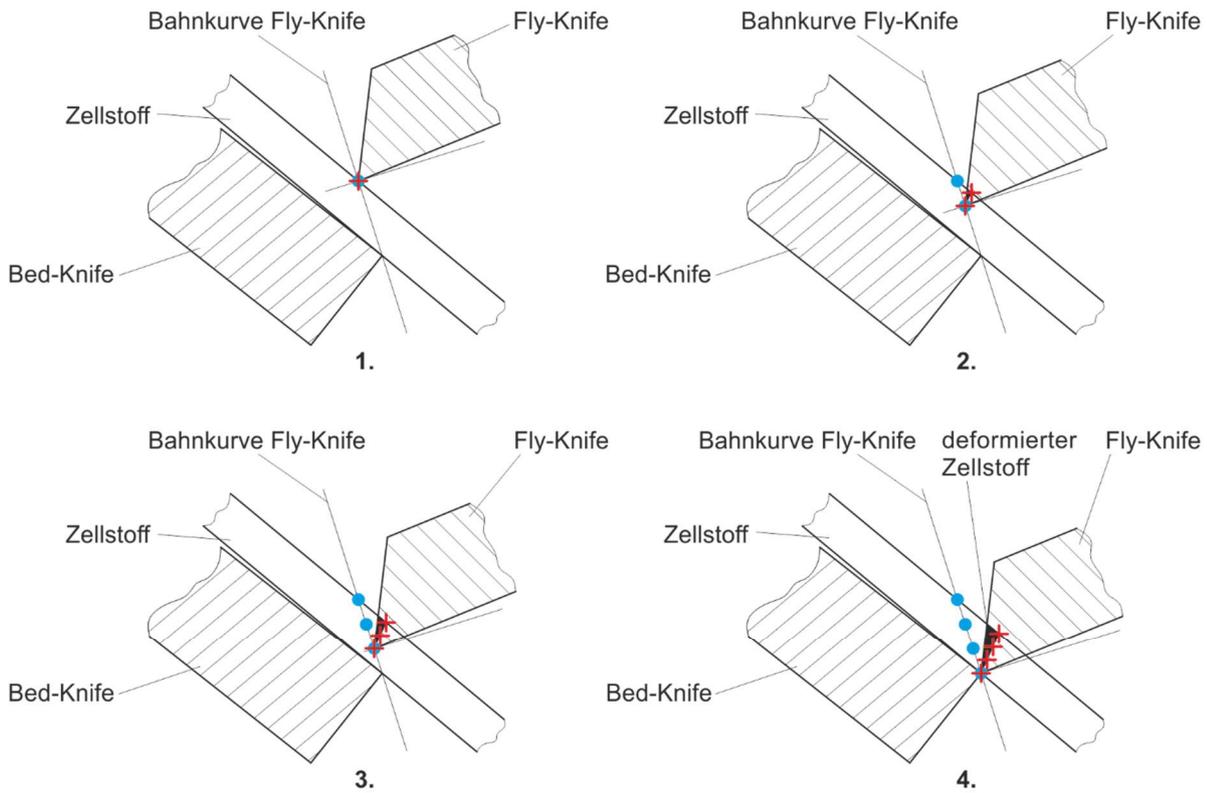
Grundsätzlich ist die prozesstechnisch kritische Verdichtung des Zellstoffs von der Schärfe der Messer, deren Stellung sowie der Größe des Schneidspalts abhängig. Die Schnittkräfte werden maßgeblich durch den Schneidspalt und die Messerschäfte bestimmt und sind vor allem für die Dimensionierung der Bauteile von Relevanz.

Die Geometrie des Schnitts hängt theoretisch, unter entsprechenden Voraussetzungen (kein Ausweichen der Zellstoffbahn durch die Schneidkräfte, konstante Geschwindigkeit der Zellstoffbahn, Bahnkurve des bewegten Messers ist während des Schnitts eine Gerade, auf null reduzierter Schneidspalt), allein von den Geschwindigkeitsverhältnissen zwischen Zellstoffbahn und dem bewegten Messer („Fly-Knife“) ab. Nur wenn beide Geschwindigkeiten gleich groß sind, erfolgt ein senkrechter Schnitt. Abbildung 77 stellt einen exemplarischen Schnittvorgang in vier Stufen dar.

Ist das ruhende Messer („Bed-Knife“) in Richtung Zellstoffbahn ausgerichtet, erfolgt der Schnitt zunächst als Keilschnitt und beim Überstreichen von Fly-Knife und Bed-Knife als Scherenschnitt. Dies führt zu einem sauberen Schnittbeginn, mit nachfolgender Schäl- und Reistenzenz.

Die Geschwindigkeitskomponente des Fly-Knife ist im dargestellten Fall (Abb. 77) in Richtung der Zellstoffbahn höher als jene der Zellstoffbahn selbst, wodurch sich ein „verlagerter“ Schnitt ergibt.

Der Durchmesser der Schneidwalze und deren Bahnkurve sind demzufolge nur soweit von Relevanz, wie dadurch die Geschwindigkeiten beeinflusst werden. Dies gilt jedoch nicht für die Qualität des realen Schnitts.



Position der Schneidkante bei einzelnen Zeitschritten:

- Position des Fly-Knife (absolut im Raum)
- + Position auf der Zellstoffbahn

Abbildung 77: Darstellung des Zellstoff-Schnittvorgangs in vier Stufen

Um die komplexen Einflüsse auf die Qualität und die Kräftesituation repräsentativ darstellen zu können, sollte deren Untersuchung empirisch erfolgen. Analysen an der realen Anlage wären einerseits wegen eines aufrechten Regelbetriebs grundsätzlich nicht möglich und andererseits aufgrund der Dimensionen mit immensem Aufwand sowie eingeschränkter Flexibilität und Variabilität verbunden gewesen.

Basierend auf diesen Umständen wurden spezifische Prinzipversuchskonzepte erarbeitet und realisiert, wobei die empirische Analyse des Schneidvorgangs in drei aufeinander aufbauenden Phasen umgesetzt wurde.

Zunächst wurden Schneidversuche mit einer konventionellen Papierschneidmaschine durchgeführt, um einen Überblick der wesentlichen Einflussparameter auf die Schnittqualität zu bekommen.

Da aufgrund der theoretischen Betrachtungen von einem Wechsel zwischen Keilschnitt und Scherenschnitt auszugehen war, wurde der Schnittkraftverlauf für beide Schneidprinzipien durch quasistatische (da die Schnittkraft durch einen handbetriebenen Hydraulikkolben aufgebracht wurde) Prinzipversuche analysiert.

Die Schnittkräfte wurden dabei mittels eines Kraftsensors und die zugehörige Schnitttiefe durch einen induktiven Wegsensor aufgezeichnet. In Abbildung 78 sind sowohl die Versuchsanordnung „Scherenschnitt“ als auch „Keilschnitt“, jeweils inkl. eines beispielhaften Versuchsergebnisses, dargestellt.

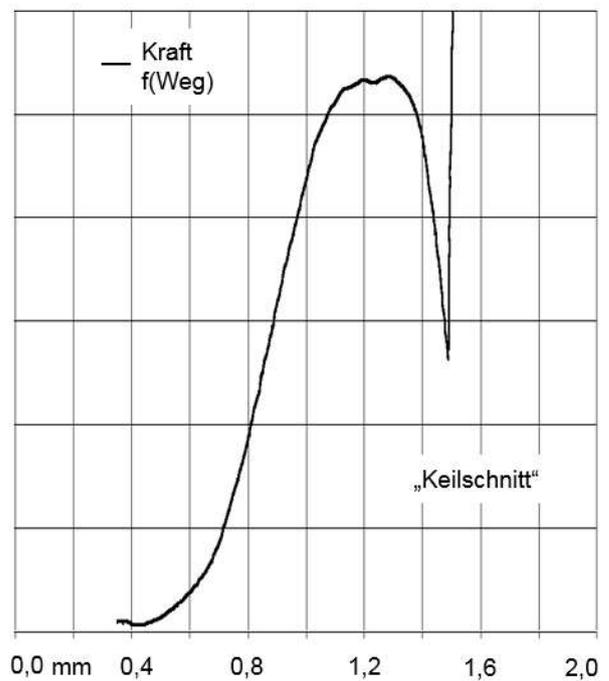
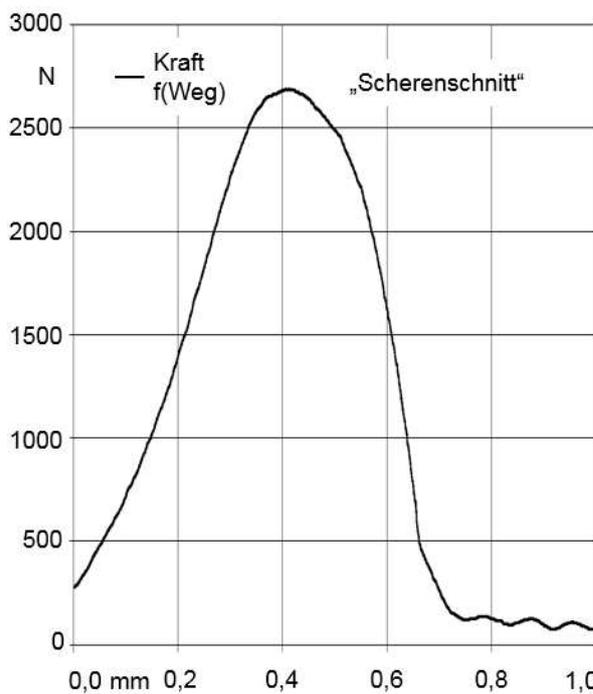
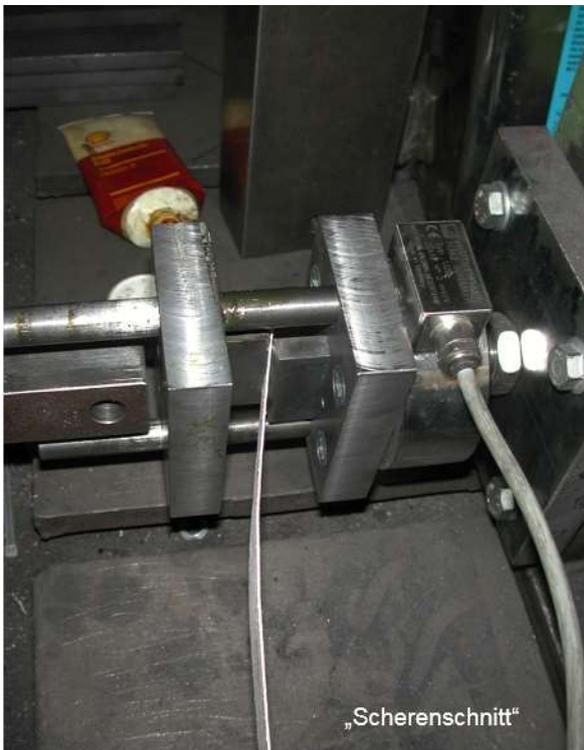
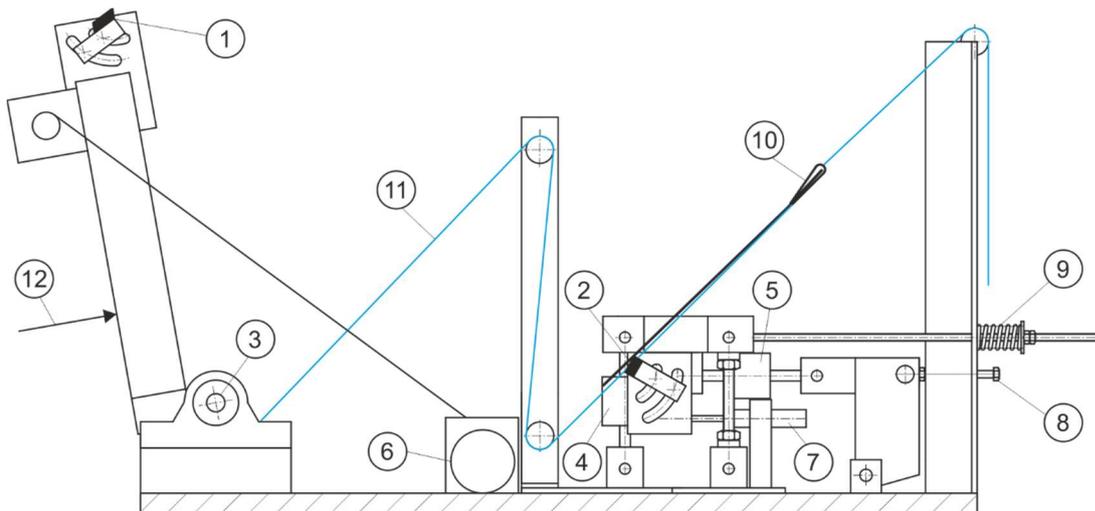


Abbildung 78: Versuchsanordnung „Scherenschnitt“ (links) und „Keilschnitt“ (rechts)

Um Schneidverhältnisse zu schaffen welche weitestgehend der realen Situation in der Anlage entsprechen, wurden die empirischen Analysen des Schneidvorgangs durch dynamische Versuche komplettiert.

Einen essentiellen Aspekt repräsentierte dabei die kinematisch richtige Abbildung des Zellstoffschnitts, mit entsprechend bewegter Zellstoffbahn.

Die Vorschubbewegung des bei diesem Prinzipversuch eingesetzten und hinsichtlich dessen Größe, im Vergleich zur realen Anlage, deutlich reduzierten Probematerials (Zellstoffplatten mit einer Länge von 400 mm und einer Breite von 200 mm), wurde mittels Seilzugkinematik umgesetzt. Der Zellstoff wurde dabei von der ursprünglichen Position weg- und damit geschwindigkeitsgerecht knapp vor dem Schneidvorgang mitgenommen. Das Schema des Prüfstands veranschaulicht Abbildung 79.



- | | |
|--|---|
| 1...Fly-Knife mit Zusatzmassen | 7...Wegmessung Bed-Knife horizontal (einseitig) |
| 2...Bed-Knife | 8...Schneidspalteinstellung |
| 3...Drehachsenlager | 9...Spielausgleich/Vorspannung zum Verringern der Nichtlinearitäten von Lagern etc. |
| 4...Kraftsensor-Vertikalkraft (beidseitig) | 10...Zellstoffhalterung |
| 5...Kraftsensor-Horizontalkraft (beidseitig) | 11...Seilsystem (federbelastet) für Zellstoffvorschub |
| 6...Wegmessung Fly-Knife (einseitig) | 12...Startimpuls durch Pneumatikzylinder |

Abbildung 79: Schematischer Prinzipversuchsaufbau mit rotatorisch bewegtem Messer (1), stehendem Messer (2) und mechanischer Zellstoffzuführung (11)

Der darzustellende Zellstoffschnitt erfolgte zwischen einem ruhenden und einem auf einer drehbar gelagerten Schwinge (der Messerflugradius entsprach jener der Messerwalze) fixierten Messer. Durch einen Pneumatikzylinder erhielt die Schwinge einen Beschleunigungsimpuls für die Schnittbewegung.

Um eine entsprechende Parametervariation durchführen zu können, wurden sowohl der Schneidspalt als auch die Messerstellungen einstellbar ausgeführt. Somit konnten sämtliche relevanten Schnittwinkel durch Anstellen der Messer (Bed-Knife und Fly-Knife) sowie ein variabler Schneidspalt dargestellt werden.

Die nachfolgenden Abbildungen 80 und 81 zeigen den realisierten Prinzipversuchsprüfstand.

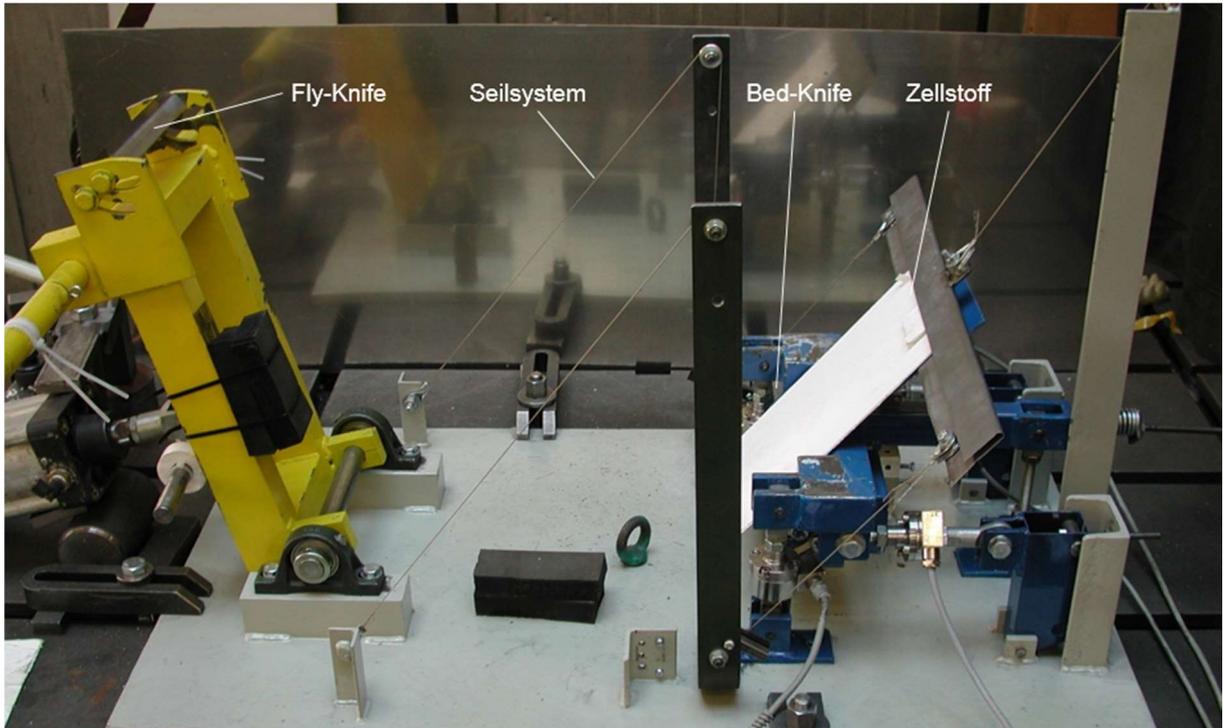


Abbildung 80: Realisierter Prüfaufbau mit bewegtem Messer (Fly-Knife) in Ausgangsposition

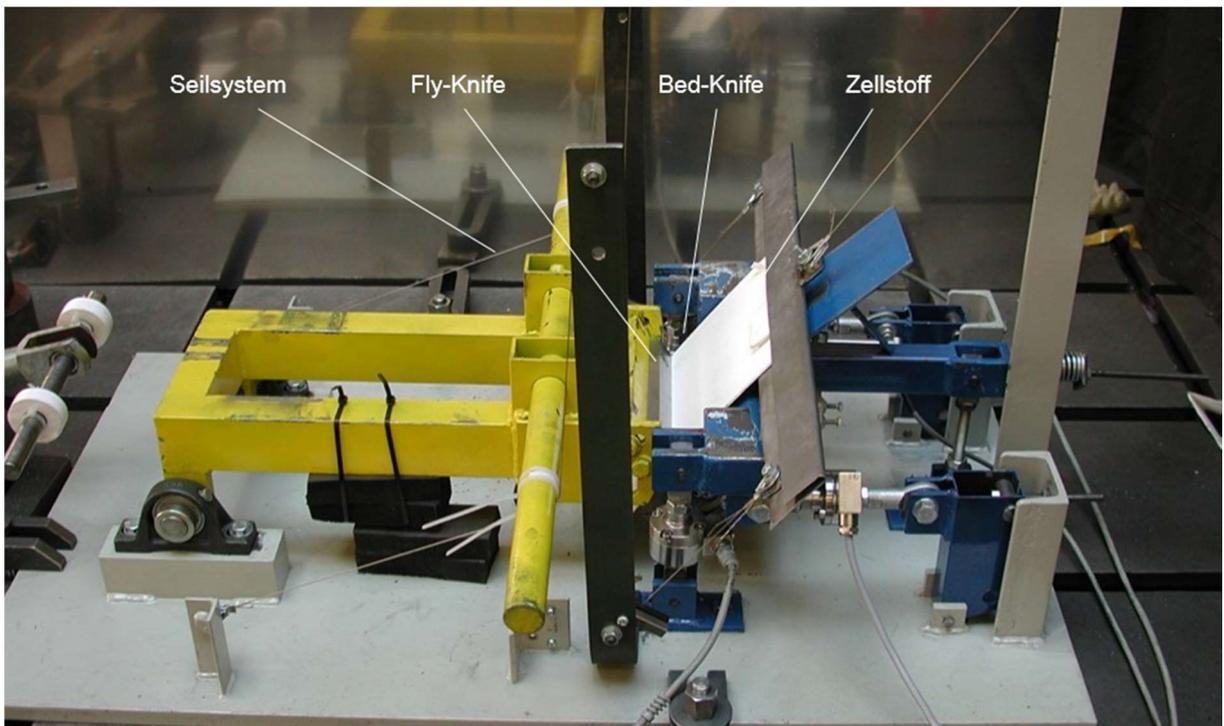


Abbildung 81: Realisierter Prüfaufbau mit bewegtem Messer (Fly-Knife) in Schnittposition

Messtechnisch wurden die horizontalen und vertikalen Schnittkräfte mittels Kraftsensoren, der Weg des Fly-Knife durch ein Seilzugpotentiometer und das Ausweichen des Bed-Knife durch einen Induktivweggeber erfasst. Ein exemplarischer Messschrieb der während eines Versuchsdurchgangs erfassten vertikalen und horizontalen Kräfte ist in Abbildung 82 dargestellt.

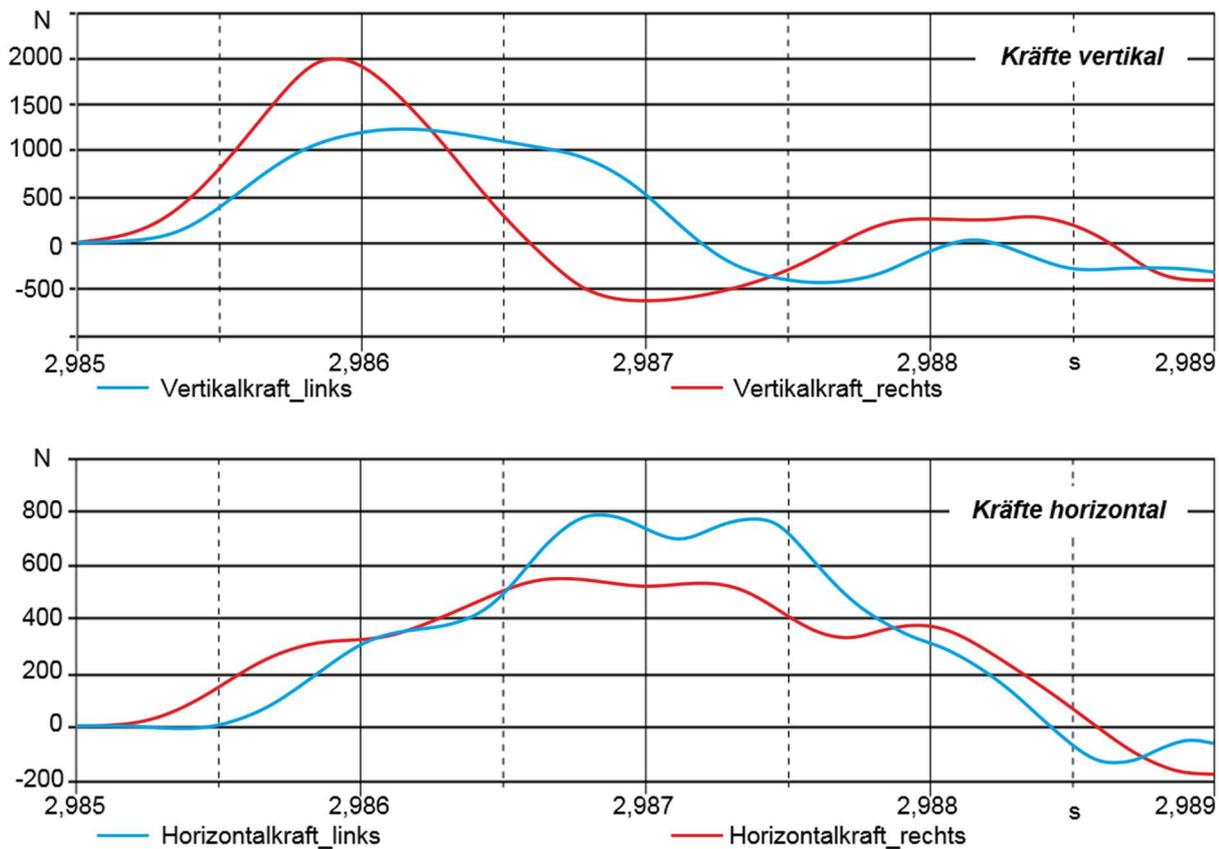


Abbildung 82: Schnitkräfte eines exemplarischen Versuchsdurchgangs

Das beschriebene und auch umgesetzte Prüfstandskonzept erlaubte allerdings keine unmittelbare Messung der Kräfte direkt an der Schneidkrafteinleitung. Durch die massebehafteten Bauteile zwischen Schneidkrafteinleitung und Kraftmessung unterschieden sich die tatsächlich auftretenden Kräfte von jenen der messtechnisch erfassten, da die Bauteile im Sinne eines systematischen Fehlers als mechanischer Tiefpassfilter wirkten.

Aus diesem Grund wurden die am stehenden Messer auftretenden Kräfte, basierend auf den empirisch ermittelten Daten, durch eine Mehrkörpersimulation bestimmt. Dazu wurden, unter Berücksichtigung der relevanten Massen sowie der Steifigkeit der Abstützung, die gemessenen Kräfte als Eingangsgrößen für die Berechnung herangezogen und entsprechend korrigiert. Die somit gegebene indirekte Schnittkraftmessung wurde zudem mittels Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Beschleunigungen auf Plausibilität überprüft.

Die Beurteilung des versuchstechnisch dargestellten dynamischen Schneidprozesses erfolgte final anhand des gemessenen und numerisch korrigierten Schnittkraftverlaufs, der jeweiligen Energieumsetzung beim Schnitt (als Integration der Schnittkraft über den Weg) sowie durch eine optische Begutachtung der Zellstoff-Schneidkanten.

Als Bewertungskriterien der visuellen Schnittbildbeurteilung wurden der Schnittanteil in Prozent der Schnittfläche (0 % Schnitt bedeutet reines Reißen), die Stauchung (Klassifizierung der bleibenden Zellstoffverformung) und der Ausriss (Klassifizierung der herausgerissenen Zellstoffmenge) herangezogen (Abb. 83).

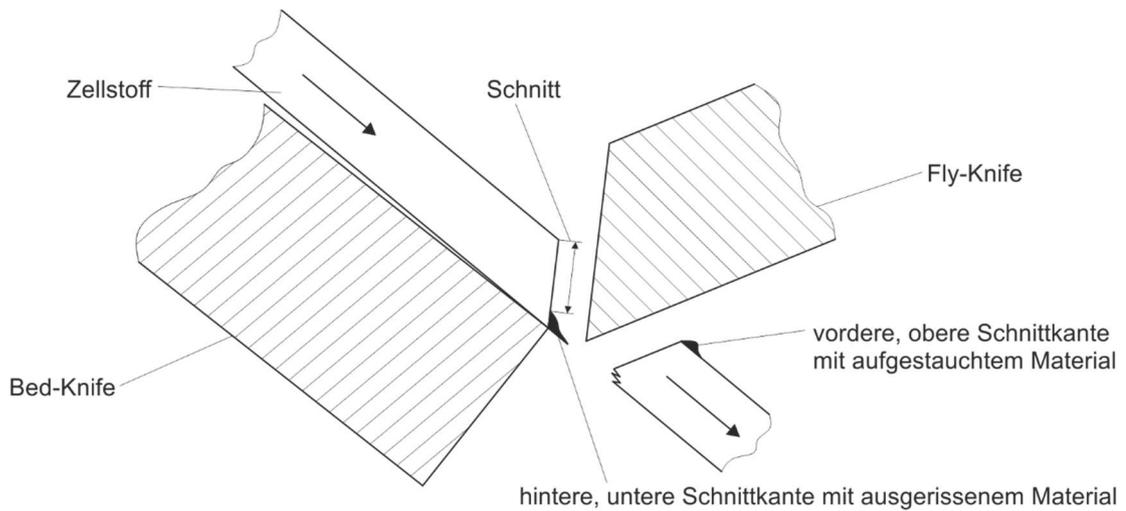


Abbildung 83: Kriterien der optischen Schnittbeurteilung

Die auf unterschiedlichen Rahmenbedingungen (statisch/dynamisch, Keil-/Scherenschnitt, etc.) aufbauenden Versuche zur Schnittkraftermittlung lieferten übereinstimmende Ergebnisse respektive zeigten ein analoges Verhalten, wodurch von einer entsprechenden Validität der Ergebnisse ausgegangen werden konnte.

In weiterer Folge wurden diese Kraftverläufe zur Bedatung einer dynamisch transienten Finite Elemente Simulation herangezogen, um die Variation des Schneidspalts der Gesamtanlage während des Betriebs zu analysieren.

Das dafür erforderliche Modell der Anlage beinhaltete die Messerwelle mit einem innen liegenden Kühlrohr, die entsprechenden Anschlusszapfen inkl. Lager und Lagerböcke sowie den Messerbalken mit zugehöriger Lagerung. Abbildung 84 veranschaulicht das vernetzte Modell mit den aufgeprägten horizontalen und vertikalen Schnittkraftkomponenten, wobei diese gemäß dem realen Schnittverlauf während eines Simulationsdurchgangs über die gesamte Messerwelle bewegt wurden.

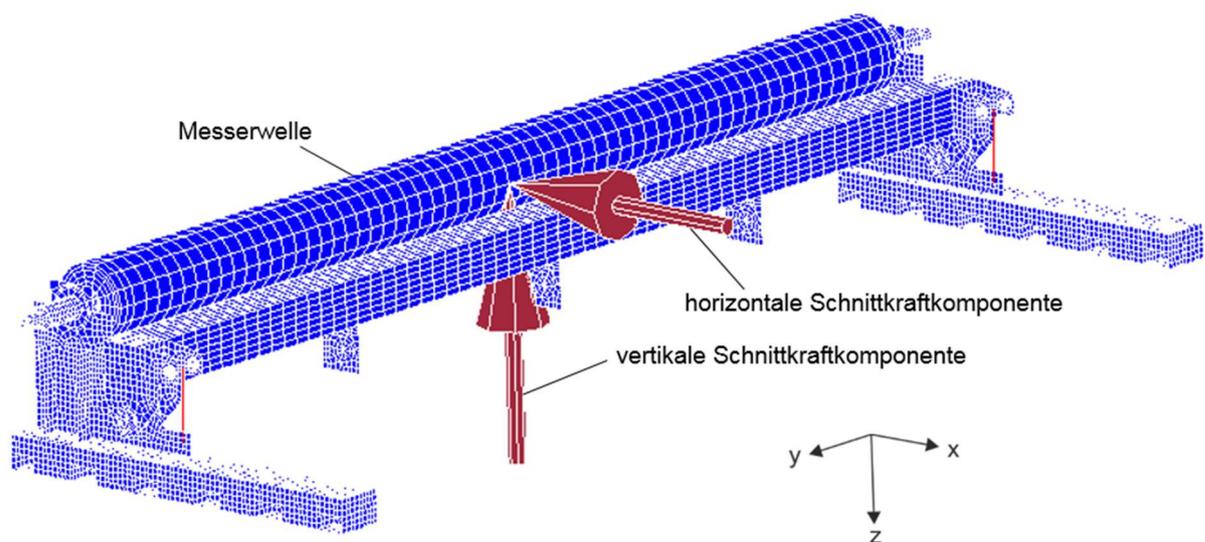


Abbildung 84: Finite-Elemente-Modell der Zellstoffschneidanlage

Zur Plausibilitätskontrolle wurde die numerisch ermittelte Durchbiegung der Messerwelle bei statischer Belastung einer analytischen Berechnung nach linearelastischer Theorie gegenübergestellt.

Das Ergebnis der dynamisch transienten Finiten Elemente Simulation spiegelte auch die Erwartung wider, dass die maximale Verformung der Welle an der Stelle des Schnitts nicht in der Mitte, sondern aufgrund der Trägheit erst später, konkret im letzten Viertel der Messerwelle, auftritt.

Abbildung 85 stellt einen beispielhaften Ausschnitt des simulierten und visualisierten Ergebnisses der Messerwellenverformung, bei maximaler Verformung in z-Richtung, dar.

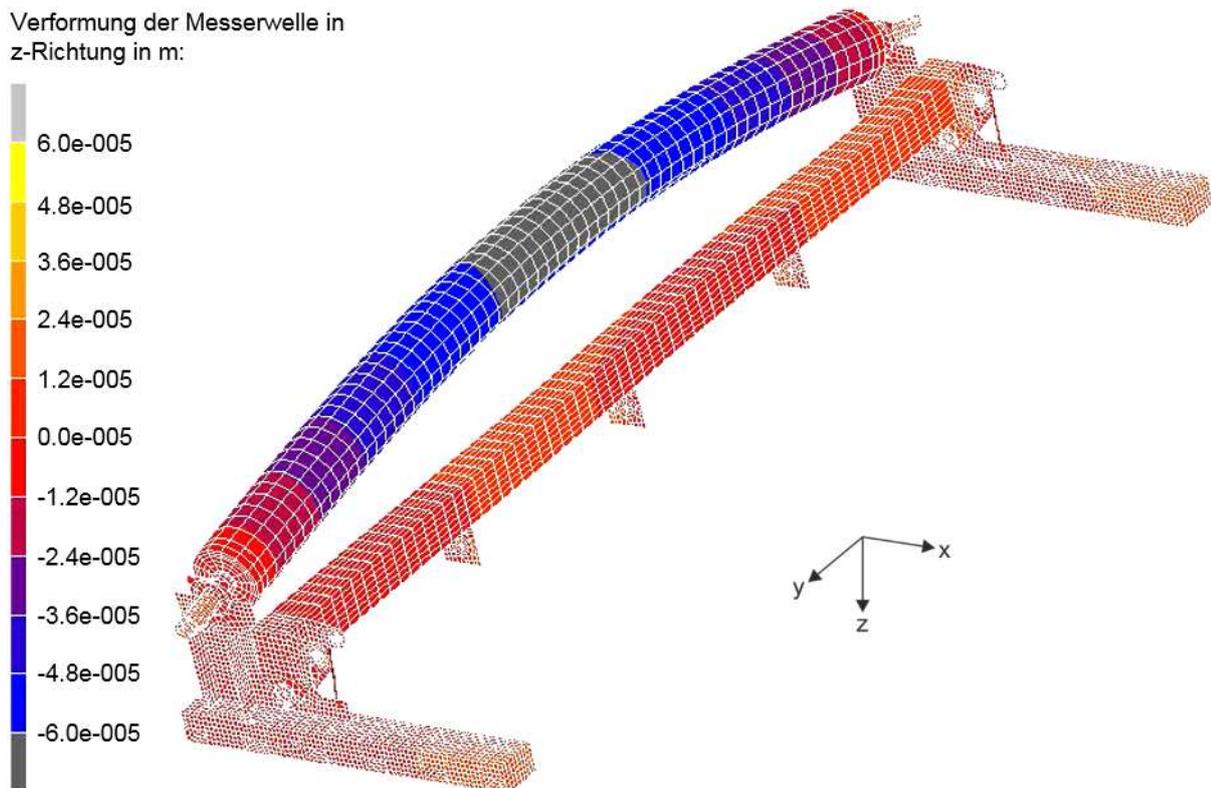


Abbildung 85: Maximale Verformung der Messerwelle in z-Richtung

Obwohl die Ergebnisse basierend auf stark reduzierten und vereinfachten Versuchsaufbauten generiert wurden, war es möglich die entsprechenden Parametereinstellungen der realen Anlage sowie anhand der ermittelten Kräfte die Festigkeitsauslegung spezifischer Komponenten zu optimieren.

Retrospektiv betrachtet repräsentiert die beschriebene Vorgehensweise ein weiteres Beispiel einer effektiven Kombinationsmöglichkeit von Empirie und Numerik.

6.5 Reflexion

Wie bereits in Kapitel 5.3 thematisiert, implizieren Entwicklungsmethoden eine Synthese aus Ansatz, Werkzeug, Objekt (Modell, Prüfkörper, System, etc.), Umgebung, Vorgehensweise und Kompetenz. Die praktische Durchführung von Prinzipversuchen verdeutlicht den Bedarf all dieser Komponenten bzw. Faktoren, um eine Methode effizient zum Einsatz bringen zu können. Sind diese gegeben, so können Prinzipversuche besonders in frühen Phasen, aufgrund der gezielten Systemreduktion, vielfältig und effizient eingesetzt werden, vor allem in Kombination mit analytischen und numerischen Methoden.

Das durch die praktische Durchführung von Prinzipversuchen gewonnene anwendungsspezifische Know-how, die Erfahrungen in der Handhabung praxisrelevanter Charakteristika sowie der Umgang mit aufgezeigten potentiellen Fehlerquellen repräsentieren konstitutive Bausteine eines systematischen Vorgehensmodells für die Durchführung von Prinzipversuchen. Die folgende Auflistung expliziert die bestimmenden Aspekte:

- **Definition des Informationsbedarfes:** Voraussetzung für die Planung und Konzeption eines Prinzipversuchs ist die eindeutige Definition des versuchstechnisch zu generierenden Informationsbedarfes. Auf dessen Basis erfolgen vor allem die geometrische und mechanische Definition von Prüfkörpern sowie die Gestaltung des Prüfstandes. Eine Validierung, ob die Abstraktion bzw. Versuchsmodellbildung den Bedarf an Informationen abdecken, kann beispielsweise durch ein virtuelles Weiterführen des Entwicklungsprozesses, bei dem die Versuchsergebnisse als einheitenbehaftete Variablen charakterisiert werden, erfolgen.
- **Zulässiger Abstraktionsgrad und Ähnlichkeitsbetrachtung:** Die durch Prinzipversuche generierten Informationen müssen auf das übergeordnete System anwendbar sein. Die Problematik liegt dabei nicht nur in der grundsätzlich erforderlichen Abstraktion des technischen Problems, sondern auch in der Substitution von physikalischen Grundprinzipien. Ist dies der Fall, so können die Versuchsergebnisse nicht bzw. nur eingeschränkt im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses verwertet werden, da die „Ähnlichkeit“ zum realen System nicht gegeben ist (Kapitel 6.1, S. 85ff). Dementsprechend bedarf eine Verifikation des Konzeptes von Prinzipversuchen eine Analyse bzw. zumindest Abschätzung hinsichtlich des zulässigen Abstraktionsgrades und eine Ähnlichkeitsbetrachtung der, sowohl Versuch als auch übergeordnetem System, zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien.
- **Plausibilitätscheck:** Grundsätzlich sollten die Ergebnisse jeder Analysemethode kritisch hinterfragt und auf Plausibilität überprüft werden. Dies gilt vor allem für Untersuchungen bei denen keine validen Vergleichs- respektive Erfahrungswerte existieren, wie beispielsweise bei der Analyse unkonventioneller Werkstoffe (Kapitel 6.2, S. 88ff), einem präferierten Einsatzgebiet von Prinzipversuchen. Ein solcher Plausibilitätscheck, im Sinne einer Verifikation des umgesetzten Prinzipversuchs-Konzeptes, kann basierend auf analytischen (vorwiegend) und numerischen Methoden sowie versuchstechnisch, durch vergleichende Analysen an Objekten mit bekannten Eigenschaften oder eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Mess- bzw. Versuchsverfahren, durchgeführt werden.

- **Umgang mit Streuungen, Störeinflüssen und heterogenen Eigenschaften:** Identisches Verhalten von empirischen Untersuchungen ist, wie von Produkten und Prozessen, in der Realität nicht gegeben. Dementsprechend besitzt jedes Prüfkörperverhalten sowie jede Messung nur eine begrenzte Reproduzierbarkeit. Geringe Streubreiten bedürfen ein Erfassen und entsprechendes Berücksichtigen der bestimmenden Parameter. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass diese bekannt sind. In Hinblick auf die Durchführung von Prinzipversuchen sollte daher, vor allem bei großen Streuungen der Ergebnisse, versucht werden, die ursächlichen Parameter zu identifizieren bzw. das Prüfsystem noch weiter zu reduzieren, um eindeutige Abhängigkeiten zuordnen zu können. Die grundsätzlich inhärente Systemreduktion bei der Gestaltung von Prinzipversuchen sollte dabei stets unter Berücksichtigung möglicher Störeinflüsse abgewickelt werden. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt repräsentiert eine etwaige systematische Heterogenität der zu untersuchenden Eigenschaften, zwischen Prüf- und realem System, z.B. aufgrund der Verwendung divergierender Werkstoffe.
- **Messtechnik:** Laut Hoffmann (2011, S. 21ff) können die weitreichenden Aufgaben der Messtechnik prinzipiell in zwei Zielgruppen unterteilt werden, Erkundungsmessungen als Bestandteil wissenschaftlicher Experimente und Produkt- bzw. Prozessmessungen unter weitgehend bekannten Bedingungen (Tab. 3).

Aufgabe	Charakter der Messung	Strategisches Ziel	Möglichkeitsfeld der Information	Kriterien	Beispiel
Erkundungsmessung	oft nur einmalig	Analyse, Quantifizierung	wenig oder nur teilweise bekannt	große Informationswege, Speicherung, etappenweise Auswertung	Grundlagenforschung
	beliebig wiederholbar (Testmessung)	Festlegung von Nenn- und Grenzwerten	weitgehend bekannt, Störungen sind möglich	Programmverarbeitung, Bewertung manuell	Forschung und Entwicklung
Prozessmessung	ständig, evtl. zu diskreten Zeitpunkten	Istdaten im Nennbereich, Störerkennung	bekannt	Programmverarbeitung, ggf. Eingriff	Prozessüberwachung
		Einfahren und Halten optimaler Zustände		Programmverarbeitung	Prozessoptimierung
Produktmessung (Prüfung)	zu diskreten Zeitpunkten	Parameterwandlung, Fehlerdiagnose, Fehlerreduktion (Nullfehlerproduktion)	vollständig bekannt	Programmverarbeitung, Sortierung (Klassierung)	Qualitätskontrolle, Produktionssteuerung

Tabelle 3: Aufgabengebiete der Messtechnik (vgl. Tabelle 1.3: Hoffmann, 2011, S. 21)

Messungen im Rahmen von Prinzipversuchen stellen typischerweise Suchprobleme dar, bei denen Messgröße, Messbereich und das Messsystem durchaus hinreichend, die Einflussgrößen bzw. deren Zusammenhänge jedoch oftmals wenig bekannt sind und entsprechen somit Erkundungsmessungen. Trotz des in der Regel hohen Abstraktionsgrades von Prinzipversuchen, werden zum Teil hohe Anforderungen an die Messtechnik gestellt (Kapitel 6.3, S. 93ff). Hierbei können die grundsätzliche Eignung und Verfügbarkeit von Sensorik, etc. sowie die erforderliche Kompetenz hinsichtlich Gestaltung und Aufbau der Messkette limitierende Faktoren darstellen, welche es bereits bei der Versuchsmodellbildung zu berücksichtigen gilt.

-
- **Synchronisation bei parallelem Methodeneinsatz:** Der parallele Einsatz von unterschiedlichen Methoden, in frühen Phasen eines Entwicklungsprozess, entspricht einem möglichen Ansatz Front-Loading praktisch umzusetzen (Kapitel 5.1, S. 75ff). Prinzipversuche können in diesem Kontext als gezielte physische Simulationen virtuelle Methoden unterstützen, bzw. Teil einer hybriden Analyse, Verifikation oder Absicherung sein. Ein solches Vorgehen bedingt jedoch einen strukturierten und durchgängigen Prozess der Synchronisation, beispielsweise im Umgang mit Adaptierungen, neuen Versionen oder spezifischen Varianten. Die Schwierigkeit liegt dabei vor allem in der organisatorischen Implementation dieser Synchronisierungsprozesse in die operative Entwicklungsarbeit.

Die aufgelisteten Punkte stehen untereinander zum Teil in wechselseitigen Beziehungen und müssen somit global betrachtet werden.

Aufgrund der bei Prinzipversuchen intendierten Analyse isolierter Effekte unter definierten Einflussparametern, kann zudem die Konzeptionierung eines stufenweise erweiterbaren Prüfaufbaus zweckmäßig sein.

7 Integratives Prozessmodell zur methodischen Durchführung von Prinzipversuchen

Die Definition eines systematischen Prozessmodells zur Durchführung von Prinzipversuchen erfolgt gemäß der in Kapitel 1 vorgestellten wissenschaftlichen Vorgehensweise (Abb. 3), basierend auf einer Analyse spezifischer Einflüsse und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf.

Die nachfolgenden Ausführungen repräsentieren eine Deskription und Erörterung des Prozessmodells, als Ergebnis eines Syntheseprozesses aus essentiell eingestuftem theoretischen und praktischen Aspekten.

7.1 Deduktive und induktive Schlüsse als Synthesebasis

Einen etablierten Ansatz zur Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse stellt der kombinierte Einsatz von Deduktion und Induktion, als allgemeine Methoden der Logik, dar. Deduktion (auch als Top-Down-Methode bezeichnet) charakterisiert in der Logik eine Schlussfolgerung von gegebenen Prämissen auf stringente Wirkungen. Demgegenüber repräsentiert die Induktion (auch als Bottom-Up-Methode bezeichnet) einen abstrahierenden Schluss aus Beobachtungen auf globale Erkenntnisse. Abbildung 86 stellt dies schematisch dar.

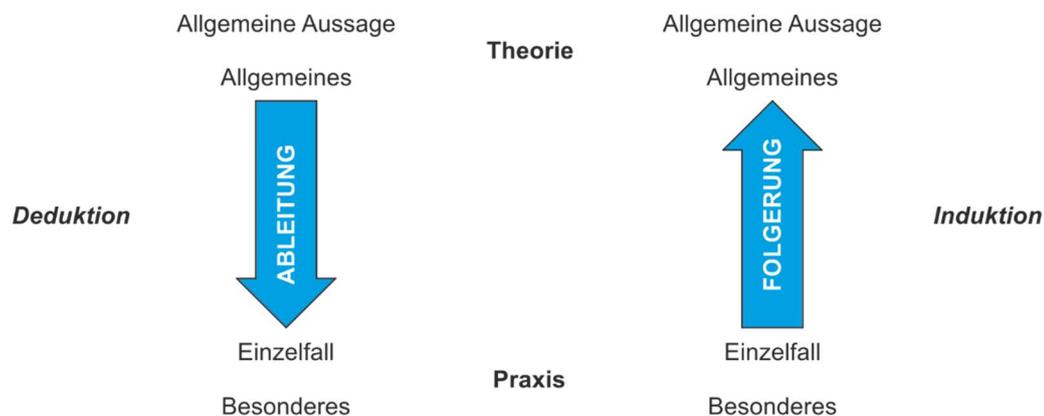


Abbildung 86: Schematische Darstellung von Deduktion und Induktion

Entsprechend einer deduktiven Schlussfolgerung, basierend auf den Ergebnissen der Analyse spezifischer Vorgehensmodelle (Kapitel 4, S. 53ff), ergibt sich für den konkreten Anwendungsfall vor allem die explizite Darstellung einer impliziten Vorgehenslogik, im Sinne einer möglichst konkreten Handlungsanweisung, als essentieller Aspekt eines spezifischen Prozessmodells für Prinzipversuche.

Die Bereitstellung einer stringenten und nachvollziehbaren Abfolge stellt dabei eine implizite Anforderung bei der Definition eines Prozessmodells dar.

Diese Forderung begründet sich durch die Absicht einen darstellbaren und überzeugenden Mehrwert zu generieren und somit eine notwendige Akzeptanz zu erreichen. Des Weiteren können die alleinige Definition eines systematischen Prozessablaufs und eine damit einhergehenden Strukturierung der Problemstellung bereits hilfreich bei der Problemlösung sein.

Bestrebungen diesen Bedürfnissen gerecht zu werden spiegeln sich in der Verwendung von heuristischen Ansätzen, wie beispielsweise der Systemtechnik, als methodische Basis spezifischer Vorgehensmodelle für Analysemethoden wider (Kapitel 4.4, S. 71ff). Der damit einhergehende immanent hohe Abstraktionsgrad führt jedoch erfahrungsgemäß zu Problemen und offenen Fragestellungen bei der praktischen Anwendung. Eine folgerichtig erforderliche Konkretisierung ist zumeist, aufgrund der intendierten globalen Einsatzbarkeit des Vorgehensmodells für sämtliche Ausprägungen einer Methode, nur bedingt möglich.

Die Zielsetzung liegt für die gegenständliche Aufgabenstellung daher in der Definition einer präskriptiven Prozessfolge für eine bestimmte Methodenausprägung, welche eine anwendungsspezifische Adaptierung und Detaillierung einer allgemeingültigen Problemlösungslogik entspricht bzw. einer solchen zuordenbar ist.

Weitere essentielle Aspekte ergeben sich aufgrund induktiver Folgerungen aus Erkenntnissen und Erfahrungen realisierter Prinzipversuche (Kapitel 6.5, S. 107ff).

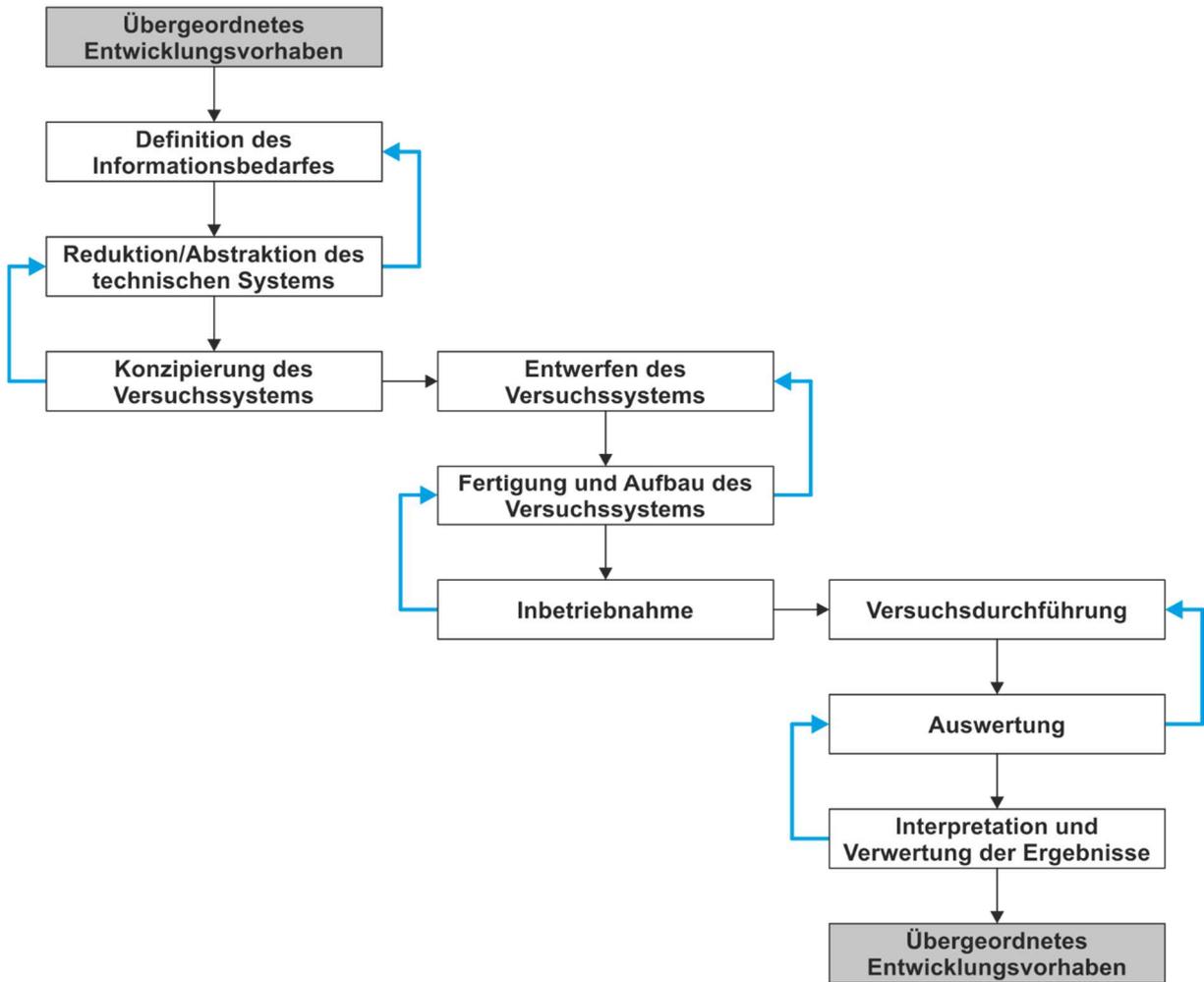
Insbesondere beinhaltet die Konzeptionierung und Gestaltung von Prüfkörper und -umgebung zusätzliches Fehlerpotential. Aufgrund der für Prinzipversuche charakteristischen Systemreduktion, zur Analyse gezielt isolierter Effekte, resultiert der Bedarf einer sogenannten Ähnlichkeitsbetrachtung. Deren Zielsetzung liegt in einer spezifischen Überprüfung ob die systembedingten physikalischen Effekte bzw. Grundprinzipien des übergeordneten Entwicklungsvorhabens auch tatsächlich durch das Versuchskonzept abgebildet werden.

Dementsprechend stellt die Realisierung der Versuchsaufgabe eine eigene Entwicklungsaufgabe dar, wodurch die Durchführung eines Versuchs auch stets zu einem Test des Prüfstands selbst wird. Wesentlich hierbei ist es, mittels einer konsequenten Verifikation und kontinuierlichen Überprüfung der generierten Informationen auf Plausibilität, zu evaluieren, ob das Verhalten des Versuchsträgers systemimmanent, wie angestrebt, oder nur prüfstandsimmanent ist.

7.2 Das Prozessmodell

Das in Abbildung 87 dargestellte Vorgehensschema zur Durchführung von Prinzipversuchen repräsentiert das Ergebnis eines auf deduktiven und induktiven Schlussfolgerungen basierenden Definitionsprozesses.

Die Struktur des Schemas wird dabei durch die drei elementaren Phasen **Systementwicklung**, **Systemrealisierung** und **Systembetrieb** gebildet, welche jeweils eine iterative Abfolge einzelner Operationen bzw. Schritte beinhaltet. Diese zentralen Elemente werden durch erforderliche begleitende Aktivitäten ergänzt und somit das Prozessmodell komplettiert.



„Validierungszyklus“

Überprüfung ob generierbare Informationen dem spezifischen Bedarf entsprechen

„Die richtigen Dinge tun“

„Verifikationszyklus“

Überprüfung ob generierte Informationen die erwarteten Ergebnisse widerspiegeln

„Die Dinge richtig tun“

„Nutzungszyklus“

Überprüfung der Analyse zur optimalen Unterstützung der übergeordneten Entwicklung

„Die Dinge richtig nutzen“

Begleitende Prozesse:

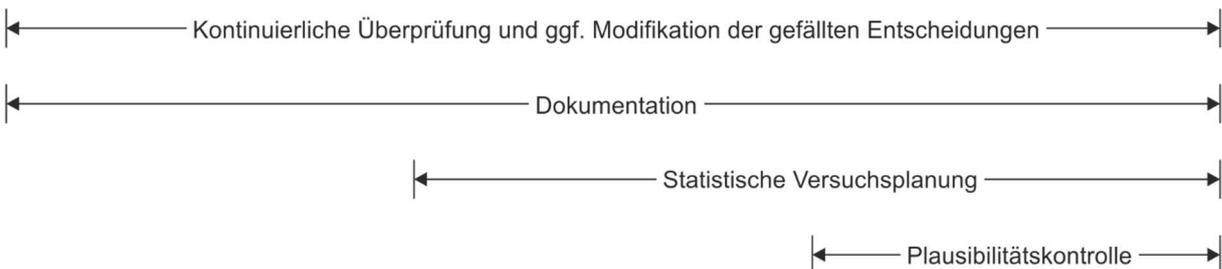


Abbildung 87: Integratives Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen

7.2.1 Phase 1 Systementwicklung: Validierungszyklus

Der Ursprung jedes Methodeneinsatzes liegt in einem identifizierten Informationsbedarf und einer darauf basierenden Methodenauswahl. Die Definition der zu generierenden Informationen, ausgehend von einem übergeordneten Entwicklungsvorhaben, repräsentiert somit einerseits die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer spezifischen Methode und andererseits wird dadurch bereits das Ziel der Methodenanwendung definiert. Abbildung 88 stellt dies grafisch dar.

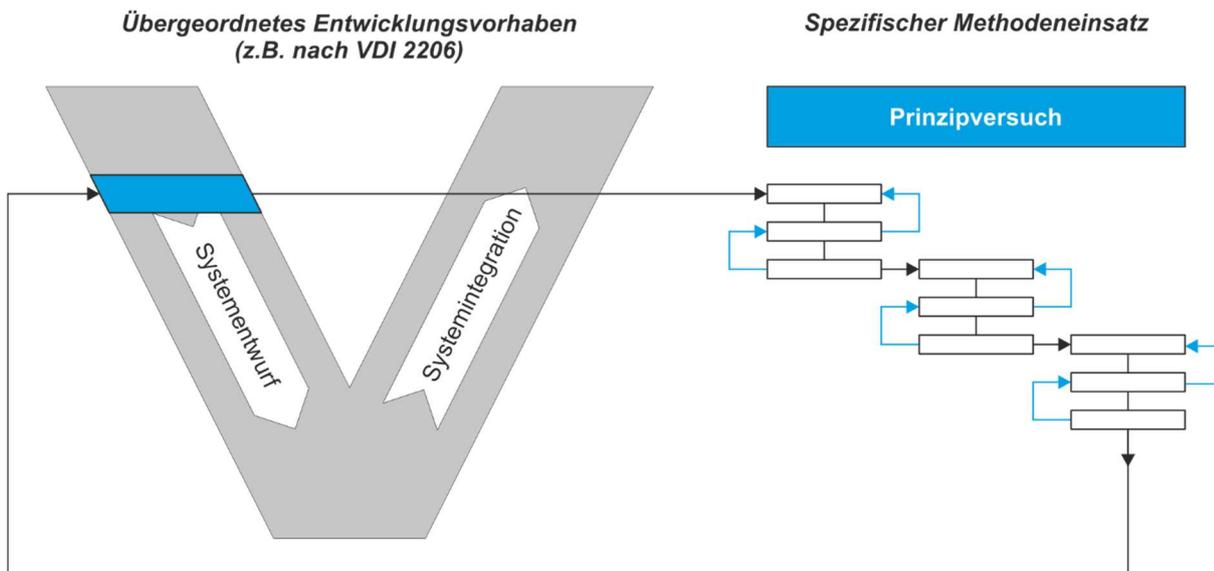


Abbildung 88: Informationsbedarf eines übergeordneten Entwicklungsvorhabens als Basis eines spezifischen Methodeneinsatzes

Die empirische Untersuchung gezielter isolierter physikalischer Effekte erfordert notwendigerweise deren Definition. Eine direkte Ableitung eines physikalischen Effektes aus der lösungsneutralen Funktionsstruktur (Kapitel 2.3.2, S. 24) des übergeordneten Entwicklungsvorhabens ist nicht zwangsläufig möglich, sondern nur, wenn Rahmenbedingungen für die Funktionserfüllung diesen vorgeben. Der Zusammenhang zwischen (Teil-)Funktionen, physikalischen Effekten und Wirkprinzipien (als Gemeinsamkeit von physikalischen Effekten bzw. Arbeitsweisen sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen) wird in Abbildung 89 dargestellt.

Die **Definition des Informationsbedarfs** repräsentiert, im Sinne einer Zielformulierung, somit die Ausgangsbasis eines bei Prinzipversuchen immanenten Bedarfs einer Versuchssystementwicklung.

Die anschließende **Reduktion des technischen Systems** entspricht entwicklungsmethodisch der Aufstellung einer spezifischen Funktionsstruktur desselben und einer daraus abgeleiteten lösungsneutralen Darstellung des versuchstechnisch umzusetzenden Zielsystems. Dieser Schritt dient der systematischen und für Prinzipversuche charakteristischen Reduktion der Komplexität und detailliert die Rahmenbedingungen der nachfolgenden und darauf aufbauenden Lösungssuche.

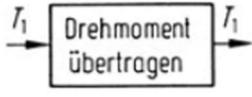
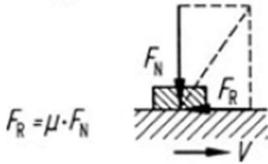
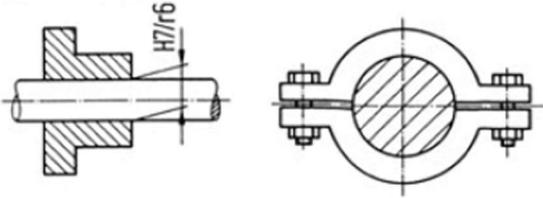
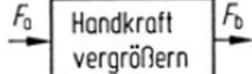
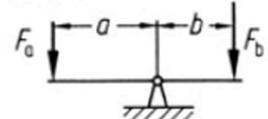
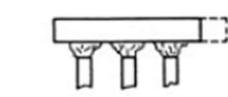
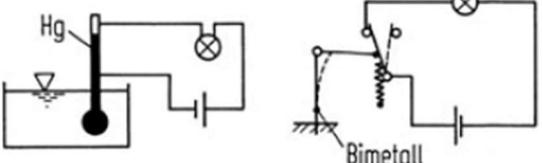
Teilfunktionen	Physikalische Effekte	Wirkprinzipien für eine Teilfunktion (Phys. Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale)
	<p>Reibungseffekt</p>  $F_R = \mu \cdot F_N$	
	<p>Hebeleffekt</p>  $F_0 \cdot a = F_b \cdot b$	
	<p>Ausdehnungseffekt</p>  $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta S$	

Abbildung 89: Erfüllen von Teilfunktionen durch Wirkprinzipien, die aus physikalischen Effekten sowie aus geometrischen und stofflichen Merkmalen aufgebaut werden (vgl. Abb. 4.9: Feldhusen/Grote Hrsg., 2013, S. 247)

Im Rahmen der **Konzipierung des Versuchssystems** gilt es Varianten für dessen technische Umsetzung, inkl. potentieller Messverfahren, zu erarbeiten und anhand definierter Kriterien auf deren Eignung zu klassifizieren. Diese Aktivität kommt der Bearbeitung eines Optimierungsproblems gleich. In Abhängigkeit und unter Berücksichtigung allgemeiner und unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen, wie etwa Verfügbarkeit von bzw. Zugang zu Fertigungsverfahren und Sensorik, gilt es das Versuchssystem im Sinne eines bestmöglichen Kompromisses zwischen zulässigem Abstraktionsgrad und gewünschter bzw. notwendiger Einschränkung der Parameteranzahl bereitzustellen.

Beispiele hierfür wären die Abbildung einer räumlichen Problemstellung durch ein ebenes Versuchssystem oder eine potentielle Reduktion von Freiheitsgraden. Dadurch könnte der erforderliche Aufwand, für die Versuchssystemrealisierung als auch dessen Betrieb, entsprechend verringert werden, sofern diese oder ähnliche Maßnahmen den zulässigen Abstraktionsgrad nicht überschreiten.

Die iterativ gestaltete Abfolge der in diesem Abschnitt behandelten Prozessschritte definiert den ersten von drei spezifischen Evaluierungszyklen des gegenständlichen Vorgehensmodells. Die Zielsetzung des sogenannten **Validierungszyklus** liegt in der frühestmöglichen Überprüfung ob die generierbaren Informationen dem identifizierten Bedarf entsprechen. Die konkrete Durchführung dieser Validierung stellt eine theoretische Ähnlichkeitsbetrachtung dar. Dabei gilt es zu überprüfen, ob das entwickelte Prinzipversuchskonzept die tatsächliche Erfassung der physikalischen Effekte des übergeordneten Entwicklungsvorhabens mit den erforderlichen physikalischen Größen ermöglicht.

Methodisch repräsentiert somit das validierte Konzept des Prinzipversuchs die Voraussetzung für den Übergang zur Systemrealisierung.

7.2.2 Phase 2 Systemrealisierung: Verifikationszyklus

Die Phase Systemrealisierung setzt sich grundsätzlich aus den Arbeitsabschnitten Entwurf, Fertigung und Aufbau sowie Inbetriebnahme des Versuchssystems zusammen.

Allgemein beinhaltet die Entwurfsphase die Definition der Geometrie, Baugruppen- und Teileanordnungen mit Fügestellen, Auswahl und Auslegung von Norm- und Zukaufteilen sowie die Werkstoffauswahl. Der finale Entwurf enthält somit alle für die Ausarbeitung der Fertigungsunterlagen erforderlichen Festlegungen hinsichtlich Formen, Abmessungen, Oberflächen, Toleranzen und Werkstoffen (VDI 2221, 1993, S. 19).

Dementsprechend gilt es diese Informationen auch im Rahmen des **Entwerfens des Versuchssystems**, für den eigentlichen Prüfkörper und dessen Umgebung bzw. einem evtl. erforderlichen Gegenpart, zu erarbeiten. Einen essentiellen und nicht zu vernachlässigenden Aspekt stellt die Berücksichtigung von gestaltbeeinflussenden Anforderungen seitens der Messtechnik, z.B. notwendige Aufnahmen oder das Vorsehen von Freiraum für die Applikation von Sensoren, dar. In diesem Zusammenhang gilt es auch etwaige Störeinflüsse auf das zu analysierende Versuchssystem zu diskutieren.

Der Abschnitt **Fertigung und Aufbau des Versuchssystems** stellt den Prozess der physischen Umsetzung des Entwurfs dar. Hierbei gilt es vor allem die bei der Konzeptionierung und konstruktiven Gestaltung vordergründige Abbildung eines für das übergeordnete Entwicklungsvorhaben charakteristischen Versuchssystems auch real umzusetzen.

Ein praxisrelevantes Fehlerpotential stellt in diesem Kontext die Durchführung von Änderungen ohne entsprechende Validierung, etwa aus Gründen einer möglichen Reduktion des Aufwands, dar. So könnte beispielsweise der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren einen Wechsel des ursprünglich für den Prüfkörper definierten Werkstoffs bedingen.

Sollte das Ziel eines Prinzipversuchs nicht die Untersuchung eines spezifisch gestalteten Prüfkörpers sondern die empirische Beschreibung von Materialverhalten sein, gilt es grundsätzlich sicherzustellen, dass die Konditionierung des Probematerials jener der realen Anwendung entspricht (vgl. Kapitel 6.2). Allerdings ist es in weiterer Folge möglich, aufgrund des inhärenten Abstraktionsgrades von Prinzipversuchen, bewusst empirische Analysen von Konditionierungen bzw. allgemein unter Rahmenbedingungen durchzuführen, welche gezielt über jene der realen Anwendung hinausgehen.

Das Ergebnis dieses Prozessschritts sollte ein kompletter Versuchsaufbau, bestehend aus Prüfkörper und -umgebung inklusive applizierter Mess- und im Bedarfsfall Regelungstechnik, sein.

Komplettiert wird die Phase der Systemrealisierung durch die **Inbetriebnahme** des fertig montierten Prinzipversuchs. Diese impliziert eine Kalibrierung, die Durchführung von Testversuchen bzw. -messungen sowie eine idealerweise kontinuierliche Nachkalibrierung.

Neben der dadurch gewährleisteten Sicherstellung der Funktionalität des Versuchsaufbaus, sollte an dieser Stelle ebenfalls eine Plausibilitätskontrolle, zur Überprüfung der Größenordnung der gemessenen bzw. allgemein empirisch ermittelten Werte, durchgeführt werden. Die Vorgehensweise einer Plausibilitätskontrolle entspricht grundsätzlich einem Vergleich. Als mögliche Quellen für den oder die Vergleichswerte kommen dabei in Frage (Joch, 2007, S. 140):

- Literatur
- Erfahrungswerte
- Berechnungen
- Mehrfache Messung unter Anwendung unterschiedlicher Messprinzipien (nach Möglichkeit), eventuell auch durch indirekte Messungen
- Einsatz von Placebo-Sensoren, welche auf die Messgröße nicht sensitiv sind und daher nur „Störungen“ aufzeichnen

Die Charakteristik von Prinzipversuchen erlaubt zuweilen keine direkte Möglichkeit einen solchen Vergleich anzustellen, z.B. bei der Analyse von speziell konditionierten Werkstoffen. In solchen Fällen repräsentiert die Einbindung von Experten und somit der Rückgriff auf personenbezogenes, implizites Wissen eine Alternative den Prinzipversuchsaufbau dennoch auf Plausibilität zu überprüfen.

Eine Rückkoppelung des fertig aufgebauten, kalibrierten und auf Plausibilität überprüften Prinzipversuchs bis zum Entwurf entspricht einer Verifikation der Systemrealisierung. Die Zielsetzung dieses **Verifikationszyklus** liegt in einer Evaluierung, ob die tatsächlich generierten Informationen die erwarteten und intendierten Ergebnisse widerspiegeln.

7.2.3 Phase 3 Systembetrieb: Nutzungszyklus

Die eigentliche Generierung der fehlenden Informationen erfolgt mittels des validierten und verifizierten Prinzipversuchs im Rahmen der **Versuchsdurchführung**. Erst in diesem fortgeschrittenen Stadium einer Prinzipversuchsdurchführung sind das Erkennen von realen Streubreiten und damit eine Einschätzung der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen sowie daraus ableitbare Schlussfolgerungen möglich.

Bei der Versuchsdurchführung sollten aus organisatorischer Sicht die bisher beteiligten Personen ebenfalls involviert und idealerweise vor Ort sein. Vor allem für den Fall unerwarteter Ereignisse während des Versuchsbetriebs können dann implizit erworbenes Wissen und spezifische Sinneseindrücke zusätzliches Potential im Diskussionsprozess bieten. Diese Vorgehensweise entspricht einer bewussten Ergänzung des expliziten Fakten-, Methodik- und Methodenwissens um erfahrungsbasiertes Anwendungswissen (Bader/Lang, 2015, S. 324ff).

Die anschließende **Auswertung** der Versuchsergebnisse, welche typischerweise in Tabellen- oder Diagrammform erfolgt, kann oftmals das Prüfkörperverhalten nicht vollständig beschreiben (Bader, 2014, S. 60). Speziell komplexere Zusammenhänge, im Sinne mehrerer relevanter Parameter welche durchaus auch bei Prinzipversuchen auftreten können, erfordern mehrere Darstellungen oder die Nutzung zusätzlicher Formen der Beschreibung, wie beispielsweise subjektive bzw. semiquantitative Klassifizierungen.

An dieser Stelle sei nochmals auf die Bedeutung der Anwesenheit während des Prüfbetriebs verwiesen, um eine ganzheitliche Erfassung des Prüfkörperverhaltens sicherzustellen.

In welcher Art und Weise die Auswertung letztlich erfolgt wird vor allem durch die **Interpretation und Verwertung der Ergebnisse** bestimmt. Sollen die empirischen Resultate nicht als abgeschlossene Informationen verwendet werden, sondern als Input bzw. in Kombination mit anderen Analysemethoden, gilt es die erforderliche Kompatibilität sicherzustellen respektive Synchronisierungsoperationen vorzusehen.

Ähnlich dem Validierungs- und Verifikationszyklus, werden auch die Prozessschritte im Rahmen der Systembetriebsphase als Evaluierungszyklus interpretiert. Der sogenannte **Nutzungszyklus** dient vor allem der Qualitätssicherung der Versuchsdurchführung, welche insbesondere bei unerwarteten Ergebnissen überprüft und kritisch hinterfragt werden sollte.

7.2.4 Begleitende Prozesse

Abgerundet werden die drei elementaren Phasen und deren zugehörige Tätigkeiten, welche in Summe eine integrative Prozessfolge zur Durchführung von Prinzipversuchen aufspannen, durch implizite bzw. wiederkehrende Handlungen, im Sinne von begleitenden Prozessen.

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 behandelt nehmen die Kenntnisse über ein technisches System über deren Lebensphasen kontinuierlich zu. Dieser grundsätzliche Verlauf resultiert vielfach in einer Notwendigkeit Modifikationen, beispielsweise durch die Identifikation bislang unbekannter Einflussfaktoren, Schnittstellen oder Interdependenzen, durchführen zu müssen.

Basierend auf diesem Umstand sollte der gesamte Prozess einer Prinzipversuchsabwicklung von einer **Kontinuierlichen Überprüfung und ggf. Modifikation der gefällten Entscheidungen** begleitet werden. Durch diese bewusste Entscheidungsbewertung können unter Umständen erforderliche Änderungen dennoch frühzeitig und somit mit möglichst geringem Aufwand vollzogen werden.

Im Kontext Prinzipversuch sollte eine parallele **Dokumentation** vor allem die getroffenen Entscheidungen und deren Grundlagen sowie unerwartete Ereignisse bei der Versuchsdurchführung schlüssig und nachvollziehbar darstellen.

Hierbei könnten spezifisch gestaltete Formblätter, beispielsweise in Anlehnung an die vorgestellte Parametercheckliste zur Eigenschaftsfrüherkennung (Abbildung 48), einen Beitrag zur Systematisierung und Rationalisierung leisten.

Identisches Verhalten von Produkten und Prozessen bzw. idente Messwerte, unter anscheinend gleichen Bedingungen, sind in der Realität nicht gegeben. Je besser die Einflüsse auf das Systemverhalten durch die bestimmenden Parameter bekannt ist, diese erfasst und berücksichtigt werden, desto geringer werden Streuungen sein. Durch den Einsatz **Statistischer Versuchsplanung** ist es möglich den erforderlichen Versuchsumfang, d.h. die Anzahl an Einzelversuchen, methodisch zu minimieren.

Das Ergebnis statistischer Versuchsplanung und deren Auswertung ist ein empirisches Modell, welches den Zusammenhang zwischen den untersuchten Faktoren und den erfassten Zielgrößen quantitativ beschreibt (Kleppmann, 2013, S. 6). Die Effekte von Parameteränderungen auf das Systemverhalten, im Sinne eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs, können jedoch nur dann erkannt werden, wenn die spezifischen Parameter Teil des Versuchsplans sind.

Allerdings können sich die Bedingungen während des Versuchsbetriebs auch ändern und, neben prinzipiell immer möglichen Messfehlern, zu unerwarteten oder falschen Ergebnissen führen. Aus diesem Grund sollten Versuchsdurchführungen bzw. allgemein die Phase des Systembetriebs stets von einer **Plausibilitätskontrolle** aller Ergebnisse begleitet werden. Demzufolge stellt die Plausibilitätskontrolle kein singuläres Ereignis dar, sondern einen kontinuierlichen Prozess ab der Inbetriebnahme des Prinzipversuchsprüfstands.

7.3 Grenzen und potentielle Problemfelder

Die typischerweise vorherrschende Dynamik sich ändernder Ziele und Anforderungen, unklare Randbedingungen und ein begrenzter Zeitrahmen repräsentieren die allgemeinen Rahmenbedingungen eines Methodeneinsatzes in frühen Entwicklungsphasen. Daneben werden an jede Methode pauschale Kriterien gestellt, um einerseits deren Einsatz zu legitimieren und andererseits eine entsprechende Aussagekraft der Ergebnisse sicherzustellen.

Für empirische Untersuchungen definierten Bortz/Döring (2002, S. 193ff) sowie Lienert/Raatz (1998, S. 29ff) die in Abbildung 90 dargestellten prinzipiellen Mindestkriterien.

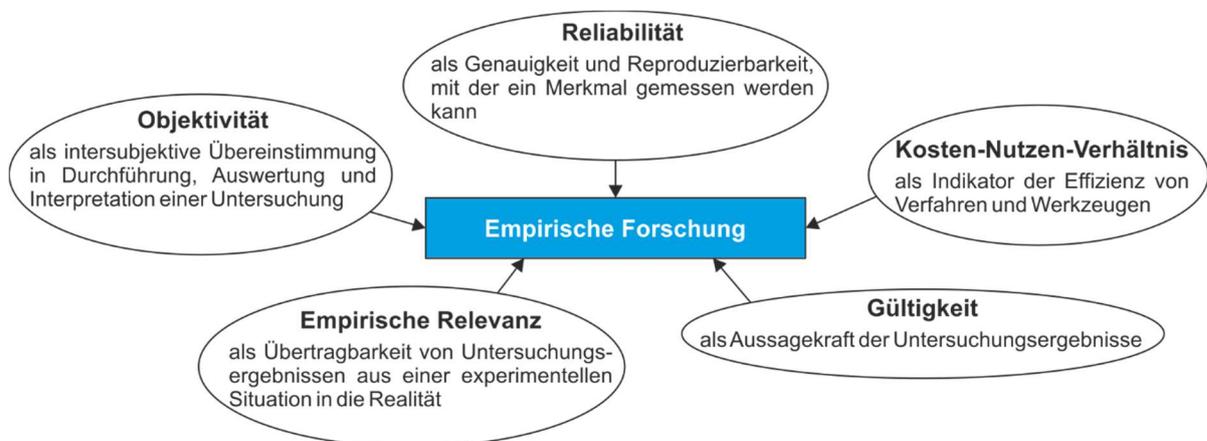


Abbildung 90: Gütekriterien für empirische Forschung (vgl. Abbildung 4-1: Bender, 2004, S.118)

Mit dem vorgestellten Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen wurde versucht einen systematischen und holistisch orientierten Ansatz zu definieren, um diesen Kriterien gerecht zu werden.

Allerdings repräsentiert vor allem das von Bender (2004, S. 119) als empirische Relevanz bzw. „externe Validität“ bezeichnete Attribut ein potentielles Problemfeld und in weiterer Folge eine mögliche Grenze eines zweckmäßigen Einsatzes von Prinzipversuchen.

Den dafür maßgeblichen Abstraktionsgrad gilt es dabei sowohl qualitativ, im Sinne einer zulässigen Reduktion von Parametern, als auch quantitativ, d.h. innerhalb welcher Grenzen die Systemantworten von Parameteränderungen für das Gesamtsystem repräsentativ sind, zu definieren bzw. zumindest abzuschätzen. Dementsprechend kann ein systematisch reduziertes Versuchssystem zusätzlichen Restriktionen in Bezug auf dessen Validität unterliegen. Aufgrund ihrer Charakteristik erlauben Prinzipversuche im Vergleich zu „klassischen“ Versuchen in der Regel eine einfachere Parametervariation, sofern spezifische Änderungen bei definierten Prüfkörpern überhaupt möglich sind, und diese über einen größeren Bereich. Eine erforderliche zahlenmäßige Einschränkung des Gültigkeitsbereiches des Prinzipversuchsaufbaus würde diesen Vorteil limitieren.

Aus diesem Kontext heraus könnte auch ein mögliches argumentatives Spannungsfeld für Entscheidungsträger entstehen. Die Überprüfung ob eine entsprechende empirische Relevanz gegeben ist erfolgt grundsätzlich auf der nächsten Systemebene. Betrachtet man wiederum den Zugversuch, als standardisierter Prinzipversuch (Kapitel 3.3, S. 50f), so liefert dieser empirische Vergleichswerte für ein als Stand der Technik etabliertes Verfahren zur Festigkeitsbestimmung von Bauteilen. In diesem Fall wird die empirische Relevanz des Zugversuchs nicht bzw. nicht mehr in Frage gestellt. Unter idealen Umständen werden somit die in sich validierten und verifizierten Ergebnisse eines Prinzipversuchs (Kapitel 7.2, S. 113) direkt in anerkannten Methoden und Verfahren verwertet oder als Input zu deren Optimierung herangezogen.

Ist die Nutzung der generierten Informationen jedoch nicht in dieser Form möglich, so bleibt, wie bei jeder auf Modellvorstellungen beruhenden Methode, ein gewisses Risiko ob und innerhalb welcher Grenzen die Resultate des Prinzipversuchs repräsentativ sind.

7.4 Reflexion

Die Definition des Vorgehensmodells für die Durchführung von Prinzipversuchen basierte auf einem Identifizieren, Aufgreifen und Implementieren von positiven sowie im Erkennen und Abschwächen bzw. Vermeiden von negativen Aspekten, als Synthese aus Theorie und Praxis.

Dabei wurde in erster Linie angestrebt den im Vergleich zu anderen entwicklungsmethodischen Prozessmodellen hohen Abstraktionsgrad gezielt zu reduzieren und die, aufgrund der charakteristischen Versuchsausprägung erforderlichen, anwendungsspezifischen Besonderheiten eindeutig darzustellen. Vor allem das erst zu definierende Versuchssystem, welches bei „klassischen“ Versuchen zumeist eindeutig definiert ist, führt dazu, dass der eigentlichen Durchführung eines Prinzipversuchs ein eigenes Entwicklungsvorhaben mit speziellen Anforderungen vorausgeht.

Wesentliches Attribut und Alleinstellungsmerkmal des Prozessmodells ist die Untergliederung der schrittweisen Vorgehensweise in drei spezifische Evaluierungszyklen, im Sinne von aufbauenden Qualitätsstufen.

Durch die systematische und durchgängige Kombination von Validierung und Verifikation, von der Konzipierung des Versuchssystems bis zur Verwertung der generierten Informationen, ist es möglich ein Maximum an Integrationsfähigkeit sicherzustellen, um späte Änderungen und Fehlinterpretationen weitgehend zu vermeiden.

Aufgrund der engen Zusammenhänge zwischen Umfang, Qualität, Terminen und Kosten, als einen Projekterfolg maßgeblich determinierende Faktoren, können erforderliche korrigierende Maßnahmen, vor allem wenn diese in einem fortgeschrittenen Stadium erfolgen, große Auswirkungen auf das Gesamtergebnis des Entwicklungsvorhabens haben.

Abbildung 91 stellt die globale Balance dieser Faktoren für die Fälle einer nachträglichen Erhöhung des Leistungsumfangs bzw. einer intendierten Reduktion des Aufwands dar.

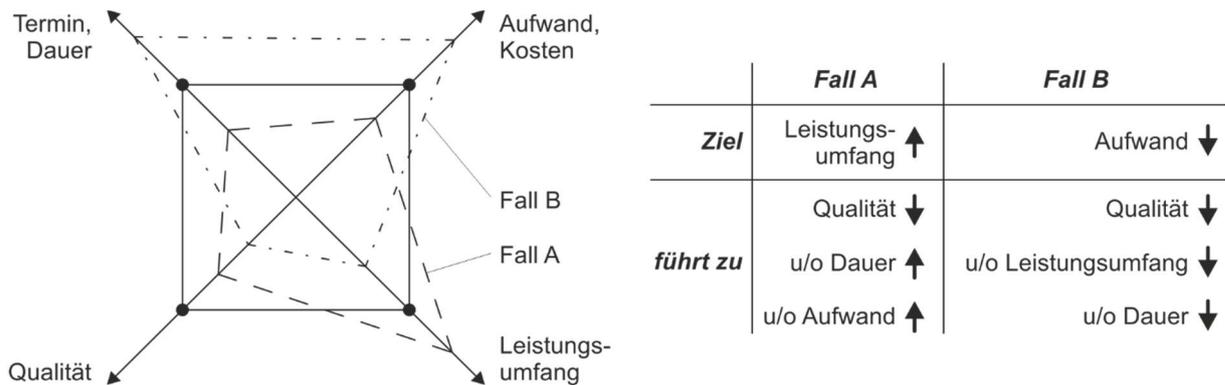


Abbildung 91: Das „Teufelsquadrat“ – Zusammenhänge von Quantität, Qualität, Dauer und Aufwand in einem Projekt (vgl. Abb. 3.6: Daenzer/Huber Hrsg., 2002, S. 251)

Parallel zur Bearbeitung inhaltlicher Problemstellungen erfordert die Durchführung eines Prinzipversuchs daher eine entsprechende Einbettung in ein Gesamtprojekt-Management, welches im Wesentlichen die Planung und Disposition der Ressourcen sowie die Organisation der Informationsflüsse und Entscheidungsprozesse beinhaltet.

Das vorgestellte integrative Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen repräsentiert eine offene Systematik und sollte entsprechend unternehmens- bzw. industriespezifischer Bedürfnisse adaptiert werden. Die konsequente Aktualisierung des Modells mit erfahrungsbasiertem Wissen führt zu einem kontinuierlichen Optimierungsprozess und ermöglicht eine Überführung von personenbezogenem Wissen in Knowhow des Unternehmens. Diese Anwendungsempfehlung repräsentiert die eigentliche Basis des Brückenschlags zwischen einer grundsätzlichen Vorgehenslogik und einer akzeptierten, spezifischen und somit angewendeten Methode der Produktentwicklung.

8 Fazit und Perspektive

Die effizientere Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen repräsentiert die finale Zielsetzung einer konsequenten Vorverlagerung von Eigenschaftsanalysen.

Ganzheitlich betrachtet bedarf eine frühzeitige Generierung qualitativ hochwertiger und abgesicherter Informationen über Systemeigenschaften einen effektiven Mix von direkt vernetzten Methoden.

Die Entwicklungsmethodik als Gesamtheit von Vorgehensweisen bzw. Prozessen und Methoden stellt dabei das Bindeglied zwischen explizitem technischen Wissen und dem „Faktor Mensch“ dar (Abb. 92).

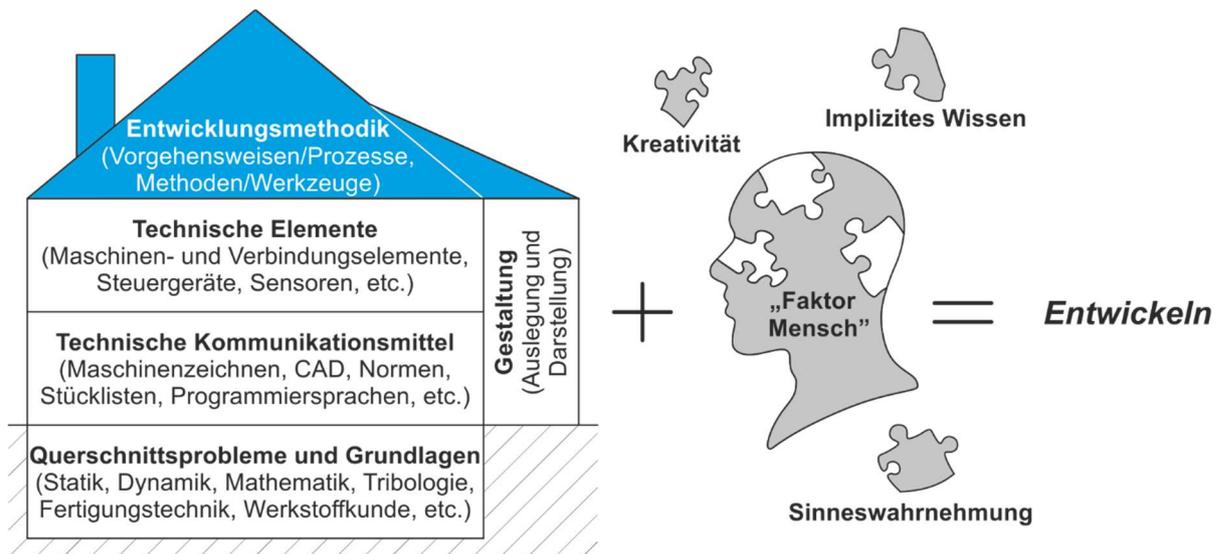


Abbildung 92: Entwicklungsmethodik als Bindeglied zwischen technischem Wissen und dem „Faktor Mensch“ (in Anlehnung an Bild 14.13: Lechner/Naunheimer, 1994, S. 376)

Erfolgreiches Entwickeln benötigt allerdings nicht nur Intuition und Methodik (Kapitel 2.2, S. 17) als singuläre Elemente, sondern vielmehr deren Synthese.

Zukünftig wird an die Entwicklungsmethodik daher vermehrt der Anspruch gestellt werden Vorgehensweisen bzw. Prozesse direkt mit Methoden sowie deren Anwendung zu verknüpfen, um eine Durchgängigkeit von der Planungs- und Steuerungsebene bis zur operativen Ebene konsequent abzubilden. Eine essentielle Basis hierfür repräsentieren integrative Methoden.

Die Beschreibung von Systemeigenschaften in frühen Entwicklungsphasen, möglichst effizient und mit geringem Ressourceneinsatz, und auch deren Absicherung, legt vielfach den Einsatz virtueller Methoden nahe, wobei dieser jedoch auch mit Limitierungen behaftet ist. Versuche werden, obwohl sie in vielfältigen Ausprägungen in der Produktentwicklung einsetzbar sind (Kapitel 3.1, S. 36ff), zunehmend zu einer Verifikationsmethode reduziert, wobei ein Trend zu beobachten ist Empirik durch Numerik zu substituieren.

Entwicklungsmethodisch wird der spezifische Einsatz von Versuchen in frühen Entwicklungsstadien, als orientierende Eigenschaftsanalysen, vor allem von Lindemann (2009, S. 166f) und Ehrlenspiel/Meerkamm (2013, S. 524f) propagiert (Kapitel 4.3, S. 71). Deren weitestgehend kongruente Ausführungen wurden im Sinne einer wissenschaftlichen Basis aufgegriffen und weiter detailliert.

Gerade in frühen Entwicklungsphasen sollen durch den Einsatz empirischer Methoden zur gezielten Untersuchung isolierter basaler Effekte, als sogenannte Prinzipversuche, virtuelle Methoden und deren zugrundeliegenden Modelle ergänzt werden.

Praktisches Beispiel dieser Überlegungen ist der Zugversuch und die Verwertung der dabei generierten Ergebnisse als Rückschlüsse auf Festigkeiten spezifisch gestalteter Bauteile. Ausgehend von einem bewusst reduzierten Versuchssystem sollen durch Prinzipversuche Informationen generiert werden, auf deren Basis repräsentative Aussagen über das Verhalten des übergeordneten Systems, welches einer Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt und dessen Verhalten sich komplex darstellt, getroffen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu die Methode Prinzipversuch anwendungsorientiert aufbereitet, potentielle Einsatzmöglichkeiten und Grenzen diskutiert sowie ein integratives Prozessmodell zur Durchführung von Prinzipversuchen erarbeitet.

Die Definition des Prozessmodells erfolgte dabei ausgehend von relevanten theoretischen und praktischen Aspekten. Zudem wurden die, für die eigentliche Entwicklung inhärenten, Perspektiven Validierung und Verifikation auch in Hinblick auf die Methodenanwendung aufgegriffen und systematisiert (Kapitel 7, S. 111ff).

Die bereitgestellte methodische Integration empirischer Untersuchungen in die frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses bietet das Potential, vor allem in Kombination mit anderen Analysemethoden, einen Beitrag zur zweckmäßigen Gestaltung dieser Phasen, auf operativer Ebene, leisten zu können.

Literaturverzeichnis

Bader M., 2014: Der versuchsgestützte technische Entwicklungsprozess, Kumulative Habilitationsschrift der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz, Graz

Bader M., Lang H., 2015: Implizites Wissen und Sinneswahrnehmungen als Potentiale des „Faktor Mensch“, in: Beiträge zum 26. DfX-Symposium, 07.-08. Oktober, Herrsching

Beitz W., Grote K.-H. (Hrsg.), 2001: DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York

Bender B., 2004: Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung, Dissertation der Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin, Berlin

Blessing L., Chakrabarti A., 2009: DRM, a Design Research Methodology, Springer-Verlag, London

Bortz J., Döring N., 2002: Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaften, 3. Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg

Braun T. E., 2005: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld, Dissertation der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München

Breißing A., Flemming M., 1993: Theorie und Methoden des Konstruierens, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Bruns M., 1991: Systemtechnik – Ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Conrad K.-J., 2013: Grundlagen der Konstruktionslehre – Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Cross N., 2008: Engineering Design Methods – Strategies for Product Design, Wiley, Chichester

Czichos H., Habig K.-H., 2010: Tribologie-Handbuch – Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Daenzer W. F., Huber F. (Hrsg.), 2002: Systems Engineering – Methodik und Praxis, 11. Auflage, Verlag Industrielle Organisation, Zürich

Danzl M., 2010: Entwicklung einer Schneidmühle, Diplomarbeit der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz, Graz

Deming W. E., 1982: Out of the Crisis, MIT Press, Cambridge

Eckert C. M., Clarkson P. J., Stacey M. K., 2003: The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research, in: Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design (ICED'03), 19.-21. August, Stockholm

Ehrlenspiel K., 2009: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien

Ehrlenspiel K., Meerkamm H., 2013: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien

Eigner M., Stelzer R., 2009: Product Lifecycle Management – Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Feldhusen J., Grote K.-H. (Hrsg.), 2013: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Fröhlich P., 1995: FEM-Leitfaden: Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Element-Programmen, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Gerson P. M., Green G., 2001: Open Dynamic Design: Influences of the Industrial and Institutional Context on Product Development, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Engineering Design, 24.-26. June, Glasgow

Gesellschaft für Tribologie, 2002: Arbeitsblatt 7 – Tribologie Definitionen, Begriffe, Prüfung

Graner M., 2013: Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten – Eine empirische Untersuchung der Rahmenbedingungen und Auswirkungen, Dissertation der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Springer-Gabler, Wiesbaden

Herrmann W., 1973: Das Verdichten von Pulvern zwischen zwei Walzen, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr.

Hertz H., 1881: Über die Berührung fester elastischer Körper, in: Journal für die reine und angewandte Mathematik, Band 92, Seiten 156-171

Heymann M., 2005: „Kunst“ und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts – Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft, Chronos Verlag, Zürich

Hoffmann J., 2011: Taschenbuch der Messtechnik, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Horváth I., 2001: A contemporary survey of scientific research into engineering design, in: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, 21.-23. August, Glasgow

Huang G. Q., 1996: Design for X – Concurrent engineering imperatives, Chapman & Hall, London

Joch M., 2007: Messungen im Rahmen der Entwicklungsmethodik, Dissertation der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz, Graz

Karmasin M., Ribing R., 2012: Die Gestaltung wissenschaftlicher Arbeiten, 7. Auflage, Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien

Klein B., 2015: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

Kleppmann W., 2013: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren, 8. Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien

Koller R., 1994: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Köhler C. M., 2009: Technische Produktänderungen – Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes, Dissertation der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III der Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Lang H., 2012: Taxonomy for the generation of technological knowledge as basis for platform development of cooling compressors, Diplomarbeit der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz, Graz

Lechner G., Naunheimer H., 1994: Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Lienert G. A., Raatz U., 1998: Testaufbau und Testanalyse, 6. Auflage, Psychologie Verlags Union, Weinheim

Lindemann U., 2009: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Miller G.A., Galanter E., Pribram K. H., 1960: Plans and the structure of behavior, New York

Mittag C., 1952: Die Hartzerkleinerung: Maschinen, Theorie und Anwendung in den verschiedenen Zweigen der Verfahrenstechnik, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg

Müller W., 2014: Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München

Niemann G., Winter H., Höhn B.-R., 2005: Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Orloff M. A., 2006: Inventive Thinking through TRIZ – A Practical Guide, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Ovtcharova J., Weidlich R., 2003: Dankwort: A Concept of Engineering Objects for Collaborative Virtual Engineering: Automotive Case Study, in: Proceedings of the ProSTEP iViP Science Days, 08.-09. October, Dresden

Pahl G., Beitz W., 1977: Konstruktionslehre, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin

Pahl et. al., 2003: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Pahl et. al., 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Pfeifer T., Schmitt R. (Hrsg.), 2007: Masing – Handbuch Qualitätsmanagement, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Ponn J., Lindemann U., 2008: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Popov V. L., 2009: Kontaktmechanik und Reibung: Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Pucher W., 2013: Versuchsgestützte Bestimmung von Einflussgrößen und Konzeptentwicklung eines Vorverdichters zur Effizienzsteigerung für Zerkleinerungsmaschinen in der Ersatzbrennstoffindustrie, Diplomarbeit der Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Graz, Graz

Pulm U., 2004: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung, Dissertation der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München

Redtenbacher F. J., 1859: Principien der Mechanik und des Maschinenbaues, 2. Auflage, Verlagsbuchhandlung von Friedrich Bassermann, Mannheim

Rodenacker W. G., 1976: Konstruktionsbücher Band 27: Methodisches Konstruieren, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Rust W., 2011: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Schönert K., 1977: Zerkleinern, Unterlagen zu einem Kontaktstudium am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, 2. Auflage, Karlsruhe

Schwankl L., 2002: Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung, Dissertation der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München

Seiffert U., Rainer G. (Hrsg.), 2008: Virtuelle Produktentwicklung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz – Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Silber G., Steinwender F., 2005: Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM: Materialtheorie, Anwendungen, Beispiele, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden

Smith P. G., 2007: Flexible Product Development – Building Agility for Changing Markets, Jossey-Bass, San Francisco

Stetter R., Spindler K., 2001: Eigenschaftsfrüherkennung bei der Entwicklung von Abgasanlagen, in: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 5/2001, Seiten 390-396

Thomke S., Fujimoto T., 2000: The Effect of “Front-Loading“ Problem-Solving on Product Development Performance, in: Journal of Product Innovation Management, Volume 17, Issue 2, Pages 128-142

Stieß M., 2009: Mechnische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Thomke S., 2003: Experimentation Matters – Unlocking the Potential of New Technologies for Innovation, Harvard Business Review Press, Boston Massachusetts

Vajna S. (Hrsg.), 2014: Integrated Design Engineering – Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

VDI-Richtlinie 2206, 2004: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2221, 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1, 1997: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2222 Blatt 2, 1982: Konstruktionsmethodik – Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2223, 2004: Methodisches Entwerfen technischer Produkte, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2235, 1987: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren – Methoden und Hilfen, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

VDI-Richtlinie 2247 (Entwurf), 1994: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf

Wriggers P., 2008: Nonlinear Finite Element Methods, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg