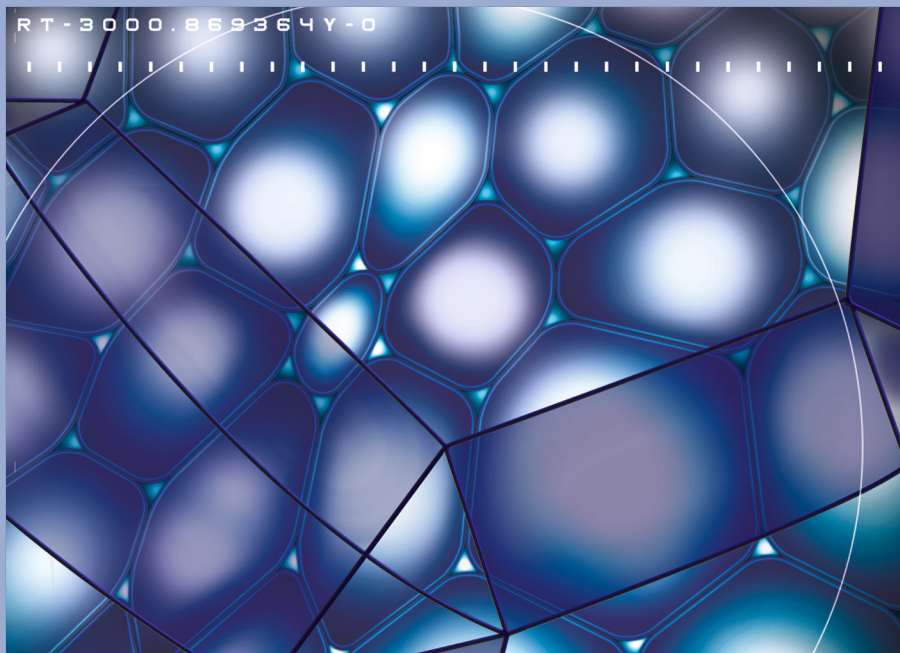


Frank Henning
Elvira Moeller

Handbuch Leichtbau

Methoden, Werkstoffe, Fertigung



RT-3000.869364Y-0

|||||

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

||||| 3MFMF-3000.86936

HANSER

Frank Henning / Elvira Moeller
Handbuch Leichtbau



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Frank Henning
Elvira Moeller

Handbuch Leichtbau

Methoden, Werkstoffe, Fertigung

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Die Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning (für die 1. Auflage)

Lehrstuhl für Leichtbau am Institut für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe

Stellvertretender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT, Pfinztal

Dipl.-Chem. Elvira Moeller

Herausgeberin und Autorin technisch-wissenschaftlicher Publikationen,
freiberuflich tätig für Verlage, Firmen und Institutionen

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 978-3-446-45638-9

E-Book-ISBN 978-3-446-45984-7

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München Wien

www.hanser.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Gestaltung, Seitenlayout und Herstellung: Der *Buchmacher*, Arthur Lenner, München

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Titelillustration: Atelier Frank Wohlgemuth, Bremen

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Druck und Bindung: Hubert & Co., Göttingen

Printed in Germany

Vorwort zur 1. Auflage

Leichtbau ist die Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse zu realisieren. Hinzu kommt die Gewährleistung der Systemzuverlässigkeit über die gesamte Produktlebenszeit.

Unter Leichtbau versteht man jedoch nicht nur die Verringerung des Gewichts, sondern die Steigerung der Effizienz eines Gesamtsystems. Leichtbau erfordert einen ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz, der sich in die Bereiche Methoden, Werkstoffe und Produktion einteilen lässt. Um Leichtbau effizient umzusetzen, muss der Ingenieur auf umfassendes Wissen zurückgreifen können, das diese Themenfelder einschließt. Effiziente Leichtbaulösungen hängen neben den technischen Anforderungen zudem auch von den ökonomischen, ökologischen und sozialen Randbedingungen ab.

Die Herausforderung der Zukunft liegt vor allem im Optimieren und Zusammenführen unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe zur Realisierung eines leichten, wirtschaftlich umsetzbaren Systems, entweder durch produktionsintegrierte Hybridisierung oder durch anschließendes Fügen von Einzelbauteilen zu einem hybriden Gesamtsystem.

Um dieses komplexe Thema praxisgerecht aufzubereiten, ist das Buch entlang des Wertschöpfungsprozesses gegliedert: Ausgehend von der Produktentstehung für Leichtbaukomponenten und -systeme über die unterschiedlichen, für den Leichtbau relevanten Konstruktionswerkstoffe, der direkt damit verbundenen Produktion, die sich in Fertigungsverfahren, Nacharbeit und Fügetechnologien unterteilen lassen, bis hin zur Bewertung von Leichtbauteilen und Strukturen sowie den Methoden der ganzheitlichen Bilanzierung.

In Teil I werden das integrierte Produktentstehungsmodell und die damit verbundene ganzheitliche Lösung zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen und der sie unterstützenden Methoden vorgestellt. Dank gilt Herrn *Prof. Dr.-Ing. Albert Albers*, dessen Arbeiten diesen Teil prägen und der die

Themen mit seinen Mitarbeitern in diesem Teil des Buches zusammengeführt hat.

In Teil II werden die relevanten Leichtbauwerkstoffe und systematischen Methoden zur Werkstoffauswahl beschrieben. Die Kapitel zu den einzelnen Werkstoffen enthalten übersichtliche Angaben und Vergleiche zu Eigenschaften und viele spezielle Hinweise und Anwendungsbeispiele, die sich auf ihre Eignung als Leichtbauwerkstoff beziehen. Besonderer Dank gilt Herrn *Dr.-Ing. Kay Weidenmann*, der nicht nur als Koordinator, sondern auch wesentlich zum Inhalt dieses Teils beigetragen hat. Ohne sein herausragendes Engagement würde der zweite Teil sicherlich nicht in dieser Form vorliegen.

In Teil III des Handbuchs stehen die Fertigungsverfahren im Leichtbau, die Formgebung, die Be- und Verarbeitung von Leichtbauprodukten und -werkstoffen im Fokus. Die Fertigungsverfahren sind oftmals der Schlüssel für eine wirtschaftliche Herstellung von Leichtbauteilen und wesentlicher Bestandteil des Systemansatzes mit den interagierenden Bereichen der Methoden, Werkstoffe und Produktion. Für die inhaltliche Koordination dieses Kapitels gebührt Herrn *Prof. Dr.-Ing. Volker Schulze* entsprechender Dank.

Teil IV setzt sich mit dem für den Leichtbau bedeutenden Thema der Fügetechnologien auseinander, die in fünf Gruppen unterteilt werden. Für Mischbauweisen im Multi-Material-Design spielt vor allem das Kleben, also das chemische Fügen, eine zunehmende Rolle. Kombinierte Fügeverfahren, auch als Hybridfügen bezeichnet, kombinieren die Vorteile verschiedener Verfahren und spielen für den Leichtbau hinsichtlich der Materialeinsparung an den Fügestellen eine wichtige Rolle.

Teil V des Buches beschäftigt sich mit der Bewertung von Bauteilen und Leichtbaustrukturen. Dieses Themenfeld umfasst die Prozess- und Bauteilsimulation neuer Leichtbauwerkstoffe, die oft nicht mit konventionellen Materialgesetzen zu beschreiben sind und eine besondere Herausforderung darstellen. Weitere Kapitel sind die Betriebsfestigkeit im Leichtbau, die zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und

Bauteilen, das Structural Health Monitoring – die Schadensdetektion, die Reparaturfähigkeit einer Faserverbundstruktur und Reparaturkonzepte bis hin zu End-of-Life-Konzepten und Recycling.

Im VI. Teil des Buches werden der für den Leichtbau sehr bedeutende Aspekt der ganzheitlichen Bilanzierung und die hierfür angewandten Methoden vorgestellt. Die sogenannte Life-Cycle-Analyse umfasst die ganzheitliche Betrachtung eines Leichtbausystems entlang der Wertschöpfungskette über die Produktlebenszeit bis zur Verwertung und ermöglicht somit eine aussagekräftige Bewertung hinsichtlich technischer, ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte.

August 2011

Unser Dank gilt den Autoren aller Einzelbeiträge und allen, die auf andere Weise am Zustandekommen des Buches beteiligt waren – auch den Firmen und Organisationen, die Bildmaterial und Daten zu Verfügung gestellt haben, um einzelne Sachverhalte zu verdeutlichen.

Besonders danken möchten wir Herrn *Dipl.-Ing. Volker Herzberg* vom Carl Hanser Verlag, der mit Verständnis und Hilfsbereitschaft, mit viel Sachverstand und Diplomatie eine positive und konstruktive Zusammenarbeit bewirkt hat.

*Frank Henning
Elvira Moeller*

Vorwort zur 2. Auflage

Das vorliegende Buch ist im Jahre 2011 in der 1. Auflage erschienen. Inzwischen sind in vielen Bereichen neue Erkenntnisse erarbeitet, Fertigungsverfahren optimiert und die Eigenschaften von Werkstoffen verbessert worden. Diese Aspekte wurden bei der Überarbeitung und Aktualisierung berücksichtigt.

In der vorliegenden 2. Auflage wurden aber auch neue Kapitel aufgenommen, z.B. die Additive Fertigung sowie die Einbeziehung der Künstlichen Intelligenz zur Gewinnung aktuellen Wissens. Gründlich überarbeitet wurde der Teil der Werkstoffe, vor allem der der faserverstärkten Kunststoffe.

Einige völlig neue Aspekte wurden in das Buch aufgenommen: Die Initiative Massiver Leichtbau, die Bionik, also die Umsetzung biologischer Systeme in technische Produkte und die wirtschaftlichen Aspekte des Leichtbaus. Nicht alles was technisch machbar ist, ist auch bezahlbar, d.h. die wirtschaftliche Effektivität muss mit dem technischen Fortschritt einhergehen.

April 2020

Ein weiteres Wort zur 2. Auflage: Herr Professor Henning konnte in dieser Ausgabe nicht mehr als aktiver Herausgeber mitwirken. Er hat inzwischen ein Reihe weiterer Aufgaben übernommen, sodass für die Herausgebere Tätigkeit keine Zeit blieb.

Dessen ungeachtet hat er seine eigenen Beiträge auf dem Gebiet der faserverstärkten Kunststoffe gründlich überarbeitet und aktualisiert.

Ich danke allen Autoren, den neuen und den bisherigen, für die Mühe, die sie sich gemacht haben, um neue Erkenntnisse in den Text aufzunehmen.

Nicht zuletzt danke ich – wie immer – Herrn Volker Herzberg für seine Hilfe und Unterstützung, aber auch für seine Geduld und Diplomatie, mit der er die Entstehung des Werkes begleitet hat.

Elvira Moeller

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis.....	XXXI

Teil I – Produktentstehungsprozess für Leichtbaukomponenten und -systeme 1

1 Der Prozess der Produktentstehung

<i>Albert Albers, Andreas Braun, Jonas Heimicke, Thilo Richter</i>	5
--	---

1.1 Grundlagen 9

1.1.1 Modellierung von Produktentstehungsprozessen.....	9
---	---

1.1.2 Grundlagen der Systemtechnik.....	11
---	----

1.1.3 Das Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	12
--	----

1.1.4 Bekannte Prozessmodelle	12
-------------------------------------	----

1.1.5 Grenzen herkömmlicher Prozessmodelle.....	14
---	----

1.1.6 Neues Modell für einen Produktentstehungsprozess – Controlling vs. Entwicklerunterstützung	16
---	----

1.1.6.1 Controlling im Mittelpunkt.....	17
---	----

1.1.6.2 Unterstützung von Entwicklern.....	17
--	----

1.2 Das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell..... 18

1.2.1 Hypothesen der Produktentstehung.....	18
---	----

1.2.2 Begriffe und Elemente des iPeM	21
--	----

1.2.2.1 Aktivitätenmatrix	21
---------------------------------	----

1.2.2.2 Aktivitäten der Produktentstehung.....	21
--	----

1.2.2.3 Problemlösungsprozess SPALTEN.....	24
--	----

1.2.2.4 Das Systemtriple aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem.....	26
--	----

1.2.2.5 Ressourcensystem.....	26
-------------------------------	----

1.2.2.6 Phasenmodell.....	27
---------------------------	----

1.2.2.7 Ganzheitliche Modellierung durch die verschiedenen Ebenen und deren Wechselwirkungen im iPeM	27
---	----

1.2.2.8 iPeM zur Nutzung von Erfahrung und Wissen im Produktentstehungsprozess	28
--	----

1.3 Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff..... 29

1.4 Zusammenfassung..... 32

1.5 Weiterführende Informationen

2 Technology Intelligence – Technologiefrühaufklärung mit Künstlicher Intelligenz

<i>Joachim Warschat, Antonino Ardilio</i>	37
---	----

2.1 Auslöser von Innovationen

2.2 Herausforderungen bei der Technologiesuche

2.2.1 Suchstrategie.....	41
--------------------------	----

2.2.2 Wissenswachstum.....	42
----------------------------	----

2.3	Die funktionssemantische Methode (FSM).....	43
2.3.1	Der Ansatz	43
2.3.2	Vom Informationsbedarf zur gezielten Suche.....	44
2.4	Die funktionssemantische Methode im Leichtbau.....	48
2.5	Technologieradar	49
2.6	Marktextplorer.....	50
2.7	Fazit.....	51
2.8	Literaturverzeichnis	51
3	Leichtbaustrategien und Bauweisen	
	<i>Gundolf Kopp, Norbert Burkardt, Neven Majić.....</i>	<i>53</i>
3.1	Einleitung.....	55
3.2	Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen	55
3.3	Leichtbaustrategien	58
3.3.1	Bedingungsleichtbau	59
3.3.2	Konzeptleichtbau.....	60
3.3.3	Stoffleichtbau	61
3.3.4	Formleichtbau	62
3.3.5	Fertigungsleichtbau	63
3.3.6	Leichtbau versus Kosten	63
3.4	Bauweisen	66
3.4.1	Differentialbauweise.....	66
3.4.2	Integralbauweise	66
3.4.3	Modulbauweise.....	67
3.4.4	Verbundbauweise.....	68
3.4.4.1	Hybridbauweise.....	69
3.4.4.2	Multi-Material-Design.....	69
3.5	Fazit.....	71
3.6	Weiterführende Informationen	71
4	Virtuelle Produktentwicklung	
	<i>Albert Albers, Neven Majić, Andreas Schmid, Manuel Serf.....</i>	<i>73</i>
4.1	Computergestützte Konstruktion – Computer Aided Design (CAD).....	77
4.2	Computergestützte Entwicklung (CAE) – Computer Aided Engineering.....	79
4.2.1	Produktsimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM).....	79
4.2.2	Entwicklung der FEM.....	80
4.2.3	Anwendungsbereiche der FEM.....	81
4.2.4	Verfügbare FEM-Programme.....	81
4.2.5	Ablauf einer FEM-Analyse.....	82
4.2.6	Literatur zu Berechnungsprogrammen und zu FEM.....	86
4.3	Strukturoptimierung	86
4.3.1	Topologieoptimierung	87
4.3.1.1	Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers.....	89

4.3.1.2	Topologieoptimierung eines Felgensterns.....	91
4.3.2	Formoptimierung.....	94
4.3.2.1	CAD-basierte Formoptimierung.....	95
4.3.2.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung.....	96
4.3.2.3	Beispiel zur Netz-basierten Formoptimierung.....	97
4.3.2.4	Formoptimierung mit Sicken.....	102
4.3.3	Parameteroptimierung.....	107
4.4	Fazit.....	110
4.5	Weiterführende Informationen	111
5	Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung	
	<i>Albert Albers, Norbert Burkardt</i>	113
5.1	Definition der Begriffe.....	117
5.2	Rahmenbedingungen für den Systemleichtbau	119
5.3	Analyse und Synthese des technischen Systems	122
5.3.1	Funktionsintegration in einem Bauteil	122
5.3.2	Trennung der Funktionen	123
5.4	Rechnergestützte Methoden im Systemleichtbau.....	123
5.4.1	Topologieoptimierung von Elementen in einem technischen System	124
5.4.2	Optimierung von mechatronischen Systemen.....	125
5.4.3	Automatische Lastenermittlung.....	126
5.5	Konstruktion eines Roboterarms.....	127
5.6	Fazit.....	130
5.7	Weiterführende Informationen	131
6	Funktionsbasierte Entwicklung leichter Produkte	
	<i>Albert Albers, Sven Revfi, Markus Spadinger</i>	133
6.1	Der Erweiterte Target Weighing Ansatz (ETWA).....	137
6.2	Der ETWA als Problemlösungsprozess	137
6.3	Funktionsweise des Erweiterten Target Weighing Ansatzes	138
6.3.1	Produktgeneration G_{n-1}	138
6.3.2	Funktionsanalyse	138
6.3.3	Aufwandsanalyse der Teilsysteme oder Funktionsbereiche.....	139
6.3.4	Erstellung der Funktion-Aufwand-Matrix	139
6.3.5	Identifikation von Suchfeldern.....	140
6.3.6	Unternehmensspezifische Gewichtung der Faktoren Masse, Kosten und CO ₂ -Emissionen ...	141
6.3.7	Konzeptfindung	142
6.3.8	Konzeptbewertung	142
6.3.9	Konzepttragweite.....	142
6.3.10	Zielaufwand.....	145
6.4	ETWA und MBSE.....	145
6.5	Getriebegehäuse als Beispiel	146

6.6	Fazit.....	150
6.7	Weiterführende Informationen	150
7	Validierung im Produktentstehungsprozess	
	<i>Albert Albers, Tobias Düser</i>	153
7.1	Verifizierung und Validierung von Produkteigenschaften	155
7.2	Virtuelle und experimentelle Validierungsumgebung.....	155
7.3	Zielkonflikte bei der Validierung von Produkteigenschaften im Leichtbau	156
7.4	Validierungsprozess	157
7.5	Systemleichtbau durch keramische Werkstoffe als Beispiel	158
7.6	Fazit.....	160
7.7	Weiterführende Informationen	160

Teil II – Werkstoffe für den Leichtbau – Auswahl und Eigenschaften..... 163

1	Werkstoffauswahl für den Leichtbau	
	<i>Kay Weidenmann, Alexander Wanner</i>	167
1.1	Werkstoffe und ihre Eigenschaften	169
1.2	Allgemeine Aspekte der Werkstoffauswahl	172
	1.2.1 Informationsquellen.....	172
	1.2.2 Darstellen und Vergleichen von Werkstoffeigenschaften	172
	1.2.3 Werkstoffauswahl im Produktentstehungsprozess.....	173
1.3	Auswahlstrategien	174
	1.3.1 Anforderungsprofil und Werkstoffbewertung	174
	1.3.2 Werkstoffindices zur Bewertung von Werkstoffen.....	176
1.4	Werkstoffauswahl mit Werkstoffindices.....	177
	1.4.1 Leichtbaurelevante Werkstoffindices	180
	1.4.2 Werkstoffauswahldiagramme.....	181
1.5	Mehrfache Randbedingungen und konkurrierende Ziele	183
	1.5.1 Mehrfache Randbedingungen	183
	1.5.2 Konkurrierende Ziele.....	184
1.6	Einfluss der Bauteilform	187
	1.6.1 Grundsätzliches	187
	1.6.2 Form und Effizienz	187
	1.6.3 Der Formfaktor	187
	1.6.4 Rolle des Formfaktors bei der Werkstoffauswahl	188
1.7	Beschränkungen durch den Bauraum	190
	1.7.1 Grundsätzliches	190
	1.7.2 Auswahlstrategie bei beschränktem Bauraum	190
	1.7.3 Weitere Bauteile und Lastfälle.....	192
1.8	Zusammenfassung.....	192
1.9	Weiterführende Informationen	194

2	Stähle	
	<i>Wolfgang Bleck</i>	195
2.1	Stähle sind vielseitige Werkstoffe	199
2.2	Hochfeste Flachprodukte	199
2.2.1	Stähle für Feinstblech (< 0,5 mm).....	199
2.2.2	Stähle für Feinblech (0,5–3 mm)	202
2.2.2.1	Bake-Hardening-Stähle.....	205
2.2.2.2	Hochfeste IF-Stähle	207
2.2.2.3	Mikrolegierte Stähle (HSLA-Stähle)	207
2.2.2.4	Dualphasenstähle (DP- und DH-Stähle).....	207
2.2.2.5	TRIP-Stähle	208
2.2.2.6	Komplexphasenstähle (CP-Stähle)	208
2.2.2.7	Martensitische Stähle (MS-Stähle).....	208
2.2.3	Stähle für Bleche in größeren Dicken.....	209
2.2.4	Stähle für das Pressformen.....	214
2.3	Stähle für Schmiedestücke	217
2.4	Stähle für hochfeste Drähte	220
2.5	Höchstfeste Stähle.....	221
2.5.1	Höchstfeste Vergütungsstähle.....	221
2.5.2	Höchstfeste martensitaushärtende Stähle (Maraging-Stähle).....	222
2.6	Recyclieverhalten von Stahl	223
2.7	Weiterführende Informationen	223
3	Aluminiumwerkstoffe	
	<i>Jürgen Hirsch, Friedrich Ostermann</i>	225
3.1	Aluminium als reines Metall.....	229
3.2	Aluminiumlegierungen	230
3.2.1	Einteilung und Nomenklatur	230
3.2.2	Knetlegierungen für Strukturbauteile	232
3.2.2.1	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe Al-Mg (EN AW-5xxx)	233
3.2.2.2	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe AlMgSi (EN AW-6xxx)	235
3.2.2.3	Mittelfeste Strukturwerkstoffe der Legierungsgruppe AlZnMg (EN AW-7xxx).....	235
3.2.2.4	Hochfeste AlCu- und AlZnMgCu-Legierungen der Serien AW-2xxx und AW-7xxx	236
3.2.3	Gusslegierungen für Strukturbauteile	236
3.3	Be- und Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen.....	237
3.3.1	Formgießen - Urformen	237
3.3.2	Halbzeuge aus Aluminiumknetlegierungen - Umformen	238
3.3.2.1	Aluminium-Strangpressprofile	239
3.3.2.2	Bänder, Bleche und Platten	239
3.3.2.3	Werkstoffverbunde mit Aluminium	240
3.3.3	Verarbeitung von Aluminiumhalbzeugen	241
3.3.3.1	Bearbeitung von Profilen.....	241
3.3.3.2	Blechumformung.....	241

3.3.4	Trennen und Spanen von Aluminiumlegierungen.....	243
3.3.5	Oberflächenbehandlungen.....	243
3.3.6	Fügen.....	244
3.3.7	Reparaturmöglichkeiten	245
3.4	Konstruktive Gesichtspunkte.....	245
3.4.1	Grundsätze der Gewichtseinsparung	245
3.4.2	Elastische Werkstoffeigenschaften und Leichtbaugrad.....	246
3.4.3	Verhalten unter schlagartiger Beanspruchung.....	247
3.4.4	Grundsätze für die Schwingfestigkeit	248
3.5	Recycling	249
3.6	Anwendung von Aluminiumwerkstoffen	249
3.7	Zusammenfassung.....	251
3.8	Weiterführende Informationen	252
4	Magnesiumwerkstoffe	
	<i>Peter Kurze</i>	255
4.1	Magnesium als reines Metall	259
4.2	Magnesiumlegierungen	260
4.2.1	Einteilung und Nomenklatur von Magnesiumlegierungen	260
4.2.2	Einfluss der Legierungselemente	261
4.3	Eigenschaften von Magnesiumlegierungen.....	262
4.3.1	Mechanische Eigenschaften	262
4.3.2	Physikalische Eigenschaften	264
4.3.3	Chemische Eigenschaften	266
4.4	Korrosion und Korrosionsschutz	267
4.4.1	Korrosion	267
4.4.2	Korrosionsschutz.....	268
4.4.2.1	Zusatz von ausgewählten Legierungselementen.....	268
4.4.2.2	Oberflächenbehandlung von Magnesiumwerkstoffen	268
4.5	Verarbeitung und Bearbeitung von Magnesiumlegierungen.....	271
4.5.1	Urformen	271
4.5.2	Umformen	272
4.5.3	Fügen von Magnesiumlegierungen	273
4.6	Anwendung von Magnesiumlegierungen	274
4.6.1	Automobilbau	274
4.6.2	Elektronik	275
4.6.3	Maschinenbau.....	276
4.6.4	Raumfahrt	277
4.7	Fazit.....	277
4.8	Weiterführende Informationen	278

5	Titanwerkstoffe	
	<i>Heinz Sibum, Jürgen Kiese</i>	281
5.1	Titan als Metall	285
5.2	Einteilung der Titanwerkstoffe	285
5.2.1	Reintitan	285
5.2.2	Titanlegierungen	286
5.3	Eigenschaften von Titanlegierungen.....	289
5.3.1	Physikalische und technologische Eigenschaften.....	289
5.3.2	Konsequenzen für eine werkstoffgerechte und kosteneffektive Konstruktion im Leichtbau ..	292
5.4	Be- und Verarbeitung von Titanwerkstoffen	293
5.4.1	Wärmebehandlung.....	293
5.4.2	Fügeverfahren.....	296
5.4.2.1	Thermisches Fügen	296
5.4.2.2	Mechanisches Fügen.....	297
5.4.2.3	Chemisches Fügen	299
5.4.3	Spanende Bearbeitung.....	299
5.4.4	Trennen, Stanzen, Lochen und Abtragen	300
5.4.5	Umformen.....	300
5.4.6	Oberflächenbearbeitung.....	301
5.4.6.1	Dekorative Schichten	301
5.4.6.2	Verschleißschutzschichten	302
5.4.6.3	Festigkeitsstrahlen.....	302
5.5	Sicherheitsaspekte und Recycling	302
5.6	Halbzeugherstellung und Halbzeugformen	303
5.7	Anwendungsbeispiele	304
5.8	Zusammenfassung und Ausblick	306
5.9	Weiterführende Informationen	307
6	Kunststoffe	
	<i>Axel Kauffmann</i>	309
6.1	Grundlagen	313
6.2	Thermoplaste	316
6.2.1	Standardkunststoffe.....	319
6.2.2	Technische Kunststoffe.....	320
6.2.3	Hochleistungspolymere.....	320
6.3	Duromere.....	321
6.3.1	Harzsysteme, Formmassen.....	321
6.3.2	Vernetzte Polyurethane	321
6.4	Elastomerwerkstoffe.....	323
6.4.1	Vernetzte Elastomere (Gummiwerkstoffe, Kautschuk)	323
6.4.2	Thermoplastische Elastomere (TPE).....	325
6.5	Geschäumte Polymere.....	326

6.5.1	Weichelastische Schaumstoffe	327
6.5.2	Halbharte Schaumstoffe	328
6.5.3	Harte Schaumstoffe	328
6.6	Additive und Füllstoffe	330
6.7	Weiterführende Informationen	332
7	Faserverstärkte Kunststoffe	
	<i>Frank Henning unter Mitarbeit von Klaus Drechsler und Lazarula Chatzigeorgiou</i>	335
7.1	Das Prinzip von Verbundwerkstoffen	339
7.2	Kunststoffe als Matrix	340
7.3	Verstärkungsfasern und ihre Eigenschaften	343
7.3.1	Glasfasern	343
7.3.2	Kohlenstofffasern	344
7.3.3	Aramidfasern	347
7.3.4	Naturfasern	348
7.4	Textile Halbzeuge	350
7.4.1	Matten und Vliese	350
7.4.2	Gewebe	351
7.4.3	Gelege	352
7.4.4	Geflechte	353
7.4.5	Gesticke	354
7.4.6	Fiber Patch Preforming	356
7.4.7	Nähtechnologie	357
7.4.8	Bindertechnologie	358
7.5	Imprägnierte Halbzeuge	359
7.5.1	Duomere Systeme	360
7.5.1.1	Diskontinuierlich faserverstärkte Duomere	360
7.5.1.2	Kontinuierlich faserverstärkte Duomere	363
7.5.2	Thermoplastische Systeme	365
7.5.2.1	Diskontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	365
7.5.2.2	Kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	366
7.6	Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen	369
7.6.1	Haftung zwischen Matrix und Faser	371
7.6.2	Einfluss auf Festigkeit und Steifigkeit	371
7.7	Anwendungsgebiete	373
7.8	Weiterführende Informationen	379
8	Technische Keramik	
	<i>Walter Krenkel</i>	383
8.1	Strukturkeramiken für Leichtbauanwendungen	387
8.1.1	Monolithische Keramiken	387
8.1.2	Keramische Wälzlager für die Antriebstechnik	388
8.1.3	Leichtbau-Kameragehäuse aus Siliciumnitrid	389

8.2	Leichtbau mit Faserverbund-Keramiken.....	390
8.2.1	Keramische Verbundwerkstoffe.....	390
8.2.2	Verstärkungsfasern.....	392
8.2.3	Herstellverfahren für CMC-Bauteile.....	393
8.2.4	Eigenschaften der CMC-Werkstoffe.....	395
8.2.5	Hochtemperatur-Leichtbau in der Raumfahrt.....	397
8.2.6	Keramische Leichtbaubremsen.....	398
8.2.7	Leichtbau in der Verbrennungstechnik und Wärmebehandlung.....	399
8.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	400
8.4	Weiterführende Informationen.....	400
9	Hybride Werkstoffverbunde	
	<i>Kay Weidenmann, Frank Henning</i>	403
9.1	Verbundwerkstoffe vs. Werkstoffverbund.....	405
9.2	Grundlagen der Hybridisierung.....	406
9.3	Leichtbaurelevante Hybridkonzepte.....	409
9.3.1	Kunststoff-Metall-Hybride.....	409
9.3.2	Kunststoff-Kunststoff-Hybride.....	412
9.3.3	Kunststoff-Keramik-Hybride.....	415
9.3.4	Kunststoff-Holz-Hybride.....	416
9.4	Zusammenfassung.....	418
9.5	Weiterführende Informationen.....	418
Teil III – Fertigungsverfahren im Leichtbau – Formgebung, Be- und Verarbeitung.....		419
1	Urformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Andreas Bührig-Polaczek</i>	
	<i>unter Mitarbeit von Samuel Bogner, Stephan Freyberger, Matthias Jakob, Gerald Klaus, Heiner Michels, Christian Oberschelb, Uwe Vroomen</i>	423
1.1	Gießen.....	427
1.1.1	Verfahrensspezifische Möglichkeiten zur gegossenen Leichtbaukonstruktion.....	427
1.1.1.1	Konstruieren von Gussteilen.....	427
1.1.1.2	Charakteristische Größen der Gießprozesse.....	428
1.1.2	Auswirkungen von Prozess und Legierung auf die Eigenschaften des Gussbauteils.....	428
1.1.2.1	Auswirkungen der Erstarrungsbedingungen auf Gussgefüge und mechanische Eigenschaften.....	428
1.1.2.2	Gießbare Magnesiumwerkstoffe.....	429
1.1.2.3	Gießbare Aluminiumlegierungen.....	430
1.1.2.4	Titanlegierungen für den Formguss.....	430
1.1.2.5	Gusseisenwerkstoffe und gießbare Stähle.....	431
1.1.2.6	Hybride Werkstoffverbunde.....	432

1.1.3	Verfahren der Gießereitechnik.....	433
1.1.3.1	Dauerform und verlorene Form	433
1.1.3.2	Wirkgrößen im Gießprozess	433
1.1.3.3	Schmelze, Gießen und Nachbearbeitung.....	434
1.1.4	Schwerkraftguss.....	436
1.1.4.1	Schwerkraftkokillenguss	436
1.1.4.2	Schwerkraftsandguss	439
1.1.5	Das Niederdruck-Kokillengießverfahren.....	440
1.1.6	Das Druckgießverfahren	441
1.1.7	Das Feingussverfahren.....	443
1.1.8	Ausblick	446
1.2	Weiterführende Informationen	448
2	Umformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Christoph Dahnke, Soeren Gies, Christian Löbbe, Alessandro Selvaggio, A. Erman Tekkaya</i>	<i>449</i>
2.1	Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Blech durch Umformen.....	453
2.1.1	Unterschiedliche Leichtbaustrategien	453
2.1.2	Erweiterte Formgebungsgrenzen durch wirkmedienbasierte Blechumformverfahren	453
2.1.3	Herstellung belastungsangepasster Blechformteile	457
2.1.4	Presshärten höchstfester Blechformteile.....	458
2.1.5	Hybridbauweisen auf Basis von Blechhalbzeugen.....	460
2.2	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Massivumformung.....	462
2.2.1	Strangpressen	463
2.2.2	Runden beim Strangpressen	468
2.2.3	Verbundstrangpressen	469
2.2.4	Schmieden	470
2.3	Herstellung von Leichtbaustrukturen durch Biegeumformung	472
2.3.1	Profile als Basis für den Leichtbau	472
2.3.2	Herstellung von geraden Profilen durch Biegen	473
2.3.3	Herstellung von belastungsangepassten Profilen durch Biegen	476
2.3.4	Biegen von Rohren und Profilen	479
2.3.5	Biegen von belastungsangepassten Rohren und Profilen.....	483
2.4	Zusammenfassung.....	485
2.5	Weiterführende Informationen	486
3	Trennen von metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Benedict Stampfer, Volker Schulze, Jürgen Michna.....</i>	<i>491</i>
3.1	Zerteilen	495
3.1.1	Verfahren des Zerteilens	495
3.1.2	Verschleiß und Formfehler an der Schnittfläche.....	496
3.1.3	Zerteilen von NE-Metallen.....	496
3.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	498
3.2.1	Einfluss auf den Prozess des Zerspanens.....	498

3.2.2	Zerspanen von NE-Metallen	501
3.2.2.1	Titanzerspanung.....	501
3.2.2.2	Magnesiumzerspanung	505
3.2.2.3	Aluminiumzerspanung.....	506
3.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	508
3.3.1	Wasserstrahlschneiden.....	508
3.3.2	Schleifen	509
3.4	Abtragen	510
3.4.1	Laserbearbeitung.....	510
3.4.2	Funkenerosives Abtragen	511
3.5	Zusammenfassung.....	511
3.6	Weiterführende Informationen	512
4	Eigenschaftsänderungen bei metallischen Leichtbauwerkstoffen	
	<i>Alexander Erz, Jürgen Hoffmeister, Stefan Dietrich, Volker Schulze</i>	515
4.1	Verfestigung durch Umformen	519
4.1.1	Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen).....	519
4.1.2	Verfestigung durch Walzen (Festwalzen)	519
4.2	Wärmebehandlung.....	520
4.2.1	Härten	520
4.2.1.1	Martensitische Umwandlung	520
4.2.1.2	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU-Schaubilder).....	522
4.2.1.3	Härtbarkeit von Stahl.....	524
4.2.2	Vergütung von Stahl.....	525
4.2.3	Chemische Verfahren bei Stählen.....	526
4.2.4	Aushärten am Beispiel einer Aluminiumlegierung	527
4.2.5	Aushärtung von Magnesiumlegierungen	531
4.2.6	Härten und thermomechanisches Behandeln von Titanlegierungen	532
4.2.7	Lokale Wärmebehandlungsmethoden zum thermischen Einstellen von Gefügegradienten....	534
4.3	Zusammenfassung.....	535
4.4	Weiterführende Informationen	536
5	Verarbeitung von Kunststoffen	
	<i>Axel Kauffmann</i>	539
5.1	Extrusion	543
5.1.1	Rohr- und Profilextrusion	544
5.1.2	Extrusionsblasformen.....	545
5.2	Spritzgießen.....	547
5.2.1	Thermoplast-Spritzgießen.....	548
5.2.2	Elastomer-Spritzgießen	550
5.2.3	Duroplast-Spritzgießen.....	550
5.2.4	Sonderverfahren	551
5.3	Schäumverfahren.....	554

5.3.1	Extrusionsschäumen	554
5.3.2	Partikelschäumen.....	554
5.3.3	Polyurethanschäumen	556
5.4	Pressen	558
5.5	Tiefziehen.....	559
5.6	Rotationsformen.....	560
5.7	Zusammenfassung.....	562
5.8	Weiterführende Informationen	562
6	Fertigungstechnologien für faserverstärkte Kunststoffe	
	<i>Frank Henning</i>	565
6.1	Fertigungsverfahren für diskontinuierlich faserverstärkte Duromere	569
6.1.1	Bulk Moulding Compound (BMC)	569
6.1.2	Rieselfähige diskontinuierlich faserverstärkte duromere Formmassen	569
6.1.3	Reinforced-Reaction Injection Moulding (R-RIM).....	570
6.1.4	Fasersprühen von Polyurethan	570
6.1.5	Fließpressen von SMC.....	573
6.1.6	Fließpressen diskontinuierlich faserverstärkter Duromere im Direktverfahren.....	574
6.2	Fertigungsverfahren für diskontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste.....	576
6.2.1	Spritzgießen	576
6.2.2	Direktprozesse im Spritzgießen	578
6.2.3	Fließpressen.....	580
6.2.3.1	Fließpressen glasmattenverstärkter Thermopaste (GMT)	580
6.2.3.2	Fließpressen langfaserverstärkter Thermoplastgranulate (LFT-G)	580
6.2.3.3	Fließpressen diskontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Direkt-Verfahren	581
6.3	Fertigungsverfahren für kontinuierlich faserverstärkte Duromere.....	585
6.3.1	Handlaminieretechnik.....	585
6.3.1.1	Unterteilung der Verfahren	587
6.3.1.2	Beispiele für die Anwendung des Handlaminierens.....	588
6.3.2	Prepreg-Technologien	590
6.3.2.1	Teilprozesse der Prepreg-Technologie	591
6.3.2.2	Werkzeuge für die Prepreg-Technologie.....	596
6.3.2.3	Aushärtung der Lamine	597
6.3.2.4	Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Prepreg-Technologien	599
6.3.3	Flüssigharz-Imprägnierverfahren - LCM-Technologien.....	601
6.3.3.1	Übersicht über die Verfahren	601
6.3.3.2	Gebäuchliche Harzprägnierverfahren.....	605
6.3.3.3	Harzinjektionsverfahren	605
6.3.3.4	Pultrusion	617
6.3.3.5	Faserwickeln	619
6.3.3.6	Anwendungsbeispiele.....	621
6.3.3.7	Sonderverfahren	622
6.4	Fertigungsverfahren für kontinuierlich faserverstärkte Thermoplaste	623
6.4.1	Tapelegetechnologien.....	623

6.4.2	Formgebung kontinuierlich faserverstärkter Organobleche und konsolidierter Gelege	625
6.4.3	Fertigung hybrider kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste	627
6.5	Weiterführende Informationen	628
7	Trennen faserverstärkter Kunststoffe	
	<i>Anton Helfrich, Volker Schulze, Chris Becke</i>	633
7.1	Bearbeitungsfehler und Bearbeitungsqualität	637
7.2	Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide.....	639
7.2.1	Verschleiß und Schneidstoffe	639
7.2.2	Fräsen.....	639
7.2.3	Bohren.....	641
7.2.4	Drehen.....	644
7.2.5	Einspannen von faserverstärkten Kunststoffen bei der Zerspanung.....	645
7.3	Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	646
7.3.1	Schleifen	646
7.3.2	Wasserstrahlschneiden.....	646
7.4	Abtragen.....	648
7.4.1	Abtragen mit Laserstrahlen	648
7.4.2	Funkenerosives Abtragen (EDM)	648
7.5	Zusammenfassung	649
7.6	Weiterführende Informationen	649
8	Formgebung bei Technischer Keramik	
	<i>Reinhard Lenk</i>	653
8.1	Technologie der Keramikherstellung	657
8.2	Formgebung Technischer Keramik	659
8.2.1	Prinzipien keramischer Formgebung.....	659
8.2.2	Keramische Formgebungsverfahren	661
8.2.2.1	Pressformgebung.....	661
8.2.2.2	Plastische und thermoplastische Formgebung.....	665
8.2.2.3	Gießformgebung	669
8.2.2.4	Additive Fertigung.....	671
8.2.3	Binderkonzepte und Entbinderungsverfahren	671
8.3	Komplexe keramische Bauteilstrukturen	672
8.3.1	Grundlagen.....	672
8.3.2	Fertigungstechnische Möglichkeiten und Anwendungsbeispiele für den Leichtbau.....	674
8.3.2.1	Direkte Formgebung	675
8.3.2.2	Formgebung und Fügen	675
8.3.2.3	Replikationstechniken.....	676
8.3.2.4	Verwendung von Trägermaterialien (PT-Keramik®)	678
8.3.3	Anwendungsbeispiele für den Leichtbau	681
8.4	Zusammenfassung	683
8.5	Weiterführende Informationen	683

9	Fertigungsrouen zur Herstellung von Hybridverbunden	
	<i>Frank Henning, Kay Weidenmann, Bernd Bader</i>	685
9.1	Oberflächenbehandlung als Vorbereitung zur Fertigung.....	689
9.1.1	Oberflächenmodifizierung mit Plasma.....	689
9.1.2	Chemische Aktivierung.....	689
9.2	In-mould Assembly (IMA).....	691
9.2.1	Umspritzen und Umpressen.....	691
9.2.2	Verarbeitung von Organoblechen in hybriden Verbunden.....	692
9.2.2.1	Allgemeine Aspekte.....	692
9.2.2.2	Fertigung von verstärkten Bauteilen auf Basis von Organoblechen.....	692
9.2.3	Fertigungsverfahren für kontinuierlich verstärkte, diskontinuierliche Faserverbunde.....	694
9.2.4	Hybride Innenhochdruckumformung.....	696
9.3	Post Moulding Assembly (PMA).....	699
9.3.1	Vergleich von PMA und IMA.....	699
9.3.2	Verbindungstechnik als wesentlicher Aspekt der PMA-Route.....	700
9.4	Fügen von Hybridverbunden mit anderen Bauteilen.....	701
9.5	Zusammenfassung.....	702
9.6	Weiterführende Informationen.....	703
10	Additive Fertigung von Strukturen und Werkstoffen für den Leichtbau	
	<i>Christian Haase, Patrick Köhnen</i>	705
10.1	Einleitung.....	709
10.2	Potenziale für den Leichtbau.....	710
10.3	Designkriterien additiv gefertigter Leichtbaustrukturen.....	711
10.4	Verfahren der additiven Fertigung.....	713
10.4.1	Pulverbettverfahren.....	713
10.4.1.1	Selektives Lasersintern.....	715
10.4.1.2	Selektives Laserschmelzen.....	715
10.4.1.3	Elektronenstrahlschmelzen.....	716
10.4.2	Auftragschweißverfahren.....	716
10.4.3	Harzbad-Photopolymerisation.....	717
10.4.4	Materialextrusion.....	718
10.4.5	Binderdruck.....	719
10.4.6	Materialdruck.....	720
10.4.7	Laminationsverfahren.....	721
10.5	Anwendungsfelder und -beispiele.....	721
10.6	Weiterführende Informationen.....	723
11	Initiative Massiver Leichtbau	
	<i>Hans-Willi Raedt, Thomas Wurm, Alexander Busse</i>	725
11.1	Einleitung.....	729
11.2	Untersuchte Fahrzeuge und Vorgehensweise der Initiative Massiver Leichtbau.....	729

11.3	Übersicht über Leichtbaupotenziale	729
11.4	Leichtbau durch Werkstoffinnovationen	731
11.4.1	Hochfeste Edelbaustähle für den Leichtbau	732
11.4.2	Leichtbau mit höherfesten Stählen.....	734
11.4.3	Leichtbau im Getriebe: Schlüsselfaktor Werkstoff.....	735
11.4.4	Beurteilung von werkstofflichem Leichtbau	736
11.5	Umformtechnische Potenziale für den Leichtbau	736
11.5.1	Leichtbaupotenziale im Verbrennungsmotor.....	737
11.5.2	Leichtbaupotenziale im Power-Split-Getriebe und im weiteren Antriebsstrang.....	738
11.5.3	Leichtbaupotenziale im elektrischen Hinterachsantrieb	739
11.5.4	Leichtbaupotenziale im Fahrwerk von Pkw und Lkw.....	740
11.6	Zusammenfassung	743
11.7	Weiterführende Informationen	743

Teil IV – Fügetechnologien im Leichtbau

1 Mechanisches Fügen

Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram, Gerson Meschut, Florian Augenthaler, Vadim Sartisson..... 749

1.1	Stanznieten	753
1.1.1	Verfahrensbeschreibung	754
1.1.2	Qualitätsbestimmende Größen von Stanznietverbindungen.....	756
1.1.3	Konstruktive Hinweise	757
1.1.4	Einsatzbereiche.....	757
1.1.5	Systemtechnik zum Stanznieten.....	759
1.1.6	Prozessüberwachung des Setzvorgangs	760
1.1.7	Nacharbeitslösungen und Reparatur.....	761
1.1.8	Sonderstanznietverfahren.....	762
1.1.9	Anwendungsbeispiele für das Stanznieten	764
1.2	Blindnieten.....	765
1.2.1	Blindnietssysteme – genormt und anwendungsbezogen	765
1.2.2	Allgemeine Richtlinien zur Auswahl von Blindnieten	767
1.2.3	Qualitätssicherung.....	768
1.2.4	Anwendungsbeispiele für das Blindnieten	771
1.3	Schließringbolzensetzen.....	772
1.3.1	Schließringbolzensysteme	772
1.3.2	Eigenschaften von Schließringbolzenverbindungen	774
1.3.3	Allgemeine Richtlinien	774
1.3.4	Qualitätssicherung.....	776
1.3.5	Anwendungsbeispiele für das Schließringbolzensetzen	778
1.4	Clinchen.....	779
1.4.1	Clinchsysteme.....	780
1.4.2	Allgemeine Richtlinien	782
1.4.3	Qualitätssicherung.....	784

1.4.4	Schneidclinchen	785
1.4.5	Anwendungsbeispiele für das Clinchen	786
1.5	Loch- und gewindeformendes Schrauben	786
1.5.1	Schraubssysteme.....	787
1.5.2	Allgemeine Richtlinien.....	790
1.5.3	Qualitätssicherung	793
1.5.4	Anwendungsbeispiele für Verschraubungen im Automobilbau	794
1.6	Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen	795
1.6.1	Grundlagen und Begriffe.....	796
1.6.2	Verfahrensablauf und Verbindungsausbildung.....	796
1.6.3	Setzgerät zum Bolzensetzen	798
1.6.4	Richtlinien zur Konstruktion und Fertigung.....	799
1.7	Weiterführende Infomationen	801
2	Fügen durch Umformen	
	<i>Soeren Gies, A. Erman Tekkaya</i>	807
2.1	Fügen durch Umformen von Rohr- und Profiltteilen	809
2.2	Fügen durch Weiten.....	810
2.2.1	Einsatz eines Wirkmediums	811
2.2.2	Einsatz eines starren Werkzeuges	814
2.2.3	Einsatz von Wirkenergie	815
2.3	Fügen durch Engen.....	816
2.3.1	Einsatz von Wirkenergie	816
2.3.2	Einsatz eines starren Werkzeuges.....	819
2.4	Zusammenfassung.....	820
2.5	Weiterführende Informationen	821
3	Thermisches Fügen	
	<i>Thomas Nitschke-Pagel</i>	823
3.1	Schweißen	825
3.1.1	Anforderungen an Schweißverfahren für den Leichtbau.....	827
3.1.2	Übersicht wichtiger Schweißverfahren	829
3.1.2.1	Metall-Lichtbogenschmelzschweißverfahren	829
3.1.2.2	Spezielle Schweißverfahren.....	833
3.1.3	Lichtbogenarten beim MSG-Schweißen.....	836
3.1.4	Wärmereduzierte MSG-Prozesse	839
3.1.4.1	MSG-Prozesse mit Treppenstufenimpuls.....	839
3.1.4.2	ColdArc-Prozess.....	841
3.1.4.3	CMT-Prozess.....	843
3.1.4.4	Micro-MIG- Prozess	844
3.1.5	Anwendung der energiereduzierten MSG-Prozesse.....	845
3.1.6	Schweißen von Leichtmetalldruckguss	847
3.1.7	Besonderheiten beim Schweißen verfestigter Werkstoffe	849

3.1.8	Weiterführende Informationen zu 3.1	852
3.2	Löten	856
3.2.1	Löten als stoffschlüssiges Fügeverfahren.....	856
3.2.2	Löten artgleicher Werkstoffe	859
3.2.2.1	Löten von Stählen	859
3.2.2.2	Löten von Aluminiumwerkstoffen.....	862
3.2.2.3	Löten von Magnesiumwerkstoffen	862
3.2.2.4	Löten von Titanwerkstoffen	863
2.2.3	Löten von Mischverbindungen	863
3.2.4	Fazit	865
3.3	Weiterführende Informationen zu 3.2.....	866
4	Chemisches Fügen – Kleben	
	<i>Klaus Dilger</i>	869
4.1	Kleben als Fügeverfahren.....	873
4.1.1	Klebgerechte Gestaltung.....	873
4.1.1.1	Kleben geschlossener Profile.....	875
4.1.1.2	Kleben von T-Stößen	877
4.1.2	Klebstoffe für den Leichtbau.....	877
4.1.2.1	Epoxidharzklebstoffe	877
4.1.2.2	Polyurethanklebstoffe.....	879
4.2	Vorbehandlung der Oberflächen zum Kleben	879
4.3	Leichtbauwerkstoffe und deren Klebbarkeit	879
4.3.1	Kleben von Stahlblechen.....	881
4.3.2	Kleben formgehärteter Stahlbauteile	881
4.3.3	Kleben von Aluminiumblechen.....	884
4.3.4	Kleben von Aluminium-Druckguss	887
4.3.5	Kleben von Magnesiumwerkstoffen.....	890
4.3.6	Kleben von Titanwerkstoffen.....	890
4.3.7	Kleben lackierter Bleche	890
4.3.8	Kleben von Kunststoffen	892
4.3.8.1	Kleben thermoplastischer Kunststoffe.....	892
4.3.8.2	Kleben von Elastomeren.....	893
4.3.8.3	Kleben von Duromeren.....	893
4.3.9	Kleben von Faserverbundwerkstoffen	893
4.4	Rechnerische Auslegung von Leichtbauklebungen.....	895
4.4.1	Analytische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen.....	896
4.4.1.1	Berechnung von dünnen, strukturellen Klebschichten.....	896
4.4.1.2	Berechnung von flexiblen, gummielastischen Klebschichten	898
4.4.2	Numerische Berechnungsmethoden für Klebverbindungen	900
4.4.2.1	Berücksichtigung mehrachsiger Spannungszustände	901
4.4.2.2	Kohäsivzonenmodelle.....	902
4.5	Kleben im Fahrzeugbau	903
4.5.1	Kleben im Karosserie-Rohbau	903

4.5.2	Kleben in der Automobilmontage	905
4.6	Zusammenfassung	905
4.7	Weiterführende Informationen	906
5	Hybridfügen	
	<i>Ortwin Hahn, Sushanthan Somasundaram, Gerson Meschut, Florian Augenthaler, Vadim Sartisson</i>	909
5.1	Grundlagen des Hybridfügens	913
5.2	Fertigung nach verschiedenen Verfahren	913
5.3	Eigenschaften der Verbindungen und deren Prüfung.....	916
5.3.1	Qualitätssicherung	917
5.3.2	Quasistatische Beanspruchung	917
5.3.3	Schwingende Beanspruchung	918
5.3.4	Schlagartige Beanspruchung.....	918
5.3.5	Alterungs- und Korrosionsverhalten.....	918
5.3.6	Temperaturabhängigkeit der Verbindungseigenschaften.....	918
5.4	Besonderheiten bei loch- und gewindeformendem Schrauben in Kombination mit dem Kleben.....	919
5.5	Anwendungsbeispiele	919
5.6	Thermisch-mechanische Fügeverfahren	920
5.6.1	Widerstandselementschweißen	921
5.6.2	Reibelementschweißen.....	922
5.7	Weiterführende Informationen	923
6	Qualitätssicherung in der Produktion	
	<i>Jens Ridzewski</i>	925
6.1	Ziele der Qualitätssicherung	927
6.2	Qualitätsmanagement – eine Unternehmensphilosophie	928
6.3	Qualitätssicherungsmaßnahmen.....	931
6.3.1	Aufgaben in der Produktion von Faserverbundbauteilen	931
6.3.2	Einteilung der Qualitätssicherungsmaßnahmen.....	932
6.3.3	QS-Maßnahmen bei zulassungspflichtigen Bauteilen im Bauwesen	935
6.3.3.1	Einteilung	935
6.3.3.2	Eigenüberwachung oder werkseigene Produktionskontrolle (WPK).....	935
6.3.3.3	Fremdüberwachung oder Inspektion	936
6.4	Prüfverfahren an faserverstärkten Kunststoffen	937
6.4.1	Übersicht der Verfahren	937
6.4.2	Zerstörungsfreie Prüfung.....	937
6.4.3	Rheologische Prüfverfahren	938
6.4.4	Physikalische Prüfverfahren	939
6.4.5	Prüfverfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Laminaten.....	940
6.4.6	Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften	949
6.4.7	Übersicht weiterer ausgewählter Prüfnormen	952
6.5	Zusammenfassung	952
6.6	Weiterführende Informationen	953

Teil V – Bewertung von Bauteilen und Leichtbaustrukturen	955
1 Werkstoffmodelle für die Prozess- und Bauteilsimulation	
<i>Hermann Riedel</i>	959
1.1 Beschreibung von Plastizitätsmodellen.....	963
1.1.1 Überblick	963
1.1.2 von Mises-Modell	964
1.1.3 Chaboche-Modell.....	964
1.1.4 Anwendung des Chaboche-Modells auf die Rückfederung.....	965
1.1.5 Phänomenologische Modelle für Anisotropie	966
1.1.6 Texturmodelle	967
1.1.7 Anwendung von Texturmodellen auf Leichtbauwerkstoffe	969
1.2 Beschreibung von Schädigungs- und Versagensmodellen	972
1.2.1 Bruchmechanismen	972
1.2.2 Bruchkriterien für duktilen Bruch.....	973
1.2.3 Schädigungsmechanik für duktilen Bruch.....	974
1.2.4 Anwendung des Gologanu-Modells auf die Kantenrissbildung beim Walzen	975
1.2.5 Anwendung des Gologanu-Modells auf das Grenzformänderungsschaubild	977
1.2.6 Bruchverhalten faserverstärkter Kunststoffe	978
1.2.7 Bruchmechanik.....	981
1.3 Weiterführende Informationen	982
2 Crashverhalten von metallischen Werkstoffen und deren Fügeverbindungen	
<i>Dong-Zhi Sun</i>	987
2.1 Einleitung.....	991
2.2 Werkstoff- und Versagensmodelle für Crashsimulation	992
2.2.1 Werkstoffmodelle für Dehnratenabhängigkeit und Anisotropie.....	992
2.2.2 Versagensmodelle	993
2.3 Crashsimulation von Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen	995
2.4 Durchgängige Simulation eines TRIP-Stahls vom Umformen bis Crash	998
2.4.1 Einflüsse der Mehrachsigkeit und Belastungsgeschichte auf die Bruchdehnungen	998
2.4.2 Versagensmodellierung mit Berücksichtigung von Vordehnungen und Vorschädigung	999
2.5 Crashsimulation von Fügeverbindungen	1001
2.5.1 Ersatzmodelle für Punktschweißverbindungen	1001
2.5.2 Modellierung von Klebverbindungen	1002
2.5.3 Simulation von Hybridverbindungen (Punktschweißkleben).....	1003
2.6 Weiterführende Informationen	1005
3 Crashverhalten von polymeren Werkstoffen	
<i>Stefan Hiermaier</i>	1007
3.1 Mechanische Eigenschaften unverstärkter Thermoplaste	1009
3.2 Numerische Simulation faserverstärkter Kunststoffe unter Crashlast	1014

3.3	Weiterführende Informationen	1016
4	Bedeutung der Betriebsfestigkeit im Leichtbau unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen der E-Mobilität	
	<i>Andreas Büter</i>	1017
4.1	Einleitung.....	1021
4.2	Betriebsfestigkeit als Basis für die Bauteilauslegung.....	1026
	4.2.1 Inhalt des Lastenheftes.....	1027
	4.2.2 Formen des Versagens.....	1029
	4.2.3 Auswahl des Materials.....	1031
	4.2.4 Beispiel 1: Betriebsfeste Auslegung einer hochbelasteten Kunststoffkomponente im Motorraum	1032
4.3	Numerische und experimentelle Betriebslastensimulation	1041
	4.3.1 Materialeigenschaften	1041
	4.3.2 Mehrachsigkeit	1041
	4.3.3 Festigkeit von Proben und Bauteilen im Vergleich.....	1043
	4.3.4 Schadensakkumulation	1044
4.4	Möglichkeiten von Funktionsintegration im Entwicklungsprozess	1046
	4.4.1 Beispiel 2: Hybride Leichtbau-Hinterachse für Elektrofahrzeuge	1047
	4.4.2 Beispiel 3: Funktionsintegrierter Leichtbau am Beispiel eines Faserverbund-Querlenkers ..	1049
	4.4.3 Beispiel 4: Entwicklung eines Faserverbund-Rades mit integriertem Elektromotor	1055
4.5	Zusammenfassung.....	1058
4.6	Weiterführende Informationen	1059
5	Zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen	
	<i>Gerd Dobmann, Christiane Maierhofer</i>	1063
5.1	Prüfung von Ausgangswerkstoffen.....	1067
	5.1.1 Prozessintegrierte mikromagnetische Charakterisierung von Festigkeit und Tiefzieheignung	1067
	5.1.2 Das Multiparameter-Konzept 3MA.....	1069
	5.1.3 Mikromagnetische Inline-Bestimmung von Streckgrenze und Zugfestigkeit	1070
	5.1.4 ZfP von Faserverbundwerkstoffen.....	1072
	5.1.4.1 ZfP von Faserverbundmaterial mit Ultraschall	1073
	5.1.4.2 Thermographie von Faserverbundwerkstoffen	1074
	5.1.4.3 Wirbelstromprüfung von Faserverbundkunststoffen	1077
5.2	Prüfung von Halbzeugen, Werkstoffverbunden und Verbundwerkstoffen.....	1078
	5.2.1 Fertigungsintegrierte Prüfung von Tailored Blanks	1078
	5.2.2 Fertigungsprüfung mechanischer Fügungen	1082
	5.2.3 Zerstörungsfreie Charakterisierung der Schadensentwicklung in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen	1083
	5.2.4 Blitzthermographie zur Charakterisierung von Fertigungsdefekten in CFK	1085
5.3	Zusammenfassung.....	1086
5.4	Weiterführende Informationen	1086

6	Structural Health Monitoring – Schadensdetektion	
	<i>Hans-Jürgen Schmidt, Bianka Schmidt-Brandecker</i>	1091
6.1	Einleitung	1093
6.2	SHM-Methoden	1094
6.3	Erfassung von Betriebslasten durch SHM	1096
6.3.1	Systeme zur Erfassung der Betriebslasten	1096
6.3.2	Identifizierung von extremen Landelasten (hard landing detection)	1096
6.3.3	Anpassung der Inspektionsforderungen	1097
6.3.4	Sicherheitsfaktoren	1098
6.4	Strukturoptimierung durch SHM	1099
6.4.1	Grundlagen für die SHM-Anwendung am Druckrumpf	1101
6.4.2	Beispiele zur Gewichtsreduzierung für typische Rumpfschalen	1102
6.4.3	Alternative Stringer-Überwachung	1103
6.4.4	Schlussfolgerungen	1105
6.5	Inspektion von Leichtbaustrukturen	1105
6.5.1	Reduzierung oder Ersatz von konventionellen Inspektionen	1106
6.5.2	Reduzierung oder Ersatz von Modifikationen	1106
6.5.3	Lebensdauererlängerung	1107
6.5.4	Zustandsabhängige Wartung	1107
6.5.4.1	Erfassung von Betriebslasten	1107
6.5.4.2	Kontinuierliche Überwachung	1107
6.6	Ausblick	1107
6.7	Weiterführende Informationen	1108
7	Reparaturfähigkeit und Reparaturkonzepte bei Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen	
	<i>Christian Thum, Georg Wachinger, Helmut Wehlan</i>	1109
7.1	Einleitung	1113
7.2	Schäden und Reparaturen an FVK-Strukturen	1113
7.2.1	Schadensursachen	1114
7.2.2	Schadensformen	1114
7.2.3	Schadensbereiche	1114
7.2.4	Reparaturkategorien	1115
7.3	Reparaturverfahren monolithischer Verbundwerkstoffe	1115
7.3.1	Provisorischer Oberflächenschutz mit Reparaturklebebändern	1115
7.3.2	Schleifen als Reparaturverfahren	1116
7.3.3	Reparatur von Delaminationen mit injizierenden Verfahren	1116
7.3.4	Reparatur von Delaminationen durch Einsetzen von Nieten	1117
7.3.5	Reparatur von Schäden durch zusätzliche Lagen	1117
7.3.6	Schäften als Reparaturverfahren	1118
7.3.7	Neue Entwicklungen für das automatisierte Schäften	1120
7.3.7.1	Abtrag mittels Fräsen	1121
7.3.7.2	Abtrag mittels Wasserstrahl	1125
7.3.7.3	Abtrag mittels Laser	1127

7.3.7.4	Bewertung der unterschiedlichen automatisierten Abtragsarten	1129
7.3.8	Verfahren mit Aufdoppelung	1129
7.3.9	Alternative Möglichkeiten für die Patchherstellung.....	1132
7.4	Reparatur von Sandwichstrukturen	1135
7.4.1	Anbindungsfehler zwischen Wabe und Decklaminat.....	1135
7.4.2	Oberflächenversiegelung bei zulässigen Schadensgrößen.....	1136
7.4.3	Beschädigung von Decklaminat und Kernstruktur.....	1136
7.4.4	Reparatur bei einem durchgehenden Schaden.....	1137
7.5	Fazit.....	1138
7.6	Weiterführende Informationen	1138
8	Recyclingfähigkeit und End-of-Life-Konzept im Leichtbau	
	<i>Jörg Woidasky</i>	1141
8.1	Nachhaltigkeitsorientierung als Leitbild.....	1145
8.2	End-of-Life-Konzept	1146
8.3	Grundlagen des Recycling von Leichtbauwerkstoffen	1148
8.4	Materialidentifikation als Schlüsselprozess bei Metallen in Luftfahrtanwendungen.....	1149
8.5	Recycling faserverstärkter Verbundwerkstoffe.....	1151
8.5.1	Bewährt: Mechanische Verfahren.....	1152
8.5.2	Pilotanwendungen: Thermische Verfahren	1153
8.5.3	Aufwändig und vielversprechend: Chemische Verfahren.....	1154
8.5.4	Nachfolgeschritte: Von der Faser zum rezyklathaltigen Halbzeug.....	1155
8.5.5	Beseitigung carbonfaserhaltiger Abfälle	1155
8.5.6	Lohnt sich das Recycling überhaupt?.....	1155
8.6	Kombination mit der Rohstoffherzeugung bei der GFK-Verwertung bei der Zementklinkerherstellung.....	1156
8.7	Schlussfolgerungen	1157
8.8	Weiterführende Informationen	1158
	Teil VI – Spezielle Aspekte des Leichtbaus	1161
1	Ganzheitliche Bilanzierung und Nachhaltigkeit im Leichtbau	
	<i>Matthias Fischer, Stefan Albrecht, Martin Baitz</i>	1163
1.1	Lebenszyklusanalyse und Nachhaltigkeit	1167
1.2	Entwicklung und Stand der Technik in der Ökobilanz.....	1169
1.3	Herausforderungen bei der Vereinfachung komplexer Zusammenhänge.....	1171
1.3.1	Ökonomisch basierte Ansätze der Input-Output-Ökobilanz	1171
1.3.2	Bewertung der Ressourcen	1172
1.3.3	„Footprinting“-Methoden	1173
1.4	Herausforderungen bei der ökologischen Beurteilung von Werkstoffen und Materialien im Leichtbau.....	1173
1.5	Design for Life Cycle im Leichtbau.....	1175

1.6	Einflüsse von Leichtbau-Aspekten auf die technisch-ökologischen Eigenschaften von Produkten und Systemen	1177
1.6.1	Bereitstellung von Material und Rohstoff in der Vorkette	1179
1.6.2	Vom Material zum System – Aktuelle Entwicklungen im Leichtbau	1181
1.7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	1183
1.8	Weiterführende Informationen	1185
2	Bionik als Innovationsmethode für den Leichtbau	
	<i>Helena Hashemi Farzaneh</i>	1189
2.1	Aspekte der Bionik für den Leichtbau	1193
2.1.1	Bionische Materialien und Strukturen.....	1193
2.1.2	Bionische Strategien im Leichtbau	1194
2.2	Entwicklung bionischer Innovationen für den Leichtbau	1196
2.2.1	Strategien zur Anwendung von Bionik	1197
2.2.2	Suche nach biologischen Vorbildern oder technischen Anwendungsgebieten	1199
2.2.3	Analyse und Vergleich biologischer und technischer Systeme.....	1201
2.2.4	Abstraktion biologischer und technischer Systeme.....	1203
2.2.5	Transfer bionischer Analogien für den Leichtbau.....	1205
2.3	Weiterführende Informationen	1206
3	Betriebswirtschaftliche Aspekte des Leichtbaus	
	<i>Wolfgang Seeliger</i>	1209
3.1	Allgemeine Einführung – Herstellkosten und Investitionsrechnung.....	1213
3.2	Prozessorientiertes Kostenmodell zur Ermittlung der Herstellkosten.....	1214
3.2.1	Aufstellung des Kostenmodells.....	1214
3.2.2	Datenerhebung und Berechnung	1215
3.2.3	Prozessmodule und die Bedeutung der Gewinn-Marge	1218
3.3	Beispiel für die Anwendung des Kostenmodells – CFK- vs. Blechbauteil.....	1218
3.3.1	Bedeutung der Stückzahlen für die Kosteneffizienz.....	1219
3.3.2	Einfluss der Taktzeit	1220
3.3.3	Solide Marktnische für CFK – Sorgenkind Prozesszeit.....	1222
3.4	Investitionsrechnung als Maßstab für die Wirtschaftlichkeit.....	1222
3.4.1	Grundlagen der Investitionsrechnung nach dem DCF-Modell: Tabelle der Cash Flows und Ermittlung des Netto-Barwerts (NPV).....	1223
3.4.2	Beispiel für die Anwendung der Investitionsrechnung – ein topologieoptimiertes Maschinenbett	1226
3.4.3	Leichtbau lohnt sich auch im Maschinenbau.....	1227
3.5	Schlussbetrachtungen.....	1228
3.6	Weiterführende Informationen	1228
	Sachregister	1229

Autorenverzeichnis

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT,
Pfinztal

frank.henning@ict.fraunhofer.de

Dipl.-Chem. Elvira Moeller

Leinfelden-Echterdingen

elvira.moeller@t-online.de

Autoren

Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

albert.albers@kit.edu

I.1, I.3, I.4, I.5, I.6, I.7

Dr.-Ing. Stefan Albrecht

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)

Ganzheitliche Bilanzierung GaBi Stuttgart

stefan.albrecht@ibp.fraunhofer.de

VI.1

Dr. Antonino Ardilio

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO)

antonino.ardilio@iao.fraunhofer.de

I.2

Dr.-Ing. Florian Augenthaler

Robert Bosch GmbH

florian.augenthaler@bosch.com

IV.1, IV.5

Dr.-Ing. Bernd Bader

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT,
Pfinztal

bernd.bader@ict.fraunhofer.de

III.9

Dr.-Ing. Martin Baitz

Thinkstep – a Spera Company Stuttgart

m.baitz@spera.com

VI.1

Dipl.-Ing. Chris Becke

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk – Institut für Produktionstechnik

becke@wbk.uka.de

III.7

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

RWTH Aachen

Institut für Eisenhüttenkunde

bleck@iehk.rwth-aachen.de

II.2

Dr.-Ing. Andreas Braun

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

andreas.braun@kit.edu

I.1

Prof. Dr.Ing. Andreas Bührig-Polaczek

RWTH Aachen

Gießerei-Institut

sekretariat@gi.rwth-aachen.de

III.1

Prof. h.c. Norbert Burkardt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

norbert.burkardt@kit.edu

I.3, I.5

Alexander Busse

fka GmbH, Aachen

III.11

<p>Prof. Dr.-Ing. Andreas Büter Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF andreas.bueter@lbf.fraunhofer.de</p>	<p>V.4</p>	<p>Dipl.-Ing. Alexander Erz Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde alexander.erk@kit.edu</p>	<p>III.4</p>
<p>Dipl.-Ing. Lazarula Chatzigeorgiou Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungs- technik (IGCV) lazarus.chatzigeorgiou@igcv.fraunhofer.de</p>	<p>II.7</p>	<p>Dipl.-Ing. Matthias Fischer Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) Ganzheitliche Bilanzierung GaBi matthias.fischer@ibp.fraunhofer.de</p>	<p>VI.1</p>
<p>Dr.-Ing. Christoph Dahnke Institut für Umformtechnik und Leichtbau christoph.dahnke@iul.tu-dortmund.de</p>	<p>III.2</p>	<p>Dr.-Ing. Soeren Gies Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau soeren.gies@iul.tu-dortmund.de</p>	<p>III.2, IV.2</p>
<p>Dr.-Ing. Stefan Dietrich Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk - Institut für Produktionstechnik stefan.dietrich@kit.edu</p>	<p>III.4</p>	<p>Dr.-Ing. Christian Haase RWTH Aachen Institut für Eisenhüttenkunde christian.haase@iehk.rwth-aachen.de</p>	<p>III.10</p>
<p>Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger Technische Universität Braunschweig Institut für Füge- und Schweißtechnik k.dilger@tu-braunschweig.de</p>	<p>IV.4</p>	<p>Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) ortwin.hahn@t-online.de</p>	<p>IV.1, IV.5</p>
<p>Prof. Dr. rer.nat. Gerd Dobmann Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung Saar-Universität Saarbrücken gerd.dobmann@t-online.de</p>	<p>V.5</p>	<p>Dr.-Ing. Helena Hashemi Farzaneh Technische Universität München helena.hashemi@tum.de</p>	<p>VI.2</p>
<p>Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler Technische Universität München Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) drechsler@lcc.mw.tum.de</p>	<p>II.7</p>	<p>M.Sc. Jonas Heimicke Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung jonas.heimicke@kit.edu</p>	<p>I.1</p>
<p>Dr.-Ing. Tobias Düser AVL Deutschland GmbH</p>	<p>I.7</p>		

Anton Helfrich Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde anton.helfrich@kit.edu III.7	Dipl.-Ing. Gundolf Kopp Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte gundolf.kopp@dlr.de I.3
Prof. Dr.-Ing. Frank Henning Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal frank.henning@ict.fraunhofer.de II.7, II.9, III.6	Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel Universität Bayreuth Lehrstuhl Keramische Werkstoffe walter.krenkel@uni-bayreuth.de II.8
Prof. Dr.-Ing. Stefan Hiermaier Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik (EMI), Freiburg hiermaier@emi.fraunhofer.de V.3	Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Kurze Wissenschaftlich-technischer Berater prof.peter.kurze@t-online.de II.4
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hirsch Hydro Aluminium Rolled Products GmbH-F&E, Bonn juergen.hirsch@hydro.com II.3	Dr. Reinhard Lenk CeramTec GmbH, Plochingen r.lenk@ceramtec.com III.8
Dr.-Ing. Jürgen Hoffmeister Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde juergen.hoffmeister@kit.edu III.4	Dr.-Ing. Christian Löbbe Institut für Umformtechnik und Leichtbau christian.loebbe@iul.tu-dortmund.de III.2
Prof. Dr.-Ing. Axel Kauffmann Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe axel.kauffmann@dhbw-karlsruhe.de II.6, III.5	Dr. Christiane Maierhofer Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) christiane.maierhofer@bam.de V.5
Dr.-Ing. Jürgen Kiese vorm. ThyssenKrupp VDM GmbH, Essen juergen.kiese@thyssenkrupp.com II.5	Dr.-Ing. Neven Majić Cevotec GmbH neven.majic@cevotec.com I.3, I.4
M.Sc. Patrick Köhnen RWTH Aachen Institut für Eisenhüttenkunde patrick.koehnen@iehk.rwth-aachen.de III.10	Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Füge­technik (LWF) meschut@lwf.upb.de IV.1, IV.5

<p>Dipl.-Ing. Jürgen Michna Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk – Institut für Produktionstechnik michna@wbk.uka.de</p>	<p>III.3</p>	<p>Prof. Dr. rer. nat. Hermann Riedel Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg hermann.riedel@iwm.fraunhofer.de</p>	<p>V.1</p>
<p>Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel Technische Universität Braunschweig Institut für Füge- und Schweißtechnik t.pagel@tu-braunschweig.de</p>	<p>IV.3</p>	<p>M. Sc. Vadim Sartisson Universität Paderborn – Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) vadim.sartisson@lwf.upb.de</p>	<p>IV.1, IV.5</p>
<p>Dr.-Ing. Friedrich Ostermann Aluminium-Technologie-Service – Meckenheim – Paderborn ostermann@aluminiumtechnologie.de</p>	<p>II.3</p>	<p>Dr.-Ing. Andreas Schmid Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung andreas.schmid@kit.edu</p>	<p>I.4</p>
<p>Dr. Hans-Willi Raedt Hirschvogel Automotive Group hans-willi.raedt@hirschvogel.com</p>	<p>III.11</p>	<p>Dr. Hans-Jürgen Schmidt AeroStruc - Aeronautical Engineering, Buxtehude HJB.schmidt@t-online.de</p>	<p>V.6</p>
<p>M.Sc. Sven Revfi Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung sven.revfi@kit.edu</p>	<p>I.6</p>	<p>Bianka Schmidt-Brandecker AeroStruc - Aeronautical Engineering, Buxtehude HJB.schmidt@t-online.de</p>	<p>V.6</p>
<p>M.Sc. Thilo Richter Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung thilo.richter@kit.edu</p>	<p>I.1</p>	<p>Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wbk - Institut für Produktionstechnik volker.schulze@kit.edu</p>	<p>III.3, III.4, III.7</p>
<p>Prof. Dr.-Ing. Jens Ridzewski IMA Institut für Materialforschung und Anwen- dungstechnik GmbH, Dresden jens.ridzewski@ima-dresden.de</p>	<p>IV.6</p>	<p>Dr. Wolfgang Seeliger Leichtbau BW GmbH wolfgang.seeliger@leichtbau-bw.de</p>	<p>VI.3</p>
		<p>Alessandro Selvaggio Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau alessandro.selvaggio@iul.tu-dortmund</p>	<p>III.2</p>

Dipl.-Ing. Manuel Serf Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung manuel.serf@kit.edu	I.4	Dr.-Ing. (FH) Georg Wachinger Airbus Senior Expert (Im Ruhestand)	V.7
Dr. Heinz Sibum Im Ruhestand	II.5	Prof. Dr. rer. nat. Alexander Wanner Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde alexander.wanner@kit.edu	II.1
Dr.-Ing. Sushantan Somasundaram ThyssenKrupp AG, Essen sushanthan.somasundaram@thyssenkrupp.com	IV.1, IV.5	Prof. Dr.- Ing. habil. Joachim Warschat Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) joachim.warschat@iao.fraunhofer.de	I.2
Dipl.-Ing. Markus Spadinger Karlsruher Institut für Technologie (KIT) IPEK – Institut für Produktentwicklung markus.spadinger@kit.edu	I.6	Helmut Wehlan Airbus Helicopters Deutschland GmbH helmut.wehlan@helicopters.com	V.7
M. Sc. Benedict Stampfer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde benedict.stampfer@kit.edu	III.3	Prof. Dr.-Ing. habil. Kay Weidenmann Universität Augsburg Institut für Materials Ressource Management (MRM) kay.weidenmann@mrm.uni-augsburg.de	II.1, II.9, III.9
Dr.-Ing. Dong-Zhi Sun Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg dongzhi.sun@iwm.fraunhofer.de	V.2	Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky Hochschule Pforzheim joerg.woidasky@hs-pforzheim.de	V.8
Prof. Dr.-Ing. Erman Tekkaya Technische Universität Dortmund Institut für Umformtechnik und Leichtbau erman.tekkaya@iul.tu-dortmund.de	III.2, IV.2	Dr.-Ing. Thomas Wurm Georgsmarienhütte GmbH. Georgsmarienhütte	III.11
Dipl.-Ing. (FH) Christian Thum Airbus Helicopters Donauwörth christian.thum@airbus.com	V.7		

Teil I

Produktentstehungs- prozess für Leichtbaukom- ponenten und -systeme

1	Der Prozess der Produktentstehung	5
2	Technoly Intelligence – Technologiefrühaufklärung mit künstlicher Intelligenz	37
3	Leichtbaustrategien und Bauweisen	53
4	Virtuelle Produktentwicklung	73
5	Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung	113
6	Funktionsbasierte Entwicklung leichter Produkte	133
7	Validierung im Produktentstehungsprozess	153

Der Erfolg von Unternehmen auf den globalisierten Märkten unserer Zeit wird entscheidend durch die erfolgreiche Entwicklung neuer Produkte bestimmt. Hierbei sind sowohl die inventiv orientierten Tätigkeiten, d. h. das Finden neuer Ansätze und Konzepte, wie auch die innovativ orientierten Tätigkeiten, d. h. die erfolgreiche Umsetzung dieser Konzepte bis hin zu erfolgreichen Produkten am Markt, von hoher Bedeutung. Neue Herausforderungen wie z. B. im Leichtbau erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und eine Ausweitung des Betrachtungsraums auf das gesamte Feld der Produktentstehung. Zunehmend verkürzte Produktlebenszyklen, ein globalisierter Wettbewerb und begrenzt verfügbare Ressourcen sowie die damit verbundenen verstärkt integrierenden Ansätze zur Produktentstehung führen zu einer steigenden Komplexität sowohl der technischen Lösungen selbst als auch der dazugehörigen Prozesse.

Das iPeM – integrierte Produktentstehungsmodell und die damit verbundene ganzheitliche Lösung zur Beschreibung von Produktentstehungsprozessen im Sinne der PGE – Produktgenerationsentwicklung und der sie unterstützenden Methoden steht für eine auf diese aktuellen und künftigen Herausforderungen einer erfolgreichen Produktentwicklung zugeschnittene Umorientierung der in Forschung und Praxis noch verbreiteten phasenorientierten Prozessmodelle.



Ergebnisse der Aktivitäten der Produktentstehung am Beispiel einer Felge aus Kohlenstoffaserverbundwerkstoff

Gefördert wird in diesem Zusammenhang das Verständnis von Produktentstehungsprozessen, die sich durch einen zielsystemorientierten Aufbau und durch eine individuelle parallel und seriell strukturierte Abfolge standardisierter grundlegender Aktivitäten auszeichnet. Diese Aktivitäten können bei der jeweils individuellen Entwicklung eines neuen Produkts bedarfsorientiert entlang eines Zeitstrahls angeordnet werden und bilden die individuellen Phasen der jeweiligen Entwicklung eines bestimmten Produkts. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität und führt die

Welten der Entwicklungsmethodik und des Entwicklungsmanagements erfolgreich in einem koordinierten System zusammen. Ein Megatrend moderner Produktentwicklung ist die zunehmende Leichtbauorientierung, aufbauend auf einer systematischen Identifikation von Technologiepotenzialen für Leichtbauprodukte. Eine langfristige strategische Technologieplanung für den Leichtbau ermöglicht ein deutlich geringeres Entwicklungsrisiko und beeinflusst Produktgewicht und Ressourcenverbrauch und damit nachhaltig den Geschäftserfolg.

Dem entgegen stehen z. B. die Forderung nach einer zunehmenden Masseerhöhung im Automobilbau aufgrund steigender Sicherheits- und Umweltauflagen sowie einem zunehmenden Komfortbedürfnis, dem durch eine konsequente Umsetzung effizienter Leichtbaustrategien, wie z. B. Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, Änderung der Bauteilgeometrie oder Gestaltung des gesamten Systems begegnet werden kann. Bei all diesen Lösungsansätzen ist die virtuelle Produktentwicklung eine Kernaktivität im Produktentstehungsprozess, die sich bereits in vielen industriellen Branchen erfolgreich etabliert hat. Damit kann vor allem dem zunehmenden Trend nach Variantenvielfalt, leichten Produkten und kurzen Produktentstehungszyklen Rechnung getragen werden, weshalb sich die virtuelle Produktentwicklung als Schlüsseltechnik im Bereich Leichtbau zeigte. Diese stützt sich in der Praxis auf eine Vielzahl computergestützter Methoden, die in ihrer Allgemeinheit kurz als CAx-Methoden bekannt sind. Mögliche Bezeichnungen für den Endbuchstaben x reichen von D wie Design (deutsch: Konstruktion) über E wie Engineering (deutsch: Entwicklung) und M wie Manufacturing (deutsch: Produktion) bis zu S wie Styling (Gestaltung). Zur Ausschöpfung des gesamten Leichtbaupotenzials spielt der Systemleichtbau eine zentrale Rolle bei der Produktentstehung. Dabei werden technische Systeme unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den Wechselwirkungen innerhalb des Systems optimiert. Betrachtet wird hierfür ein Gesamt- oder Teilsystem eines Produkts, dessen Eigenschaften für den Kundennutzen und damit für eine vollständige Produktreife mit Hilfe virtueller sowie experimenteller Untersuchungsmethoden und deren Kombinationen validiert werden.

1 Der Prozess der Produktentstehung

Albert Albers, Andreas Braun, Jonas Heimicke, Thilo Richter

1.1	Grundlagen	9	1.2.2.2	Aktivitäten der Produktentstehung	21
1.1.1	Modellierung von Produktentstehungsprozessen	9	1.2.2.3	Problemlösungsprozess SPALTEN	24
1.1.2	Grundlagen der Systemtechnik	11	1.2.2.4	Das Systemtriple aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem	26
1.1.3	Das Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	12	1.2.2.5	Ressourcensystem	26
1.1.4	Bekannte Prozessmodelle	12	1.2.2.6	Phasenmodell	27
1.1.5	Grenzen herkömmlicher Prozessmodelle	14	1.2.2.7	Ganzheitliche Modellierung durch die verschiedenen Ebenen und deren Wechselwirkungen im iPeM	27
1.1.6	Neues Modell für einen Produktentstehungsprozess – Controlling vs. Entwicklerunterstützung	16	1.2.2.8	iPeM zur Nutzung von Erfahrung und Wissen im Produktentstehungsprozess	28
1.1.6.1	Controlling im Mittelpunkt	17			
1.1.6.2	Unterstützung von Entwicklern	17			
1.2	Das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell	18	1.3	Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff	29
1.2.1	Hypothesen der Produktentstehung	18	1.4	Zusammenfassung	32
1.2.2	Begriffe und Elemente des iPeM	21	1.5	Weiterführende Informationen	33
1.2.2.1	Aktivitätenmatrix	21			

Die ureigene Zielsetzung eines produzierenden Unternehmens ist die Entwicklung und Herstellung sowie der Vertrieb marktfähiger Produkte mit dem Zweck der Gewinnmaximierung. Unerheblich, ob es sich dabei um Entwicklungen mechatronischer Systeme mit hohem oder niedrigem Neuentwicklungsanteil handelt, die Produktentstehung erfolgt in weiten Teilen immer nach wiederkehrenden Abläufen und Mustern. Diese Handlungsabläufe und die Elemente, die zu deren Organisation und Management notwendig sind, werden in Modellen von Produktentstehungsprozessen (PEP) beschrieben. Insbesondere im Kontext Leichtbau ist die systematische Betrachtung der Produktentstehung im ganzheitlichen, organisationsübergreifenden Zusammenhang von höchster Bedeutung, um z. B. Fertigungs- oder Validierungsrestriktionen bereits bei der Gestaltmodellierung gerecht zu werden. Im Folgenden werden die Grundlagen und die wesentlichen Aspekte der Modellierung von Produktentstehungsprozessen beschrieben, die Prozessmodellierung basierend auf dem Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung fokussiert und an einem Beispiel aus dem Kontext Leichtbau verdeutlicht.

1.1 Grundlagen

Produkte

Im Kontext der Produktentstehung versteht man unter dem Begriff Produkt eine Ware oder Dienstleistung, die mit dem Ziel erzeugt wird, sie gewinnbringend am Markt an einen oder mehrere Kunden zu veräußern. Eine Ware kann dabei ein physisches Artefakt oder immaterielles Erzeugnis, wie zum Beispiel eine Software sein.

Produktlebenszyklus

Der Lebenszyklus eines Produkts umfasst die gesamte Zeitspanne von der Entwicklung eines Produktes über dessen Markteinführung bis hin zur Herausnahme aus dem Markt. Marktwirtschaftlich orientierte Produktlebenszyklusmodelle gliedern den Produktlebenszyklus in die vier Phasen Entwicklung und Einführung, Wachstum, Reife/Sättigung und Schrumpfung/Degeneration (Abb. 1.1).

Produktentwicklung

Als Produktentwicklung wird die Gesamtheit aller Tätigkeiten verstanden, welche dazu dient, ein Produkt von der ersten Idee bis zum marktfähigen Produkt zu entwerfen. Die Produktentwicklung umfasst dabei im Wesentlichen die Bereiche Entwicklung (inkl. Vorentwicklung), die Konstruktion und die Validierung eines Produkts.

Produktgenerationsentwicklung

Produkte werden unter Rückgriff auf Vorgängerprodukte, Konkurrenzprodukte, Produkte aus anderen

Branchen oder unter Rückgriff auf andere Artefakte entwickelt, welche als Referenz dienen und deren Gesamtheit das Referenzsystem bilden. Der Begriff „Produktgenerationsentwicklung“ reflektiert dieses Faktum und stellt Prozesse, Methoden und Tools zur Verfügung, um die Entwicklung neuer Produktgenerationen bestmöglich zu unterstützen.

Produktentstehung

Die Produktentstehung schließt die Produktentwicklung ein und beinhaltet darüber hinaus die Produktionsvorbereitung und die Produktion sowie alle Tätigkeiten, die mit der Vermarktung in Zusammenhang stehen. Die Produktentstehung steht somit am Beginn im Produktlebenszyklus. Die nachfolgenden Kapitel werden zeigen, dass sie nicht nur einen immensen Einfluss auf spätere Lebenszyklusphasen hat, sondern diese im Umkehrschluss auch bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung voraus bedacht und berücksichtigt werden müssen, um erfolgreiche Produkte zu entwickeln.

1.1.1 Modellierung von Produktentstehungsprozessen

Neue Produkte und deren Vertrieb dienen nicht nur dem ökonomischen Vorteil der produzierenden Unternehmen, sondern sind im Normalfall für den Kunden bzw. Anwender dieser Produkte von Nutzen. Auf diese Weise schaffen Produkte einen Mehrwert für die Gesellschaft. In diesem Sinne müssen Produkte immer sowohl für den Anbieter als auch für den Kunden und Anwender einen Vorteil bieten.

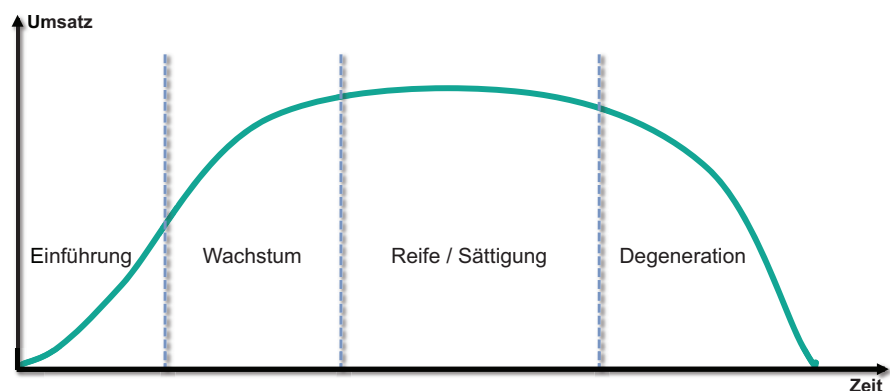


Abb. 1.1: Vier Phasen eines Produktlebenszyklus (Vernon 1966)

Dieser Vorteil für diese Gruppen entsteht allerdings nur, wenn es sich bei dem Produkt nicht nur um eine Invention im Sinne einer neuartigen Erfindung oder Entwicklung handelt, sondern um eine Innovation, welche am Markt erfolgreich ist (Schumpeter 1912). Um diesen Erfolg nachhaltig zu sichern, ist eine Ausrichtung der Produktentstehung am Markt unumgänglich. In einer systematischen Betrachtung müssen sowohl das eigene Unternehmen, der Kunde, aber auch der Wettbewerb mit einbezogen werden. Dabei ist zunächst sicherzustellen, dass die Kundenwünsche richtig erfasst und dem Entstehungsprozess zugänglich gemacht werden; ferner muss die Umsetzung der Wünsche in funktionale Produkte unter ökonomischen Randbedingungen erfolgen. Weitere Restriktionen sind die Kapazitäten und Randbedingungen des eigenen Unternehmens, wie auch die Wettbewerbssituation im betrachteten Marktsegment (Abb. 1.2).

„Das Richtige richtig entwickeln!“ – Dieser Herausforderung kann durch methodische Unterstützung in den verschiedenen Aktivitäten der Produktentstehung begegnet werden. Um die Methoden der Konstruktionswissenschaften (CAD, FEM-Werkzeuge etc.) effektiv einsetzen zu können, ist es beispielsweise hilfreich, eine Struktur vorzugeben, die den Entwicklern zur Orientierung dient. Somit kann prozessorientiert eine adäquate Unterstützung bereitgestellt werden. Wiederkehrende Lösungsmuster in verschiedenen Entwicklungsprojekten lassen sich auf diese Weise zu Hilfestellungen in Form

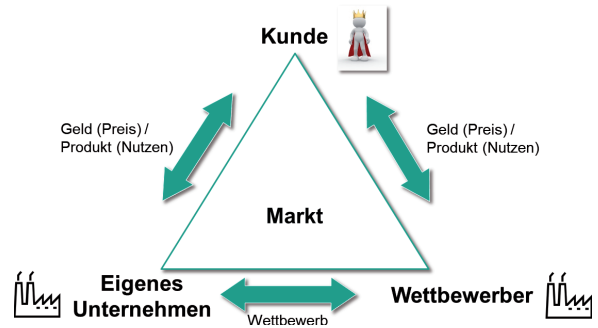


Abb.1.2: Das Marktdreieck Kunde - Unternehmen - Wettbewerb (nach Deltl 2004)

von Handlungsanleitungen zusammenfassen, die wiederholt verwendet werden können. Modelle von Produktentstehungsprozessen schaffen genau eine solche Struktur.

Wie wichtig eine effiziente Produktentstehung ist, wird durch die Abbildung 1.3 veranschaulicht, aus der hervorgeht, dass Entwicklung und Produktion zunächst Kapital in Anspruch nehmen, bevor nach der Markteinführung ein Umsatz erwirtschaftet werden kann. Es gilt diese Time-to-Market (Zeitraum bis zur Einführung eines Produktes am Markt) so kurz wie möglich zu halten.

Trotz dieses Zeit- und Kostendrucks müssen Fehler in den frühen Phasen eines Produktlebenszyklus vermieden werden. Nach der sogenannten Zehnerregel gilt, dass sich die Kosten zur Behebung von Fehlern mit jeder neuen Produktentstehung um den Faktor zehn erhöhen (Abb. 1.4). Eine geeignete Modellierung von Produktentstehungsprozessen und deren

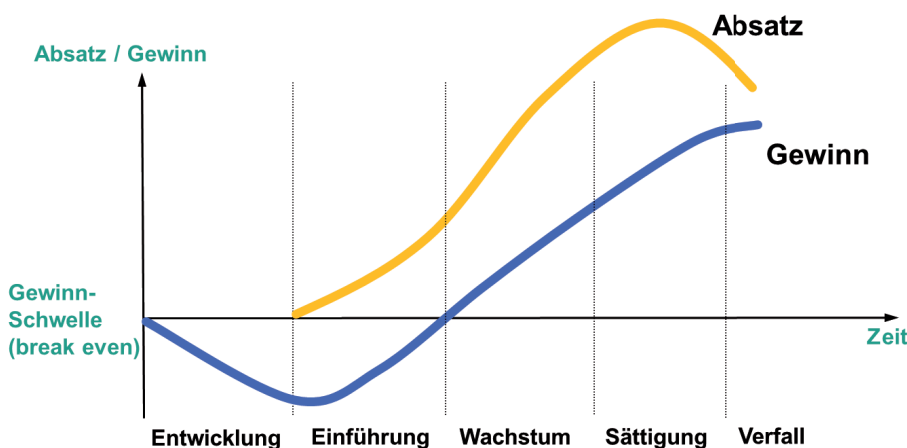


Abb.1.3: Umsatzkurve über die Lebenszyklusphasen (nach Ehrlenspiel 2003, Geyer 1976)

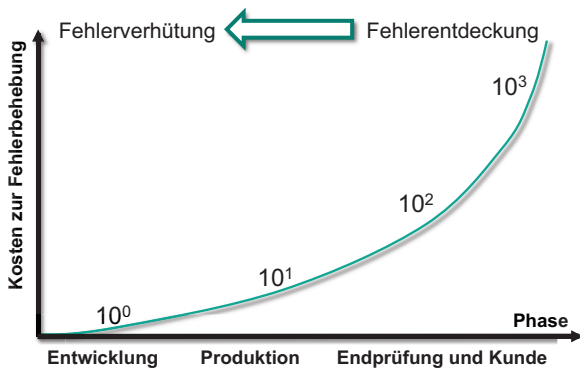


Abb.1.4: Zehnerregel der Kosten zur Fehlerbehebung (Ehrlenspiel 2003, nach Reinhart et al. 1996)

Zielen hilft, diese Kosten und die Time-to-Market zu reduzieren.

1.1.2 Grundlagen der Systemtechnik

Die Produktentstehung lässt sich als ein System modellieren (Ropohl 1975). Ohne Kenntnis ihres inneren Aufbaus können Systeme als Black Box dargestellt werden. Dabei werden lediglich drei über die Systemgrenze übertragene Größen Stoff, Energie und Information betrachtet. Systeme können hierarchisch aus Subsystemen aufgebaut sein und/oder ihrerseits Subsysteme übergeordneter Systeme sein (Abb. 1.5).

Auch die Produktentstehung kann auf Basis der allgemeinen Systemtheorie modelliert werden. Dabei handelt es sich um ein komplexes System, das eine Summe von Eingangsgrößen (Ziele) in eine Summe von Ausgangsgrößen (Objekte) überführt, wobei eine dieser Ausgangsgrößen das eigentliche Produkt darstellt. Anfallende „Nebenprodukte“ sind Dokumente, wie Anforderungslisten, Projektpläne und Prüfberichte, virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Prototypen, alle Simulationsergebnisse etc. Die Summe aller entstehenden Objekte und deren Beziehungen untereinander bilden das *Objektsystem*. Die Eingangsgrößen stellen Ziele dar, wobei einige dieser Ziele bereits zu Beginn des Produktentstehungsprozesses definiert werden (können), und andere erst im Laufe des Prozesses – etwa, wenn die Auswertung einzelner Objekte, wie z. B. Prüfberichte zu neuen Schlüssen führt – entstehen. Die Ziele, mit ihnen verbundene Anforderungen und beschränkende Randbedingungen stehen durch vielfältige Verknüpfungen und Wechselwirkungen in Beziehung zueinander und bilden das *Zielsystem* (Ropohl 1979). Bei der Produktentstehung handelt es sich um ein *sozio-technisches* System. Neben Arbeitsmitteln, Entwicklungswerkzeugen und Fertigungstechnologien ist in hohem Maße der Mensch als zentraler Akteur im Produktentstehungsprozess relevant. Dabei bestimmt zum einen der menschliche Wunsch

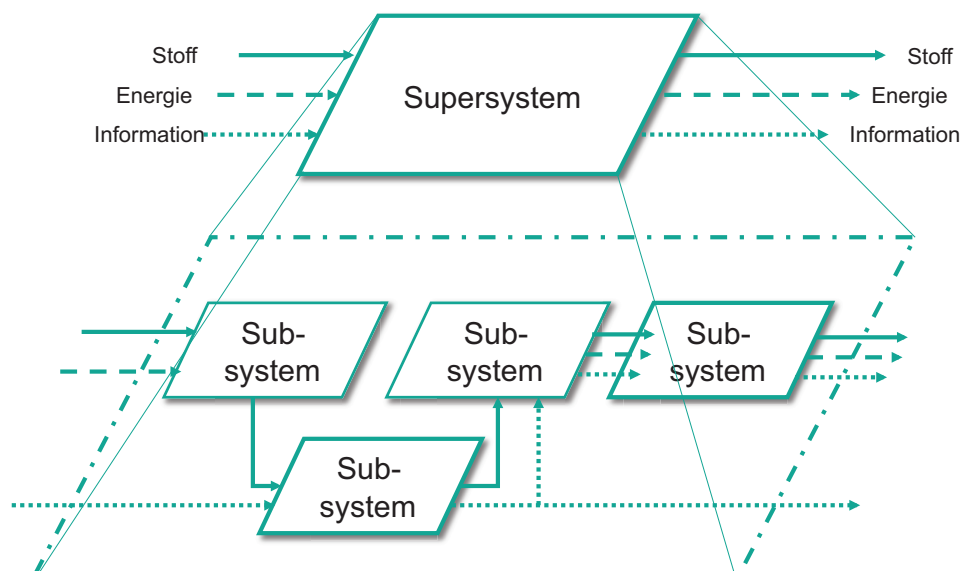


Abb.1.5: Modell der Produktentstehung anhand von Black Boxen und Veranschaulichung der übertragenen Größen (Ehrlenspiel 2003)

nach einer Veränderung der Natur (z. B. die Herstellung eines Werkzeugs zu einem bestimmten Zweck) oder zum anderen der Wettbewerbsdruck am Markt die anfängliche Zielsetzung der Produktentstehung. Durch das Einbringen seiner Arbeitskraft und vor allem seiner (kreativen) Wissensarbeit in den Entstehungsprozess ist der Mensch weiterhin maßgeblich an der Transformation von Zielen in Objekte beteiligt. Durch die Konsumierung der Objekte letztlich werden diese ihrer Bestimmung zugeführt. Alle am Transformationsprozess von Zielen in Objekte beteiligten Elemente bilden das Handlungssystem (Ropohl 1979).

1.1.3 Das Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Etablierte Theorien zur Beschreibung von Entwicklungsvorhaben aus Konstruktionsmethodik (Pahl et al. 2007) oder Innovationsmanagement (Henderson und Clark 1990) sind nicht in der Lage, die gesamte Breite an Neuentwicklungsanteilen realer Produktentwicklungsprojekte vollständig zu beschreiben. Ein detailliertes und fundiertes Verständnis über die Anteile neuentwickelter Komponenten in einem System ist allerdings hinsichtlich der Entscheidungsfindung für nachgelagerte Aktivitäten insbesondere in frühen Entwicklungsphasen anzustreben. Diese beeinflussen maßgeblich nachgelagerte Prozess- und zukünftige Produkteigenschaften (z. B. in Kosten, Entwicklungszeit und Qualität). Das Beschreibungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach (Albers et al. 2015) dient der vollständigen Beschreibung unternehmerischer Produktentwicklungsvorhaben und stellt zudem die Basis für die (Weiter-)Entwicklung von Methoden, Prozessen und Tools im Bereich der Forschung dar. Der Ansatz der PGE fußt hierbei auf zwei fundamentalen Hypothesen! Zum einen werden neue Produkte oder Lösungen immer auf Basis eines Referenzsystems entwickelt. Dieses enthält Referenzsystemelemente, die beispielsweise unternehmenseigene Vorgängerprodukte, Produkte des Wettbewerbs, darüber hinaus jedoch ebenso branchenferne Lösungen oder solche aus dem Bereich der Forschung sein. Die Referenzsystemelemente dienen

der jeweiligen Entwicklung der Teilsysteme der zugehörigen Produktgeneration als Referenz bei der Umsetzung (Albers 2019). Die zweite grundlegende Hypothese, die der PGE zugrunde liegt, besagt, dass die Entwicklung einer neuen Produktgeneration durch die systematische Kombination der Aktivitäten Übernahmevariation (ÜV), Gestaltvariation (GV) und Prinzipvariation (PV) erfolgt. Der Neuentwicklungsanteil einer Produktgeneration wird aus dem Anteil aus GV und PV gebildet. Der Ansatz der PGE lässt sich demnach mittels eines mathematischen Modells ausdrücken. Zu diesem Zweck ist die Menge aller Teilsysteme einer neuen Produktgeneration anhand ihrer Variationsart zunächst drei Teilmengen zuzuordnen. Dabei beschreiben $\dot{U} S_{n+1}\{TS|\dot{U}V_{(TS)}\}$ die Menge derjenigen Teilsysteme einer neuen Produktgeneration, die durch ÜV entwickelt wurden, $G S_{n+1}\{TS|GV_{(TS)}\}$ die Menge derjenigen Teilsysteme einer neuen Produktgeneration, die durch GV entwickelt wurden und $P S_{n+1}\{TS|PV_{(TS)}\}$ die Menge derjenigen Teilsysteme einer neuen Produktgeneration, die durch PV entwickelt wurde. Die neue Generation eines Produkts (G_{n+1}) lässt sich dann durch die Vereinigung der drei Teilmengen ausdrücken: $G_{n+1} = \dot{U} S_{n+1} \cup G S_{n+1} \cup P S_{n+1}$.

1.1.4 Bekannte Prozessmodelle

Folgende Prozessmodelle zur Produktentstehung sind bekannt:

VDI-Richtlinie 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 (Abb. 1.6) stellt eine Kernrichtlinie der Produktentwicklung dar und umfasst die Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Sie besteht aus zwei Teilen (Blatt 1 und Blatt 2). Blatt 1 umfasst die allgemeingültigen Grundlagen der methodischen Produktentwicklung und die Definition von zentralen Zielen, Aktivitäten und Arbeitsergebnissen, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit Leitlinien für die Anwendung in der Praxis darstellen. Blatt 2 umfasst exemplarische Produktentwicklungsprozesse in unterschiedlichen Branchen und mögliche Zuordnungen der Aktivitäten zu Prozessphasen. Die Beispielprozesse

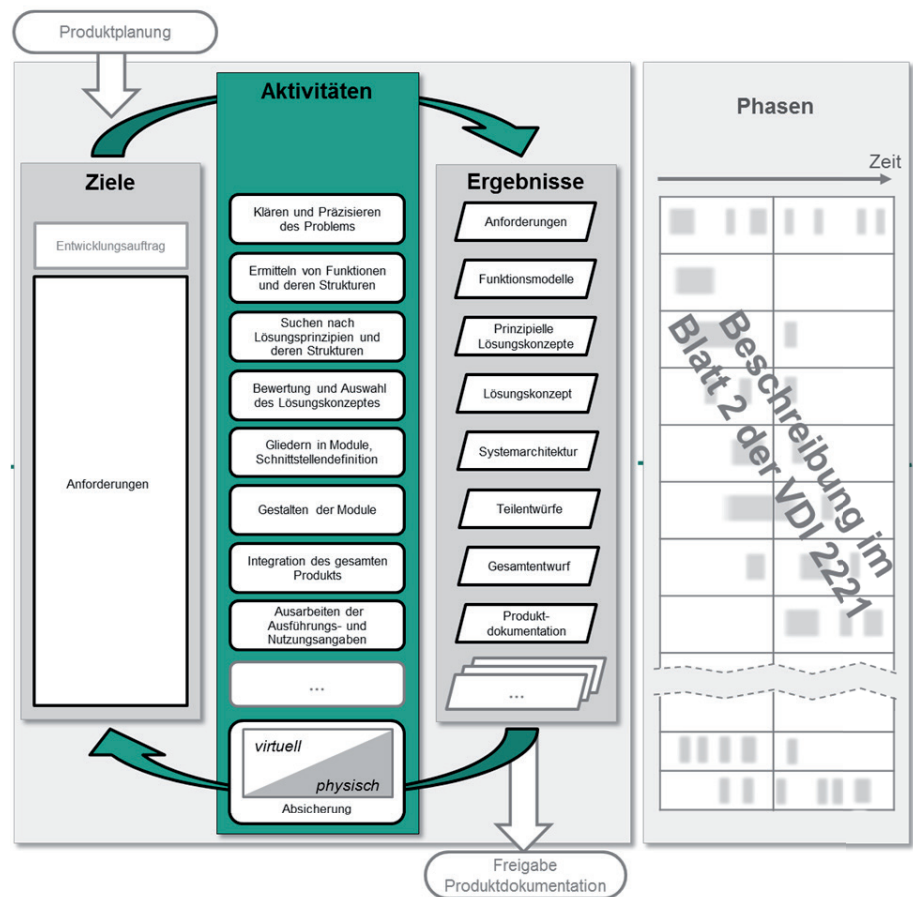


Abb. 1.6: Arbeitsschritte beim Planen und Konstruieren (VDI-Richtlinie 2221)

sollen Anwendern den Bezug zu speziellen Verhältnissen und Begriffen erleichtern und außerdem dazu anregen, das eigene Vorgehen inhaltlich und organisatorisch zu reflektieren und gegebenenfalls anzupassen.

Stage-Gate-Modell von Cooper

Cooper entwickelte das Stage-Gate-Modell, um Entwicklungsprozesse hinsichtlich der Zeit und Qualität der Prozessdurchführung sowie einer priorisierten Zielverfolgung zu optimieren (Cooper 1994). Damit soll der Projektfortschritt messbar und somit prüfbar gemacht werden. Dieser *managementorientierte Ansatz* unterteilt Produktentwicklungsprozesse in sequenzielle Phasen, die durch sogenannte Gates streng voneinander getrennt sind. Diese Gates fungieren als Meilensteine, zu denen die Übergabe an die jeweils nächste Phase folgt. Dabei wird auf Basis der bis dorthin erarbeiteten Informationen

vom Management eine Entscheidung anhand zuvor definierter Kriterien über das weitere Vorgehen (Fortführung, Iteration oder Abbruch) getroffen. Stage-Gate-Prozesse sind in der industriellen Praxis weit verbreitet.

Fuzzy-Stage-Gate-Ansatz

Die Fortentwicklung dieses Ansatzes ist eine Logik, die auf sogenannten Fuzzy-Gates basiert (Abb. 1.7). Dabei sind die Zeitpunkte der Gates nicht vorgegeben, sondern ergeben sich aus dem Projektfortschritt und der Ressourcenverwaltung. Überlappende Phasen erstrecken sich hier über mehrere Gates, was eine flexiblere und situationsangepasste Terminierung zulässt, wobei die Informationsübergabe zwischen den Akteuren verschiedener Phasen beispielsweise durch Ansätze wie Core-Team-Management weiter unterstützt werden kann.

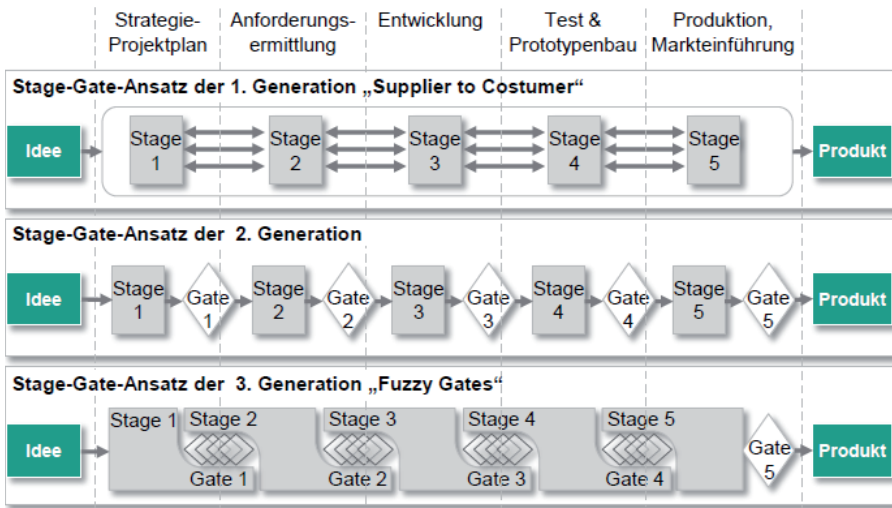


Abb.1.7: Stage-Gate-Ansatz nach Cooper – drei Generationen von Entwicklungsprozessen (nach Bursac 2016)

V-Modell der VDI-Richtlinie 2206

Das sogenannte V-Modell (VDI-Richtlinie 2206) verbindet die VDI-Richtlinie 2221 mit Ansätzen aus der Softwareentwicklung (Abb. 1.8) und steht hier für die Gruppe *domänenspezifischer* Prozessmodelle.

Die Herausforderung bei mechatronischen Systemen liegt darin, dass über die Phasengrenzen hinweg sehr eng zwischen den Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik zusammengearbeitet werden muss. In drei Betrachtungsebenen, auf System-, Subsystem- und Komponentenebene, werden die Prozessschritte *Systementwurf*, *Ausarbeitung domänenspezifischer Elemente* und *Systemintegration* bearbeitet. Bei der Integration werden die Systemeigenschaften mit den Spezifikationen aus der Entwurfsphase abgeglichen – die beiden Schenkel des V werden hierdurch in Beziehung zueinander gesetzt. Beim V-Modell handelt es sich um eine Erweiterung der sequenziellen Vorgehensmodelle wie der VDI-Richtlinie 2221.

Integrative Ansätze

In der integrierten Produktentwicklung wird der Fokus auf die Erfassung und Erfüllung der Kundenwünsche gelegt, wobei alle am Prozess beteiligten Stakeholder (Kunde, Wettbewerber, eigenes Unternehmen inklusive Zuliefererkette und Vertriebsnetzwerk) berücksichtigt werden (Ehrlenspiel 2003).

Beispielhaft für einen integrativen Ansatz zeigt Abbildung 1.9 das Vorgehensmodell nach Gausemeier. Er unterscheidet in seinem Phasenmodell drei Zyk-

len (Iterationen einer Reihe bestimmter Aktivitäten): die Definition der Produktstrategie, die Produktentwicklung und die Produktionssystementwicklung. Während im ersten Zyklus Erfolgspotenziale ermittelt und daraus erfolgsversprechende Produktkonzepte abgeleitet werden, steht im zweiten Zyklus „die Verfeinerung der domänenübergreifenden Prinziplösung durch die Experten der Domänen“ (Gausemeier 2002) im Vordergrund. Im dritten Zyklus werden der Herstellungsprozess geplant und der Serienanlauf vorbereitet.

1.1.5 Grenzen herkömmlicher Prozessmodelle

Die zuvor beschriebenen Prozessmodelle sind in der Industrie unterschiedlich stark vertreten und oft in Details verändert beziehungsweise an die jeweiligen Aufgabenstellungen angepasst. Dennoch ist ihnen eine Reihe von Nachteilen gemein. Das größte Defizit der genannten Handlungsschemata ist deren mangelnde Reaktionsfähigkeit im Umgang mit Komplexität. Das System der Produktentstehung wird durch eine Vielzahl verschachtelter Elemente gebildet, die zumeist eng miteinander verknüpft sind und in vielfältiger wie auch wechselnder Beziehung zueinanderstehen. Im heutigen Kontext der Globalisierung bedeutet dies, dass die Produktentstehung zumeist in verteilten Umgebungen und unter einem sehr intensiven Austausch von Informationen stattfindet. Der zunehmende Zeit- und Kostendruck sowie der

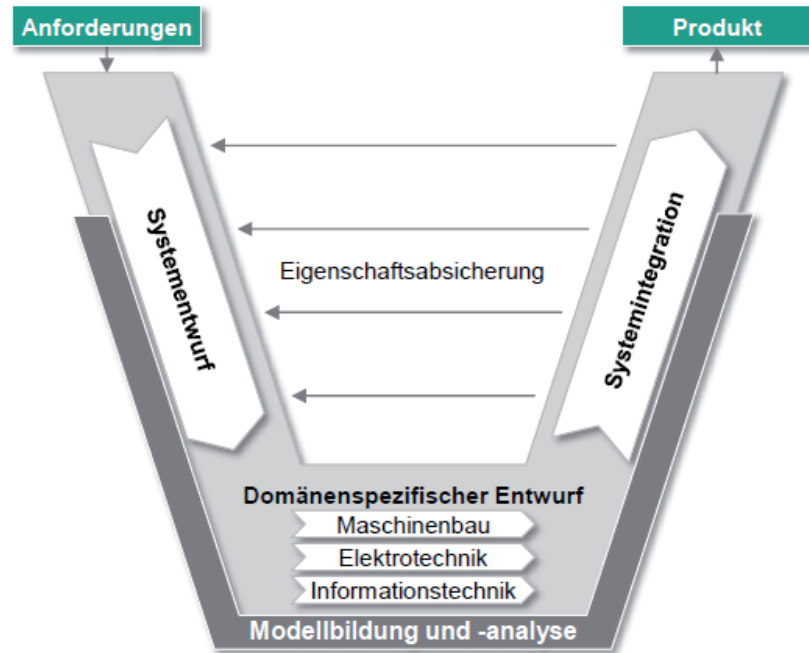


Abb.1.8: V-Modell im Mechatronik-Design (VDI-Richtlinie 2206; Abbildung nach Bursac 2016)

Trend zu individualisierten Käufermärkten steigern die Komplexität noch weiter. Zudem ändern sich die Randbedingungen der Produktentstehung typischer-

weise auch während des Produktentstehungsprozesses. Sie sind daher in der Praxis oft von einer großen Unschärfe und Unvollständigkeit gekennzeichnet.

Von der Geschäftsidee...

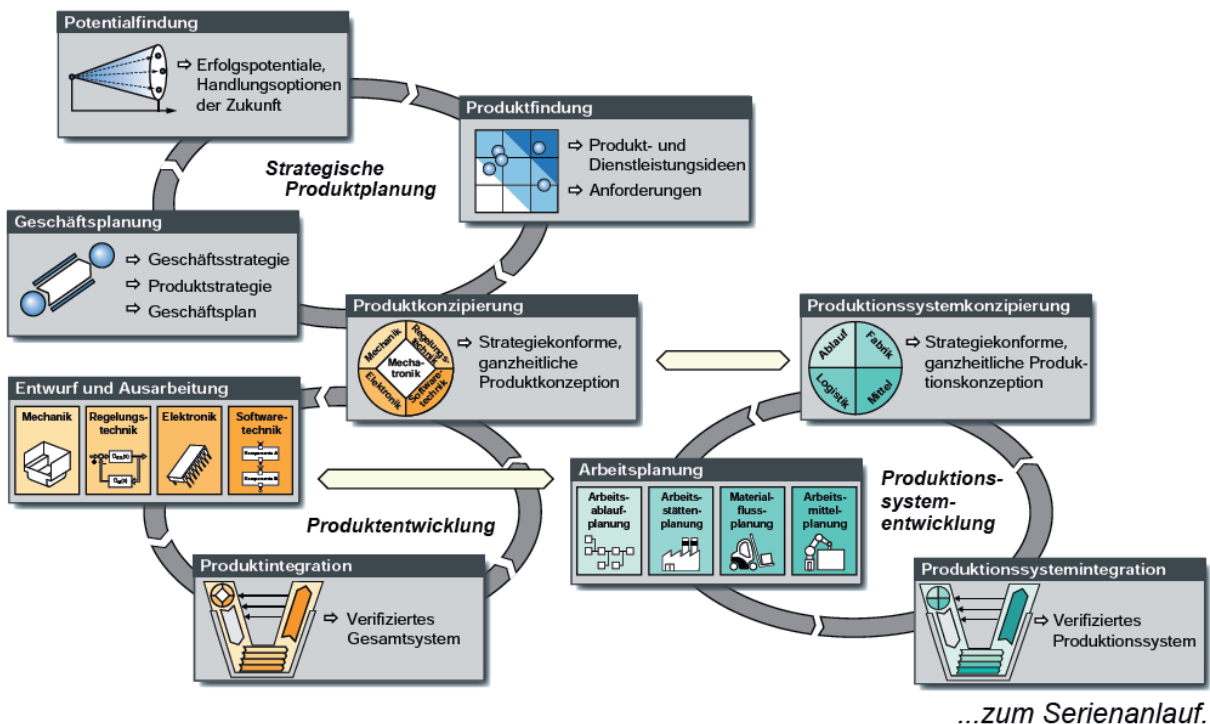


Abb. 1.9: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung (Gausemeier 2014)

Die meisten Prozessmodelle greifen diese Faktoren nicht auf. Weiterhin wird der hohen Dynamik heutiger Produktentstehungsprozesse nicht Rechnung getragen und auch der hohe Grad an Vernetzung der Prozesselemente wird meist nur stark vereinfacht dargestellt (Meboldt 2008).

Die Komplexität der Produktentstehung macht das Planen sehr schwierig. Präskriptive Modelle, also Ansätze, welche die sequenziellen Entwicklungsschritte starr vorgeben, führen dazu, dass die in der Praxis üblichen Prozess-Iterationen nicht abgebildet werden können. Sie lassen sich nur sehr schwer an sich verändernde Randbedingungen anpassen, was in der Konsequenz dazu führt, dass die Innovationskraft der Entwickler zugunsten eines erhöhten Risikokodens geschmälert wird.

Andererseits bieten zu offen beziehungsweise zu weit definierte Modelle wenig konkrete Hilfestellungen für Entwickler. Sie sind – um möglichst viele Eventualitäten abdecken zu können – bewusst so formuliert, dass sie einen breiten Interpretationsspielraum zulassen. Dies macht es schwer, fassbare Handlungsanweisungen abzuleiten. Um die operativ tätigen Entwickler evident unterstützen zu können, ist eine klare Ordnungsstruktur, in die konkrete Werkzeuge und Methoden eingeordnet werden können, notwendig. Nur damit lassen sich auch wiederholbare Lösungsmuster beschreiben.

Oftmals unterstützen Modelle nur eine Sicht auf den Produktentstehungsprozess: Die der operativ tätigen Produktentwickler oder die des Managements. Das folgende Kapitel macht deutlich, dass beide Sichten für erfolgreiche Entwicklungsprojekte notwendig sind. Dies macht es nicht zuletzt auch sehr schwierig, ein durchgängiges Wissensmanagement aufzubauen. Durch Ad-hoc-Lösungen und improvisierte Maßnahmen bei unvorhergesehenen Problemen wird ein Transfer von Prozesswissen in zukünftige Projekte stark erschwert. Gerade dieses Know-how ist für ein Unternehmen jedoch sehr wichtig. Der Mensch als Problemlöser im Mittelpunkt der Produktentstehung prägt den Entstehungsprozess wesentlich. Die Produktentstehung ist ein in weiten Teilen heuristisch geprägter, kreativer Prozess, der von den individuellen Fertig-

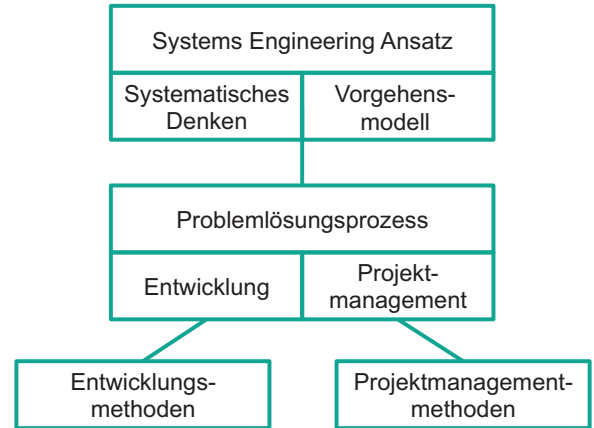


Abb.1.10: *Systems Engineering Ansatz* (Züst 2003)

keiten und Erfahrungen der Beteiligten abhängt. Neben dem richtigen Einsatz verschiedenartiger Entwicklungswerkzeuge gilt es letztlich, dieses Prozesswissen zu dokumentieren und explizit zur Verfügung zu stellen, um langfristig erfolgreich zu sein.

Wissenschaftler wie Patzak, Daenzer, Hubka, Dumitrescu und Eder haben den Ansatz des Systems Engineering erarbeitet. Dieses Rahmenwerk zielt darauf ab, den beschriebenen Schwierigkeiten dadurch zu begegnen, dass dem Vorgehensmodell der Produktentstehung eine systematische Denkschule gegenübergestellt wird. Der Produktentstehungsprozess wird darin grundsätzlich in zwei Welten unterteilt, nämlich das eigentliche Entwickeln und das Projektmanagement als solches. Beide Aspekte, so die Philosophie des Systems Engineering, sind gleichermaßen wichtig, um eine technische Problemstellung in eine erfolgreiche Lösung zu überführen (Abb. 1.10).

1.1.6 Neues Modell für einen Produktentstehungsprozess – Controlling vs. Entwicklerunterstützung

Es ergeben sich zwei unterschiedliche Sichten und damit verschiedene Ziele und Anforderungen an Modelle für Produktentstehungsprozesse, die beide wichtig sind. Wird eine Sichtweise zu sehr betont, besteht die Gefahr, dass die andere vernachlässigt wird.

1.1.6.1 Controlling im Mittelpunkt

Aus Sicht des Controllings stehen messbare kosten- und zeitorientierte Zielgrößen im Mittelpunkt der Betrachtung. Dabei sollen diese Größen zum einen an den Bedürfnissen des Marktes ausgerichtet und so definiert sein, dass sie das ausgewählte Marktsegment möglichst genau beschreiben und zum anderen gleichzeitig die Ressourcen des eigenen Unternehmens exakt auslasten. Die Konkurrenzsituation soll dabei ebenfalls möglichst zielführend berücksichtigt sein, d. h. entweder wird das Unternehmen mit der Spezifikation des Produktprofils bewusst in einen horizontalen Wettbewerb geführt (gleiches Marktbedürfnis wird mit einem vergleichbaren Produkt befriedigt), oder aber eben diese direkte Wettbewerbssituation wird versucht, im vertikalen Wettbewerb zu umgehen (mit vollkommen verschiedenen Produkten für dasselbe Bedürfnis). Weiterhin liegen die Überwachung der Zielgrößen und deren Erreichen im Fokus der Betrachtung des Controllings. So gilt es einerseits, die Ziele des Produktentstehungsprozesses kontinuierlich an sich ändernde Randbedingungen anzupassen. Dies ist beispielsweise notwendig, wenn ein Kunde plötzlich seine Wünsche ändert. Neben der Definition und Kommunikation dieser neuen Ziele ist hierbei vor allem das rechtzeitige Erfassen der sich ändernden Randbedingungen ein nicht zu unterschätzendes Problem. Andererseits zielen die Aktivitäten des Controllings darauf ab, die Ressourcen des Unternehmens möglichst adäquat auszunutzen. Wenn sich also Zielsetzungen weiterentwickeln, muss kontinuierlich eine Umverteilung von Arbeitspaketen und Prüfstandslaufzeiten etc. vorgenommen werden, um eine möglichst kurze Time-to-Market sicherzustellen und das Kostenlimit nicht zu überschreiten.

Bei der Planung von Produktentstehungsprozessen kann eine entsprechende Modellierung eine große Hilfe sein. Ein Produktentstehungsprozess-Modell muss über alle Phasen einer realen Produktentstehung die notwendigen Aktivitäten und die beteiligten Personen/Produktionsmittel abbilden und miteinander in Beziehung setzen können. Darüber

hinaus gilt es, die Zeitintervalle (wann welche Aktivität von wem durchgeführt wird), und die dabei entstehenden Informationen und Ergebnisse zu beschreiben und zu speichern. Erst damit ist es möglich, einen realen Produktentstehungsprozess während seiner Ausführung vollständig aufzuzeichnen. Eine solche Aufzeichnung kann dann genutzt werden, um aus dem Verlauf des Prozesses zu lernen und mit den entsprechend gezogenen Schlüssen ein verbessertes Modell für die Planung eines neuen Prozesses vorzunehmen. In der industriellen Praxis spricht man hierbei vom kontinuierlichen Verbesserungsprozess KVP.

1.1.6.2 Unterstützung von Entwicklern

Neben der übergeordneten Planbarkeit von Produktentstehungsprozessen, also der managementorientierten Sichtweise des Controllings, ist die operative Unterstützung und Begleitung der Entwickler im Prozess von entscheidender Bedeutung. Beobachtungen in der Erforschung realer Produktentstehungsprozesse zeigen, dass die instabile und hochgradig dynamische Natur dieser Prozesse hierfür eine hohe Flexibilität erfordert, wenn Modelle der Produktentstehung erstellt und genutzt werden sollen. Zahlreiche Studien belegen, dass viele der bereits beschriebenen Prozessmodelle in der industriellen Praxis nicht oder nur unzureichend angewendet werden können (Meboldt 2008).

Trotz einer sorgfältigen Vorausplanung ergeben sich in realen Produktentstehungsprozessen fast immer Änderungen, auf die die Entwickler reagieren müssen. Ein zielorientiertes Controlling, das sich durchgängig über alle Phasen des Produktentstehungsprozesses erstreckt, ist unumgänglich. Dies erfordert, Werkzeuge und Mittel zur Unterstützung bereitzustellen. Eine Prozessmodellierung, die beiden Sichten auf Produktentstehungsprozesse gerecht wird und die für beide Seiten verständlich ist, kann dazu einen wesentlichen Beitrag leisten.

In der komplexen Produktentstehung mit sich verändernden Zielvorgaben kann den Entwicklern vor allem mit einer klaren und eindeutigen Vorgabe

I für den systematischen Umgang mit Informationen geholfen werden. Die kontinuierliche Modellierung und Erweiterung des Zielsystems des Prozesses sowie dessen Repräsentation und Kommunikation ist eine Möglichkeit der Umsetzung. Darüber hinaus ist der kontinuierliche Lernprozess während der Produktentstehung und über die Grenzen einzelner Projekte hinweg sicherzustellen. Um die einzelnen Tätigkeiten in der Produktentstehung miteinander in Beziehung setzen zu können und den Beteiligten eine Orientierungshilfe zu geben, muss eine Prozessmodellierung weiterhin die Aktivitäten der Produktentstehung und der Problemlösung beinhalten und kommunizierbar machen. Damit wird es auch möglich, individuelle Methoden und Werkzeuge, wie z. B. CAX-Tools oder Kreativitätstechniken, gezielt bereit zu stellen. So erhalten Entwickler idealerweise die benötigte methodische Unterstützung im jeweils richtigen Moment. Im folgenden Kapitel wird ein Ansatz für ein solches Modell eingeführt und erläutert.

1.2 Das iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Das iPeM – integrierte Produktentstehungsmodell ist ein Ansatz zur Prozessmodellierung, der die oben genannten Aspekte in einem konsistenten Modell zusammenführt. Das iPeM ist ein Metamodell; d. h. es besitzt einen generischen Charakter und enthält alle Elemente, die notwendig sind, um für individuelle Problemstellungen in der Produktentstehung angepasste Modelle daraus abzuleiten (Albers und Meboldt 2007).

In den folgenden Abschnitten werden die Hypothesen der Produktentstehung, die dem Metamodell iPeM zugrunde liegen, und die einzelnen Elemente des Ansatzes sowie deren Beziehungen untereinander beschrieben. Darauf folgend wird die Anwendung des iPeM an einem Anwendungsfall im Bereich Leichtbau erläutert.

1.2.1 Hypothesen der Produktentstehung

Für ein grundlegendes Verständnis von Produktentstehungsprozessen können fünf zentrale Hypothesen formuliert werden (Albers 2010). Auf dieser Basis lässt sich das Metamodell iPeM aufbauen, welches die beiden Sichten, die im vorigen Abschnitt differenziert wurden, berücksichtigt: Die Unterstützung operativ tätiger Entwickler und die managementorientierte Sicht des Controllings. Der Ansatz fußt auf der allgemeinen Systemtheorie. Die zentralen Hypothesen beruhen auf langjährigen Erfahrungen in der Erforschung und Durchführung von Entwicklungsprojekten mit Unternehmen am IPEK - Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und begründen einen Modellierungsansatz, der realen Produktentstehungsprozessen sowie dem Erklärungsmodell der PGE – Produktgenerationsentwicklung gerecht wird.

1. Hypothese: Individualität von Produktentstehungsprozessen

Jeder Produktentstehungsprozess ist einzigartig und individuell.

Kein Entstehungsprozess wird je exakt gleich wiederholt werden. Andere Zielsetzungen oder Randbedingungen, unvorhergesehene Schwierigkeiten und subjektiv operierende und/oder veränderte Handlungssysteme führen immer zu einem einzigartigen Verlauf eines Produktentstehungsprozesses. Es lässt sich zeigen, dass sich die Elemente dieser Modelle zwar in jedem Prozess ähneln, sowohl ihre Ausprägungen als auch ihre Beziehungen untereinander jedoch von Prozess zu Prozess immer individuell sind (Albers 2010). Die Struktur des Metamodells bleibt unverändert, aber die Ausführung einer Produktentstehung führt immer zu einzigartigen Beziehungen und Informationsflüssen zwischen den Elementen.

2. Hypothese: System der Produktentstehung

Auf den Grundlagen der Systemtheorie lässt sich eine Produktentstehung als die Transformation eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschreiben.

Ein Produktentstehungsprozess und die Beziehungen seiner Elemente untereinander und entlang eines Zeitstrahls hängen von den Zielen, den zu erschaffenden Objekten und der operativen/funktionalen Einrichtung (Handlungssystem), die die Transformation ausführt, ab. Die drei Elemente sind voneinander abhängig (Abb. 1.11). Das *Handlungssystem* ist ein sozio-technisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist (Ropohl 1975). Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Infrastruktur etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem. Beide Systeme sind ausschließlich durch das Handlungssystem miteinander verbunden. Das *Zielsystem* umfasst die mentale Vorstellung der geplanten Eigenschaften eines Produkts und alle dafür notwendigen Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Die Ziele beschreiben dabei den gewünschten zukünftigen Zustand des Produkts (und seiner Komponenten) und dessen Kontext, nicht jedoch die Lösung als solche. Das Zielsystem wird im Verlauf des Produktentstehungsprozesses fortwährend erweitert und konkretisiert (Ropohl 1979).

Das *Objektsystem* enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben den Entwicklungsgenerationen und Zwischenprodukten – wie Projektplänen, Zeichnungen, Prototypen usw. – eines der Elemente

des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Validierung neue Ziele ab. So führt die Entscheidung über einen gewählten Antrieb beispielsweise zwangsläufig zu neuen Zielen, wie etwa dem Bedarf nach geeigneten Kühlsystemen. Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.

3. Hypothese: Validierung

Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.

Wie zuvor beschrieben, wird durch Aktivitäten der Analyse und Validierung ein kontinuierlicher Abgleich zwischen Soll-Zustand (Zielsystem) und erreichtem Ist-Zustand (Objektsystem) vorgenommen. Die fortlaufende Erweiterung des Zielsystems wird maßgeblich durch die Validierungsschritte des Handlungssystems erbracht.

Die folgenden Kapitel werden zeigen, dass die Validierung einerseits als eine eigene Produktentstehungsaktivität, die der Revision von Objekten (meist Prototypen oder Simulationsmodelle) nach deren Gestaltung dient, betrachtet werden kann. Andererseits tritt sie jedoch auch als eine wiederkehrende Aktivität *innerhalb* jedes einzelnen Prozessschrittes der Produktentstehung auf. Bei der Transformation eines Zielsystems in ein Objektsystem ist es unabdingbar,

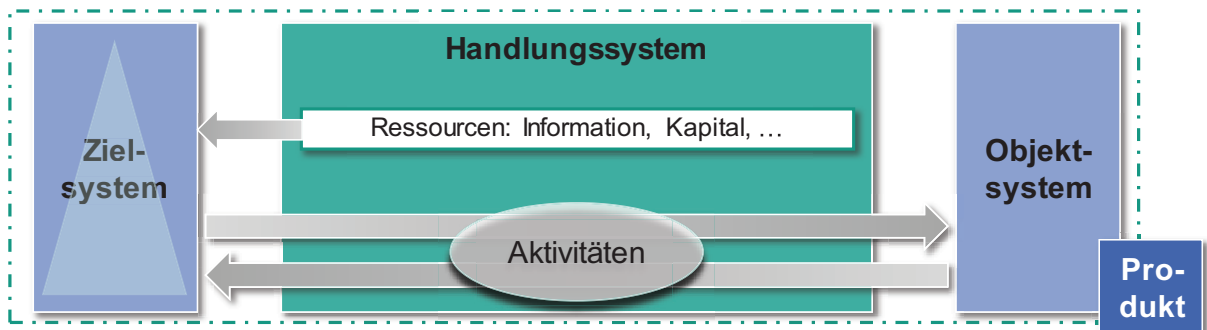


Abb. 1.11: System der Produktentstehung abgebildet und Interaktion zwischen Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

die Ergebnisse und den Prozessverlauf *kontinuierlich* an den Zielvorgaben zu messen und im Sinne des Controllings rechtzeitig Maßnahmen zu definieren, um den Produktentstehungsprozess erfolgreich auszuführen.

4. Hypothese: Zielbeschreibung in der Problemlösung

Die Transformation von Zielen in Objekte kann als Problemlösungsprozess betrachtet werden.

Dabei gibt es einen Ist-Zustand, der in einen geplanten Soll-Zustand überführt werden soll, wobei der Weg und die Mittel – oder aber auch sowohl der vorliegende Ist-Zustand als auch der gewünschte Soll-Zustand – dieser Überführung unklar sein können. Aufgrund der hohen Dynamik von Produktentstehungsprozessen und der Tatsache, dass heutige Produktentstehungsprojekte oftmals in global verteilten, interdisziplinären Teams erfolgen, ist eine kohärente Modellierung der Ziele dieser Prozesse notwendig. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass alle Beteiligten eine gemeinsame Sprache bei der Beschreibung der Elemente (Teilergebnisse) im Produktentstehungsprozess sprechen. Nur so kann

ein Projekterfolg über den Verlauf eines Prozesses (mit sich ändernden Parametern) sichergestellt werden, und es kommt nicht zu Spekulationen oder Missverständnissen. Die Objekte, die in Produktentstehungsprozessen erstellt werden, müssen hinsichtlich der gewünschten Produktfunktionen, die Teil des Zielsystems sind, beschrieben werden, um die Ziele transparent zu halten. Die Funktionen technischer Systeme können immer als Wechselwirkungen von Wirkflächenpaaren (WFP) und die sie verbindenden Leitstützstrukturen (LSS) – also konkret auf der Produktebene – beschrieben werden. Diese Vorstellung wird im Contact and Channel Ansatz (C&C²-A) fundiert beschrieben (Matthiesen 2002). C&C²-A kann helfen, Ziele und Randbedingungen von Produktentstehungsprozessen auf individuelle Komponenten eines Produkts abzubilden.

5. Hypothese: Beschreibung von Funktionen

Eine technische Funktion benötigt immer mindestens zwei Wirkflächenpaare (WFP) und sie verbindende Leitstützstrukturen.

Ein System kann seine Funktion(en) nur in Wechselwirkung mit seiner Umgebung erfüllen. Ein System,

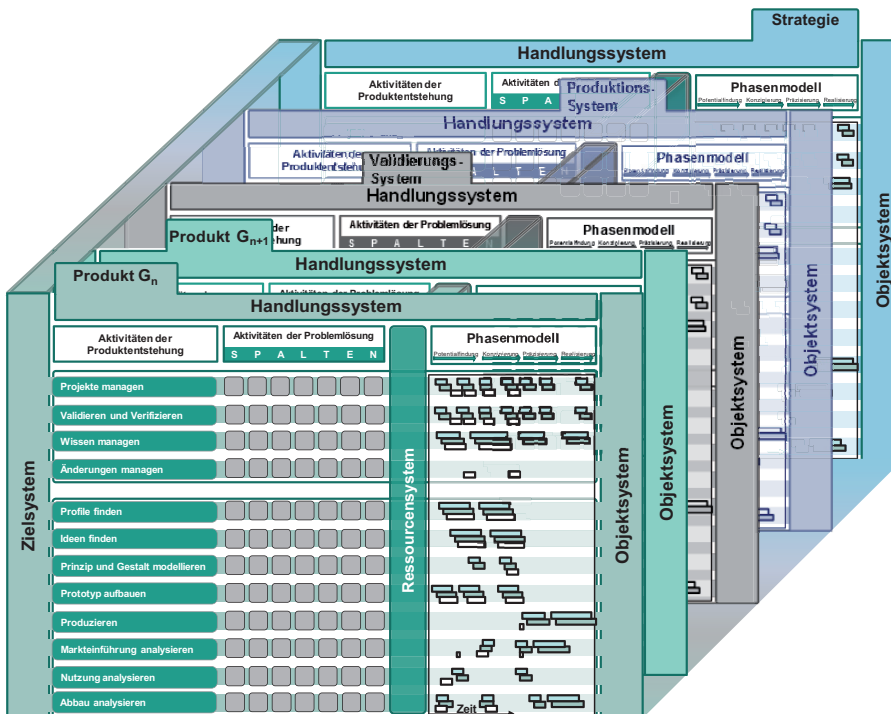


Abb.1.12: Das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM im Kontext der Produktgenerationsentwicklung (Albers et al. 2016b)

das keine WFP mit seiner Umgebung bildet, erfüllt keine Funktion. Anders ausgedrückt: In einem Produktentstehungsprozess werden WFP gestaltet – ein Bauteil alleine hat keine Funktion!

Die Anwendung von C&C²-A in der Produktentstehung hilft den Beteiligten dabei, systematisch zu denken. Dies bedeutet, dass sie Einflüsse auf und von benachbarten Systemen bedenken, wenn sie ein Produkt oder einen Teil dessen entwickeln.

1.2.2 Begriffe und Elemente des iPeM

In diesem Abschnitt wird das Metamodell iPeM vorgestellt. Ein Metamodell enthält allgemeine Beschreibungen zu Elementen und deren Beziehungen, die benötigt werden, um spezifische Modelle aufbauen zu können; ein Beispiel ist die Sprache mit Vokabular und Grammatik, aus der immer wieder neue Sätze gebildet werden können. Abbildung 1.12 ist eine grafische Darstellung des Metamodells iPeM. Es enthält das Ziel-, Handlungs- und Objektsystem unterschiedlicher Layer, die die gesamte Organisation oder den Produktentstehungsprozess abbilden. Das Handlungssystem wird durch die Aktivitäten der Produktentstehung und der Problemlösung sowie dem Ressourcensystem und dem Phasenmodell gebildet. Im Phasenmodell kann der zeitliche Bezug der Aktivitäten modelliert werden.

1.2.2.1 Aktivitätenmatrix

Die Aktivitätenmatrix wird aus den „Aktivitäten der Produktentstehung“ und den „Aktivitäten der Problemlösung“ gebildet. Diese Matrix kann wie ein modulares System unterschiedlicher Methoden für die situationspezifische Unterstützung im Produktentstehungsprozess verstanden werden.

Die Aktivitäten der Produktentstehung bestehen wiederum aus den beiden Clustern „Basisaktivitäten“ und „Aktivitäten der Produktentwicklung“, die unterschiedliche Abstraktionsgrade und Anwendungsgebiete beschreiben.

So orientieren sich die Aktivitäten der Produktentwicklung grob an den Lebenszyklusphasen eines Produkts (Abb. 1.1). Dabei sind sie jedoch nicht als

chronologische Reihung einer sequenziell abzuarbeitenden Abfolge von Prozessschritten zu verstehen. Vielmehr beschreiben diese Aktivitäten grundsätzlich zu unterscheidende Tätigkeiten, die im Laufe eines Produktlebens aus Entwicklersicht von Belang sind. Auf einem Zeitstrahl können die Aktivitäten in jedem Produktentstehungsprozess individuell und iterativ angeordnet werden, wie es die jeweilige Situation erforderlich macht.

Mit den Aktivitäten der Problemlösung kann der Problemlösungsprozess modelliert werden. Dabei wird die Problemlösungsmethodik SPALTEN genutzt. SPALTEN kann in jeder Aktivität der Produktentstehung angewendet werden, um die Aktivitäten des Handlungssystems im Sinne einer strukturierten Vorgehensweise zu unterstützen. Zusammen spannen die Aktivitäten der Produktentstehung und die Aktivitäten der Problemlösung eine Matrix auf, anhand deren Struktur sich Entwickler im Prozess jederzeit orientieren können. In Abbildung 1.13 bilden die gewählten Aktivitäten eine Matrix von 84 Feldern, denen einzelne Tätigkeiten und korrespondierende Entwicklungsmethoden entsprechen. Gerst benennt die Aktivitäten der Produktentstehung als *Makroaktivitäten* und die Aktivitäten der Problemlösung als *Mikroaktivitäten* (Gerst 2002).

1.2.2.2 Aktivitäten der Produktentstehung

Die Aktivitäten der Produktentstehung (Abb. 1.13) stellen für Entwickler generische im Produktentstehungsprozess auszuführende Tätigkeiten dar. Diese lassen sich in Produktlebenszyklusphasen unterschiedlich kombinieren. Das bedeutet, dass diese Felder Suchbereiche darstellen, aus denen benötigte Informationen bezogen werden können. Sie sind bewusst als Tätigkeiten – also als aktive Handlungen – formuliert. Die hier genannten Formulierungen können prinzipiell auch an produkt-, firmen- oder branchenspezifische Begrifflichkeiten angepasst werden oder in ihrer Anzahl variieren. Sie gliedern sich, wie beschrieben, in die Basis- und Produktentwicklungsaktivitäten auf. Die einzelnen Aktivitäten werden im Folgenden erläutert.



Aktivitäten der Produktentstehung		Aktivitäten der Problemlösung						
		S	P	A	L	T	E	N
Basisaktivitäten	Projekte managen							
	Validieren und Verifizieren							
	Wissen managen							
	Änderungen managen							
Produktentwicklungsaktivitäten	Profile finden							
	Ideen finden							
	Prinzip und Gestalt modellieren							
	Prototyp aufbauen							
	Produzieren							
	Markteinführung analysieren							
	Nutzung analysieren							
	Abbau analysieren							

Abb.1.13: Charakteristische Aktivitätenmatrix

Basisaktivitäten im iPeM

Die Basisaktivitäten werden parallel zu den Produktentwicklungsaktivitäten und in einem regelmäßig wiederkehrenden Modus durchgeführt, um den Produktentwicklungsprozess zu unterstützen, zu verbessern und abzusichern. Sie besteht aus den Aktivitäten: *Projekte managen*, *Validieren und Verifizieren*, *Wissen managen* und *Änderungen managen*. Die Basisaktivitäten werden nicht gesondert durchgeführt, sondern dienen der Unterstützung der Produktentwicklungsaktivitäten (z.B. das Validieren einer neu generierten Idee) (Albers et al. 2016b).

Projekte managen

Diese Aktivität umfasst neben der initialen und kontinuierlichen Planung von Projekten auch die Aspekte des Controllings, wo vor allem die Einhaltung und Budgetierung von Zeit, Kosten und anderen Ressourcen im Vordergrund stehen. In der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung kommt der Aktivi-

tät *Projekte managen* eine herausgehobene Stellung zu, da hier zu Beginn des Projekts die grundlegenden Parameter des Produktentstehungsprozesses und die initialen Zielvorgaben für das Produkt definiert werden.

Validieren und Verifizieren

In der dritten Hypothese der Produktentstehung wurde die Wichtigkeit der Validierung als zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess bereits beschrieben. Diese Tätigkeit dient nicht nur dazu, nach der Ausarbeitung von Entwürfen die physikalischen Eigenschaften des zukünftigen Produkts in Simulationen oder Prototypenversuch zu testen. Vielmehr handelt es sich auch bei der Validierung um eine wiederkehrende Aktivität, in der – beispielsweise während der Iterationen der Modellierung von Prinzip und Gestalt – kontinuierlich der erreichte Ist-Zustand mit dem im Zielsystem beschriebenen Soll-Zustand abgeglichen wird. Insbesondere durch diese Aktivität wird

das Zielsystem im Prozess der Produktentstehung kontinuierlich konkretisiert. Die Validierung sollte hierbei früh und kontinuierliche mittels virtueller, physischer oder gemischt physisch-virtueller Prototypen erfolgen.

Wissen managen

Ziel der Durchführung dieser Aktivität ist es, einen Überblick über interne und externe Daten, Informationen und Kompetenzen zu gewinnen. Weitere Elemente sind die Identifikation, der Erwerb und die Entwicklung von Wissen sowie die Verbreitung, Nutzung und Pflege dieses Wissens.

Änderungen managen

Die inhärenten Elemente dieser Aktivität sind: die Überprüfung der Früherkennung von Fehlern sowie die Umsetzung entsprechender Maßnahmen inklusive der Koordination von technischen, wirtschaftlichen und sozialen Veränderungen. Dies gilt z. B. für die Reaktion auf eine neue Soll-/Ist-Konstellation, die eine Design-Optimierung nach sich zieht oder durch einen neuen Kundenwunsch.

Aktivitäten der Produktentwicklung im iPeM

Die Kernaktivitäten, oder auch Aktivitäten der Produktentwicklung genannt, stellen einen Teil der Aktivitäten der Produktentstehung dar. Durch Anwendung der Kernaktivitäten in Verbindung mit den Basisaktivitäten auf den unterschiedlichen Ebenen (Produkt, Strategie, Produktionssystem und Validierungssystem) kann der Produktentstehungsprozess ausgeführt werden (Albers et al. 2016b).

Profile finden

Ein Produktprofil ist ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt. Ein Nutzenbündel wird hierbei verstanden als eine Gesamtheit aus Produkten und Dienstleistungen, welches mit dem Zweck erstellt wird, an einen Kunden verkauft zu werden und für ihn direkt oder

indirekt – z. B. für von ihm berücksichtigte Anwender oder für seine Kunden – Nutzen zu stiften. Es enthält Potenziale und Bedarfssituationen am Markt, wobei neben dem Kundenwunsch auch die Wettbewerbssituation und die Position des eigenen Unternehmens betrachtet werden. Ziel ist es, eine Marktlücke, beziehungsweise ein Marktsegment für sich auszumachen, in dem gezielt nach technischen Lösungen gesucht werden kann, um diese möglichst erfolgreich vertreiben zu können (Albers et al. 2018).

Ideen finden

In dieser Aktivität werden erste Ideen für Produkte generiert, die die zuvor beschriebenen Marktbedürfnisse befriedigen. Die Beschreibung der Ideen kann hierbei gestaltneutral erfolgen. Ideen enthalten nur die grundsätzlichen Charakterzüge des neuen Produkts, um den Lösungsraum für die spätere Gestaltmodellierung so groß wie möglich zu halten. Konkret werden insbesondere Wirkprinzipien sowie mögliche Referenzsystemelemente hinsichtlich erster Produktfunktionen identifiziert und kondensiert.

Prinzip und Gestalt modellieren

Die Realisierung der Produktideen erfolgt in dieser Aktivität. Da es erfahrungsgemäß kaum möglich ist, Funktionsprinzipien zu beschreiben, ohne gleichzeitig gestalterische Vorstellungen zu entwickeln, wurde die Modellierung von Prinzip und Gestalt als eine gemeinsame Aktivität formuliert. Dabei gehen Entwickler sukzessive von abstrakten Skizzen und Entwürfen aus, bis hin zu ausgearbeiteten Detailzeichnungen, CAD-Modellen oder Fertigungsunterlagen. Die Basis für die gestalterische Umsetzung können hierbei generierte Ideen darstellen, wobei die Generierung von Ideen und die gestalterische Umsetzung einen iterativen Prozess darstellen, der die kontinuierliche Konkretisierung von Ziel- und Objektsystem bewirken.

Prototyp aufbauen

Diese Aktivität dient dem frühen und kontinuierlichen Aufbau von Prototypen. Diese werden zum einen

als Entscheidungsgrundlage in Projektmeilensteinen mit möglichen Stakeholdern, zum anderen als System in Development (SiD) im Zuge der kontinuierlichen Validierung sowie zum Explizieren mentaler Modelle im Produktentstehungsprozess genutzt (Albers et al. 2017). Die Art, Manifestation und die Konfrontationsmethode von Prototypen ist in Abhängigkeit des Reifegrads, der jeweiligen Entwicklungssituation und des jeweiligen Ziels des Prototypeneinsatzes abhängig. Prototypen können physisch, virtuell oder gemischt physisch-virtuell umgesetzt werden. So lässt sich beispielsweise bereits ein Produktprofil, welches lösungsneutral ist, mittels unterschiedlicher Techniken wie die Umsetzung als Video realisieren (Richter et al. 2018), während Wirkprinzipien in der Regel physisch umgesetzt werden.

Produzieren

In dieser Lebenszyklusphase wird das Produkt hergestellt, d. h. die zuvor definierten Wirkflächen und Leitstützstrukturen werden erzeugt und zu Wirkflächenpaaren montiert. Das Vorausdenken dieser Phase dient bereits während der Aktivität „Prinzip und Gestalt modellieren“ als Informationsquelle, um beispielsweise Anforderungen an die Montierbarkeit schon früh mit in den Produktentstehungsprozess einfließen zu lassen (Design-for-X- Ansatz).

Markteinführung analysieren

Ähnlich wie die Aktivität *Produzieren* kann auch die Aktivität *Markteinführung analysieren* bereits zu früheren Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess vorausgedacht werden. Im Sinne des Simultaneous Engineering können Tätigkeiten parallelisiert werden. Es kann beispielsweise schon während der Entwicklung ein Vertriebsnetz für das Produkt aufgebaut werden. Ebenso können Services mitgedacht werden.

Nutzung analysieren

Gleiches gilt für die Aktivität *Nutzung analysieren*. Auch diese dient als Informationsquelle in frühen Entwicklungsphasen, nämlich immer dann, wenn die künftige Nutzung des Produkts vorausgedacht und entsprechende Ziele und mit diesen verbundenen Anforderungen an Produkt und Prozess daraus abgeleitet

werden. Darüber hinaus kann in dieser Aktivität auch nach Auslieferung eines Produkts z. B. dessen Akzeptanz beim Kunden überwacht werden, um weitere Projekte im Sinne der PGE weiterzuentwickeln.

Abbau analysieren

Hier wird der Abbau, das Recycling oder die Endlagerung des Produkts betrachtet. Erfahrungen z. B. mit dem Recycling von faserverstärkten Kunststoffen zeigen, dass teilweise erhebliche Kosten auf Unternehmen zukommen, wenn diese Aspekte nicht bereits frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden. Durch eine sorgfältige und rechtzeitige Planung der Rückbauprozesse in den frühen Aktivitäten der Modellierung von Prinzip und Gestalt können große Einsparpotenziale ermittelt und ausgeschöpft werden.

1.2.2.3 Problemlösungsprozess SPALTEN

Im Metamodell iPem wird SPALTEN als Problemlösungsprozess für die Transformation von Zielsystemelementen in Objektsystemelemente innerhalb der jeweiligen Aktivitäten genutzt. Dieses Akronym steht für einen Zyklus von Problemlösungsaktivitäten in einer bestimmten Struktur bzw. Reihenfolge. Etliche praktische Erfahrungen in Industrieprojekten haben die Anwendbarkeit von SPALTEN für Problemstellungen der Produktentstehung und auch für beliebige andere Problemsituationen gezeigt (Albert, Saak, Burkardt 2002). SPALTEN ist eine universelle Methode, die an verschiedene Probleme angepasst werden kann. D. h. die Schritte werden je nach Problemsituation individuell ausgeführt. SPALTEN ist darüber hinaus fraktal, denn es lassen sich einzelne Schritte in einer tieferen Betrachtungsebene wiederum als eigener SPALTEN-Prozess modellieren (Abb. 1.14).

Die SPALTEN- Schritte sind:

- Situationsanalyse
- Problemeingrenzung
- Alternative Lösungssuche
- Lösungsauswahl
- Tragweitenanalyse
- Entscheiden und Umsetzen
- Nachbereiten und Lernen.

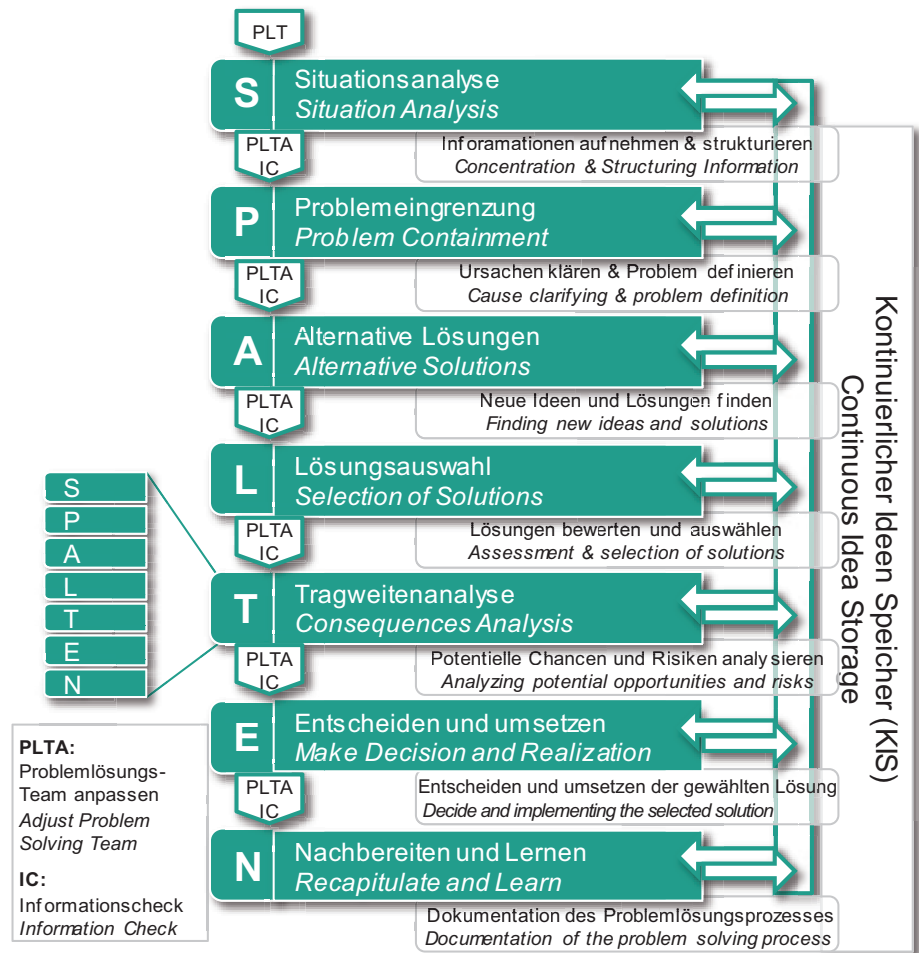


Abb. 1.14: Übersicht der SPALTEN-Methode

Grundsätzlich wird die Informationsmenge während eines SPALTEN-Zyklus immer wieder systematisch erweitert und wieder verdichtet, sodass auch von einem „atmenden Prozess“ gesprochen wird. Ausgehend von der Definition eines geeigneten PLT (Problemlösungsteams) werden zunächst in der *Situationsanalyse* Informationen zum zu lösenden Problem gesammelt. Diese werden im nächsten Schritt, der *Problemeingrenzung*, wieder verdichtet, mit dem Ziel, den Fokus auf das Wesentliche zu lenken und das wirklich vorliegende Problem zu definieren. Zwischen diesen beiden wie auch allen übrigen Schritten findet ein Informationscheck (Wurde alles beachtet?) und die Überprüfung des Problemlösungsteams statt, um zu hinterfragen, ob weitere/andere Personen notwendig sind, um im Prozess fortzuschreiten. In der Aktivität *Alternative Lösungssuche* werden verschie-

dene Methoden angewendet, um mögliche Lösungen für das identifizierte Problem zu generieren. Damit wird die Wahrscheinlichkeit erhöht die bestmögliche Lösung identifiziert zu haben. Die angewandten Methoden lassen sich in intuitive Methoden und kreative Methoden clustern. In der *Lösungsauswahl* werden die generierten Lösungsalternativen anhand definierter Kriterien bewertet, und es wird auf Basis dessen die umzusetzende Lösung ausgewählt. Weitere Elemente im SPALTEN-Zyklus sind die *Tragweitenanalyse* (systematische Frage nach Chancen und Risiken mit der Definition entsprechender Maßnahmen, die mit der ausgewählten Lösung einhergehen), das *Entscheiden und Umsetzen*, das zu einer gemeinsamen Entscheidung für und zu der Umsetzung der Lösung führt und das *Nachbereiten und Lernen*, wo Prozesswissen für zukünftige Problemlösungszyklen

festgehalten und zum Zwecke der kontinuierlichen Verbesserung aufbereitet wird (Albers et al. 2016a).

1.2.2.4 Das Systemtriple aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

Wie zuvor beschrieben, lässt sich die Produktentstehung als Transformation eines Zielsystems in ein Objektsystem durch ein Handlungssystem modellieren (Z-H-O-Triple). Im Folgenden werden die Informationsflüsse im Detail beschrieben.

Betrachtet man einen Produktentstehungsprozess entlang der Aktivitätenmatrix des iPeM genauer, wird deutlich, dass während jeder Aktivität kontinuierlich Teilziele aus dem Zielsystem aufgegriffen und bearbeitet werden. Während dieser Bearbeitung entstehen fortwährend Objekte, die als Gestalt- oder Erkenntnisobjekte das Objektsystem erweitern. Im Handlungssystem werden diese Objekte – beispielsweise Simulationsmodelle – analysiert und bewertet, was zu neuen Teilzielen – etwa einer Optimierung – führt. Zoomt man eine Detaillierungsstufe tiefer in das System Produktentstehung, so lassen sich diese Informationsflüsse entlang des Problemlösungszyklus SPALTEN modellieren. In jeder Aktivität der (technischen) Problemlösung können Elemente aus dem Zielsystem „entnommen“ oder dorthin zurückgeführt werden. Ebenso kann das Handlungssystem in jedem Problemlösungsschritt Elemente aus dem Objektsystem „entnehmen“ oder (neue) Elemente dort abspeichern.

Abbildung 1.15 zeigt beispielhaft die Informationsflüsse im Handlungssystem anhand von Doppelpfeilen, die den Transfer von Elementen aus dem Zielsystem bzw. Objektsystem während einer Aktivität der Produktentstehung symbolisieren. Darin wird deutlich,

dass Ziel- und Objektsystem über das Handlungssystem eng miteinander verzahnt sind. Gemäß der vierten und fünften Hypothese der Produktentstehung lassen sich die Elemente des Ziel- und Objektsystems mit dem Modell C&C²-A beschreiben. Die Informationsflüsse im Handlungssystem eines Produktentstehungsprozesses können also mit C&C²-A modelliert werden. Dies hilft allen Beteiligten, eine einheitliche Sprache und gemeinsame Vorstellungen der Produktentstehung aufzubauen. Das gilt durchgängig für den gesamten Produktentstehungsprozess und gleichermaßen auf allen Abstraktionsstufen.

1.2.2.5 Ressourcensystem

Das Ressourcensystem ist Teil des Handlungssystems und umfasst u. a. Mitarbeiter, Kapital, Information (auch Patente...), Arbeitsmittel (Material, Maschinen...). Da diese Elemente untereinander vernetzt sind und in vielfältigen Beziehungen z. B. zu externen Lieferanten oder Servicedienstleistern stehen, können die Ressourcen ebenfalls als Subsystem der Produktentstehung charakterisiert werden.

Die Ressourcen können den Tätigkeiten der Aktivitätenmatrix zugewiesen werden. So wird innerhalb des Handlungssystems eine Projektplanung vorgenommen, die es dann auch erlaubt, einzelne Aktivitäten als konkrete Phasen auf einem Zeitstrahl abzubilden. Die Struktur der Aktivitätenmatrix, die vornehmlich die Sicht der Entwickler widerspiegelt, wird dadurch mit der managementorientierten Sicht des Controllings verknüpft. Durch Zuweisung entsprechender Elemente aus dem Zielsystem (Zeitvorgaben etc.) und den zugehörigen Objekten (Projektpläne, Statusberichte, usw.) erfolgt die Anbindung an das Gesamtsystem der Produktentstehung.

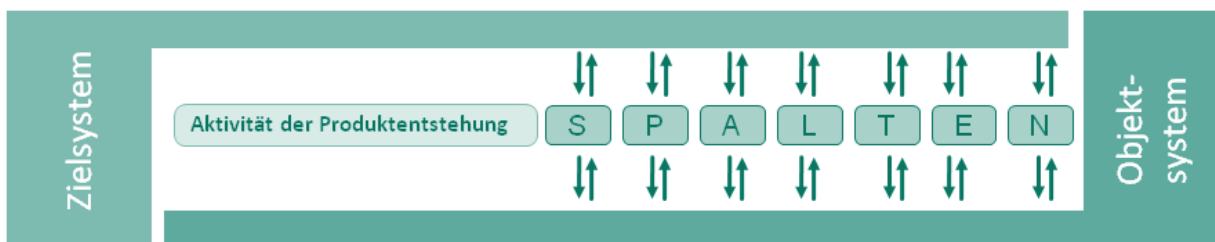


Abb. 1.15: Der Einsatz der SPALTEN-Methode zum Informationsfluss zwischen dem Zielsystem und dem Objektsystem

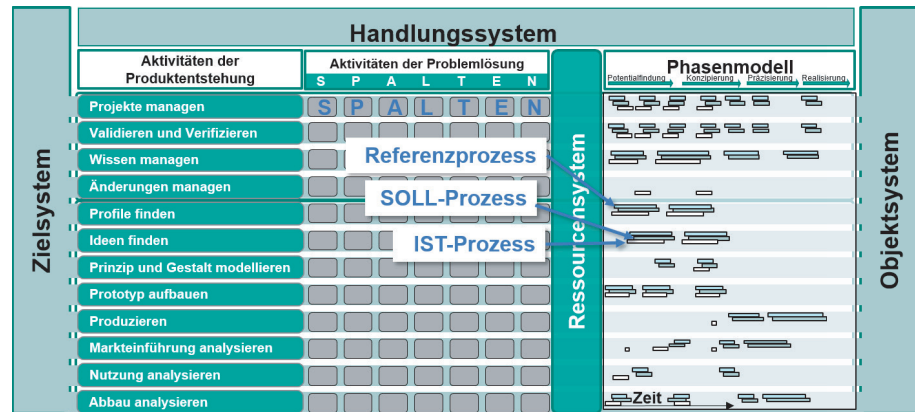


Abb. 1.16: Referenzmodell, Implementierungsmodell und Anwendungsmodell im Phasenmodell des iPeM (Wilmsen 2019)

1.2.2.6 Phasenmodell

Die zeitliche Abfolge der Aktivitäten kann im Phasenmodell abgebildet werden. Dessen Darstellung kann z. B. einem Gantt-Chart gleichen. Sobald Aktivitäten konkreten Zeitintervallen zugeordnet sind, können sie als Phase eines Produktentstehungsprozesses mit einer gewissen Dauer betrachtet werden (Abb. 1.16). Phasen werden also aus mehreren parallelen Aktivitäten kombiniert. Dies geschieht dynamisch entsprechend den Erfordernissen der jeweiligen Situationen im Projekt.

Auf Gesamtprozessebene lassen sich im Phasenmodell des iPeM drei verschiedene Modelle abbilden. Der *Referenzprozess* stellt hierbei einen generischen Prozess dar, der auf Basis eines konkreten Projektes oder einer Vielzahl an Produktentwicklungsprojekten über Produktgenerationen hinweg aufgebaut wird. Dieser Referenzprozess muss zur jeweiligen Projektplanung wiederum an die Gegebenheiten des aktuellen Entwicklungsvorhabens angepasst werden und wird dann in einem *SOLL-Prozess* im Phasenmodell dargestellt. Der tatsächliche Projektverlauf wird anschließend im *IST-Prozess* abgebildet (Wilmsen 2019).

1.2.2.7 Ganzheitliche Modellierung durch die verschiedenen Ebenen und deren Wechselwirkungen im iPeM

Die dreidimensionale Struktur des iPeM erlaubt die Modellierung verschiedener Produktgenerationen und Berücksichtigung verschiedener Unternehmens-

bereiche im Modell. Jeder dieser Ansätze (Produkt, Strategie, Produktionssystem, Validierungssystem) oder eine beliebige weitere Produktgeneration bildet eine individuelle Schicht und kann durch eine Ebene im iPeM modelliert werden. Die verschiedenen Ebenen stellen die Entwicklung von Produktgenerationen selbst, die der Unternehmensstrategie, des Produktionssystems und des Validierungssystems, dar. Jede Ebene besteht aus der gleichen Struktur und die Aktivitäten können auf jede dieser Ebenen angewendet und modifiziert werden - entsprechend der jeweiligen Sicht. Diese Struktur ermöglicht eine fokussierte Entwicklung auf das jeweilige System in der Entwicklung mit einer gleichzeitigen Integration der anderen, für die Produktentwicklung relevanten Bereiche.

Ebene - Produkt

Die erste Ebene beschreibt die Entwicklung des Produkts selbst. Da Produkte in Generationen entwickelt werden, ist es möglich, für jede dieser Generationen eine Ebene hinzuzufügen. Auf diese Weise können die Zusammenhänge verschiedener Generationen modelliert werden (z. B.: ein Motor wird für eine Fahrzeuggeneration entwickelt und soll auf die nächste Generation übertragen werden). Darüber hinaus können die Ressourcen über mehrere Projekte hinweg geplant werden.

Ebene - Validierungssystem

In dieser Ebene werden die Elemente entwickelt, die die Validierung des Produktes ermöglichen. Diese Ebene beschreibt demnach einen eigenen

I Produktentwicklungsprozess, der sich durch die bereits beschriebenen Aktivitäten durchführen lässt. So muss z. B. ein Prüfstand geplant, konstruiert und gebaut und ebenfalls validiert werden. Diese Ebene darf nicht mit der Basisaktivität Validieren und Verifizieren verwechselt werden, sondern liefert die wesentlichen Produkte, die für diese Aktivität benötigt werden.

Ebene - Produktionssystem

Diese Ebene umfasst alle Vorgänge, die relevant sind, um das Produktionssystem zu entwickeln. Von der Herstellung des Produktionssystems bis hin zur Produktion selbst. Die Entwicklung eines Produktionssystems ist ebenfalls ein eigener Produktentwicklungsprozess.

Ebene - Strategie

Ein langfristiger Rahmen wird durch verschiedene Regeln vorgegeben. Dies sind verschiedene Prinzipien, die das Unternehmen dabei unterstützen, eine nachhaltige und vorteilhafte Marktposition zu erreichen. Sie basieren auf vielen Geschäftsaktivitäten und können beispielsweise unterschiedliche Geschäftsmodelle enthalten und generationenübergreifend sein. Die Strategie des Unternehmens und das Produkt selbst beeinflussen sich gegenseitig. Ein wichtiger Punkt ist die Steuerung der Entwicklungsstrategie: Hier wird festgelegt, wie eine wirtschaftliche Produktpolitik erreicht werden kann, z. B. Marketingprogramm, Variantenvielfalt, modulare Entwicklung, Technologien und Fertigungstiefe.

Jede Ebene des iPeM enthält ein eigenes Objektsystem. Die einzelnen Objektsysteme interagieren miteinander. Dabei können Objekte direkt untereinander ausgetauscht werden. Das Zielsystem und das Ressourcensystem werden kontinuierlich modelliert. Somit ist es möglich a) die verschiedenen Ziele eines Unternehmens oder eines Prozesses durch ein einziges konsistentes Zielsystem zu modellieren und b) die Planung der Gesamtressourcen für ein gutes Gesamtergebnis konsistent durchzuführen (Albers et al. 2016b).

1.2.2.8 *iPeM zur Nutzung von Erfahrung und Wissen im Produktentstehungsprozess*

Die Definition des Begriffs „Wissen“ ist Gegenstand einer über 2000 Jahre alten Diskussion der Philosophie. Im Umfeld der Produktentstehung können folgende Abgrenzungen angenommen werden: Wissen ist immer bestimmten Wissensträgern zugehörig. Es wird nicht durch eine bloße Sammlung von Informationen aufgebaut, sondern erfolgt individuell durch kognitive Fähigkeiten von Personen und durch Interpretation auf Basis von Vorwissen (Albers und Meboldt 2007). Wissen kann nach (Nord 1999) als die Gesamtheit der Kenntnisse und Fertigkeiten einer Person zur Problemlösung betrachtet werden. Dabei besteht eine zunehmende Konkretisierung einzelner Wissensstufen, ausgehend von Zeichen und Daten über Informationen (Daten + Semantik), Wissen (vernetzte Informationen) bis hin zu Können, Handeln, Kompetenz und – im Kontext der Produktentstehung schließlich – Wettbewerbsfähigkeit.

In Produktentstehungsprozessen wird im Handlungssystem Wissen aufgebaut. Dies kann zum einen in Form von *explizitem Wissen* (Dokumenten und Modellen, also Erkenntnisobjekten) vorliegen. Zum anderen entsteht *implizites Wissen* während Prozessen, also z. B. Erfahrungswissen, welches über die Aktivitäten und Phasen aufgebaut wird, ohne expliziert worden zu sein. Durch die Dokumentation von Entscheidungen (und deren Informationsgrundlagen) kann ein Teil dieses Produkt-/Prozesswissens im Zielsystem dokumentiert werden.

Für Unternehmen ist es zwingend notwendig, ein geeignetes Wissensmanagement aufzubauen, um nachhaltig konkurrenzfähig zu sein. Für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess und vor allem bei (etwa altersbedingter) Mitarbeiterfluktuation muss ein Wissenstransfer sichergestellt sein. Dafür müssen verknüpfte Informationen zweckmäßig dargestellt und kommunizierbar gemacht werden. Die Struktur des iPeM, die Ziele, Objekte und Aktivitäten verknüpft, und die Möglichkeit, Prozesse im Phasenmodell beschreiben und aufzeichnen zu können, kann hierbei eine Hilfestellung geben.

1.3 Anwendung des iPeM bei der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff

In diesem Abschnitt wird das integrierte Produktentstehungsmodell am Beispiel der Entwicklung einer Felge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) beschrieben. Die Felge wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) innerhalb von Kooperationsprojekten mit KA-RaceIng – einem studentischen Rennsport-Team, in der vom VDI veranstalteten Serie „Formula Student“ – entwickelt.

Der Kontext des Formula Student-Wettbewerbs liefert viele Randbedingungen für das Zielsystem der Felge. So werden die Boliden in (praktisch weitgehend unerfahrenen) studentischen Teams mit Hilfe von Sponsoren und Partnerunternehmen konstruiert und gebaut. Die Rennen selbst erfolgen im Einzelzeitfahren. Dies bedeutet für die Auslegung der Felge, dass nicht davon ausgegangen werden muss, dass im Einsatz Kollisionen mit anderen Fahrzeugen oder Bordstein-Überfahrten etc. auftreten. Dahingegen gilt es, möglichst viel Gewicht einzusparen, um im Zeitfahren konkurrenzfähig zu sein. Die ursprüngliche Felge aus Aluminium des Teams KA-RaceIng hat ein Gewicht von 4,3 kg.

Bildet man den Produktentstehungsprozess der Felge im iPeM ab, so können diese Randbedingungen sowie die technischen Eigenschaften (Geometrie, Festigkeit) der Vorgänger-Felge, als Referenzsystemelement aus Aluminium, in das anfängliche Zielsystem übernommen werden. Die Ressourcen im Fall von KA-RaceIng werden durch die Studierenden, deren Arbeitsmittel (Rechnerarbeitsplätze, Werkstatt) sowie Partnerunternehmen aus der Industrie gebildet, beispielsweise für Fahrwerkskomponenten, den Antriebsstrang oder hier den Werkzeugbau für die Felge.

Bei der Ermittlung der Zielwerte für die geforderten Steifigkeiten und Festigkeiten wurde deutlich, dass die bisher verwendeten Aluminium-Felgen sehr überdimensioniert waren. Für Felgen aus Aluminium gibt es etablierte Prüfkataloge (z.B.

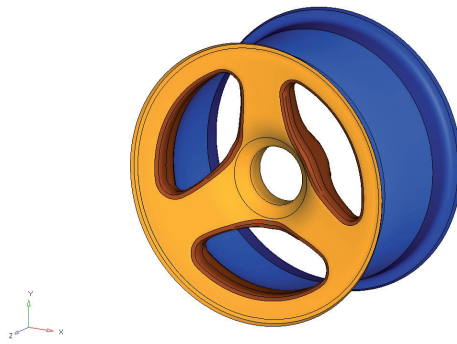


Abb. 1.17: CAD-Modell der Felge

einen 10 Punkteplan des TÜV). Die Zielsystembildung für eine Felge aus Faserverbundwerkstoffen wird aber dadurch erschwert, dass keine vergleichbaren Prüfmittel und -verfahren bekannt sind. Grund hierfür sind die werkstoffspezifischen Versagensarten. Im Gegensatz zum beobachtbaren Risswachstum in den Aluminium-Felgen treten bei faserverstärkten Kunststoffen Zwischenfaserbrüche und Delamination auf, deren Schadensmechanismus (z.B. bzgl. der Resttragfähigkeit) zur Zeit noch erforscht wird. Ein Ablösen zweier Lagen kann nur mit Computertomographen oder mittels Ultraschall detektiert werden.

In einem ersten Projekt wurden verschiedene Fertigungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen untersucht. Aus diesen Ergebnissen und einer weitergehenden Recherche wurde in einem Folgeprojekt ein CAD-Modell der Felge erstellt und daraus Zeichnungen für die Fertigung eines Funktionsmusters abgeleitet (Abb. 1.17).

Wie wichtig eine kohärente Wissensdokumentation und -übergabe sind, zeigt der folgende Verlauf der Produktentstehung. So wurde z.B. der Aspekt des fertigungsgerechten Konstruierens nämlich ungenügend betrachtet, was zu einer tiefgreifenden Iteration, aber auch zum Aufbau von wertvollem Know-how und der Entwicklung einer neuen Konstruktionsmethode für Faserverbundlaminat mit parallelisierten Aktivitäten führte. Die Abbildung 1.18 zeigt einen IST-Prozess des iPeM für die Felge.

Im Phasenmodell ist ersichtlich, dass zu Beginn des Prozesses das Profil und die spätere Nutzung der Felge als Grundlage für die Erstellung eines

I

Zielsystems gebraucht wurden (frühe Zeitpunkte auf der Zeitachse). Es schließt sich eine Ideenphase an, in der vor allem produktionsrelevante Aspekte im Fokus standen – Abbildung 1.18 zeigt deutlich die parallel verlaufenden Aktivitäten. Dies steht für die ersten Projektarbeiten zu den Fertigungsverfahren mit entsprechenden gleichzeitig verlaufenden Validierungs- und Verifizierungszyklen (etwa Rücksprachen/Korrektur durch den Projektleiter). Dieser Phase schließt sich die Modellierung von Prinzip und Gestalt an, die in einem Anschlussprojekt zu einem CAD-Modell für die Fertigung führte. Würde man das Zielsystem dieser Arbeit mit den Ergebnissen (Erkenntnisobjekte) des vorangegangenen Projekts vergleichen, würde die Informationslücke der Fertigungsrestriktionen offenbar werden. Da dies im vorliegenden Fall nur unzureichend erfolgte, musste der Produktentstehungsprozess während der Fertigung abgebrochen werden. In Abbildung 1.18 sind die Aktivitäten Entscheiden und Umsetzen des Produzierens und Nachbereiten und Lernen der Basisaktivität Projekt managen und Wissen managen türkis hervorgehoben. Tat-

sächlich zeigte sich an dieser Stelle das Problem, dass die modellierte Gestalt der Felge nicht ohne einen erheblichen Mehraufwand an Zeit und damit Kosten laminiert werden konnte, was zu einer Iterationsschleife führte.

Aus dem CAD-Modell der Felge wurde in der Aktivität Produzieren ein CAD-Modell des Formwerkzeuges zur Herstellung der Felge abgeleitet. Die Abbildungen 1.19 und 1.20 zeigen das nach diesem CAD-Modell gefertigte Werkzeug.

Abbildung 1.21 zeigt das Fräsen eines Schaumkerns zur Herstellung der Felge bei einem Partnerunternehmen. In der Fertigung hatte sich jedoch gezeigt, dass die einzelnen Lagen z.T. nicht – wie geplant – in die Form eingelegt werden konnten, da die Krümmung stellenweise sehr groß war (Abb. 1.22). Die Schwierigkeiten beim Laminieren waren in der Vorarbeit teilweise zwar prinzipiell erkannt worden. Da diese Arbeit jedoch nicht die Umsetzung der Fertigung zum Ziel hatte, wurde diese Information weder ausreichend dokumentiert, noch wurde sie in entsprechendem Maße weitergegeben (Stichwort Wissenstransfer). Hier hätte die Objektbescri-

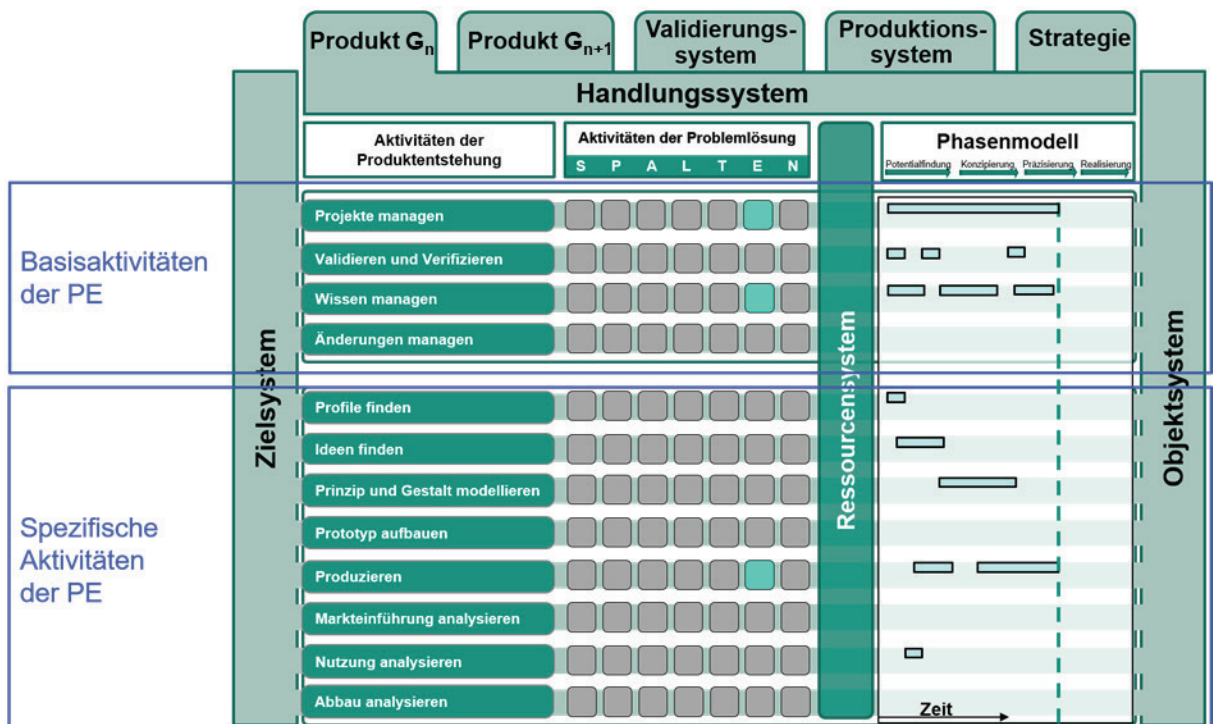


Abb. 1.18: IST-Modell des Produktentstehungsprozesses der Felge

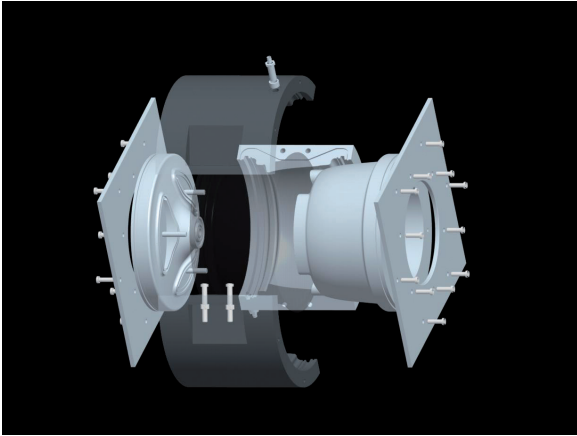


Abb. 1.19: CAD-Modell zur Herstellung der Felge

bung mit C&C-M (vierte Hypothese der Produktentstehung) helfen können, die aus dem gewählten Fertigungsverfahren erwachsenen Ziele auf die entsprechenden Wirkflächenpaare für die Fertigung zu beziehen. Damit hätte eine stringente Weitergabe dieser Informationen erfolgen können, oder aber es hätte eine Analyse der Herstellungstechnologie im Hinblick auf Fertigungsrestriktionen durchgeführt werden können.

Dieses Wissen stand jedoch in dem Projekt aufgrund der nicht erfolgten Übergabe nicht mehr zur Verfügung, und das Problem fehlenden Wissens wurde nicht erkannt. Es wurde nach Erstellung des CAD-Modells keine Drapiersimulation durchgeführt. Im Gesamtprozess bedeutet dies eine unvollständige Validierung des Teilschritts aufgrund unzureichender Situationsanalyse im Laufe des Projektes.



Abb. 1.21: Fräsen der Kunststoffform zum Einlegen in die Kavität



Abb. 1.20: Form zur Herstellung der Felge

Erst während der Produktion wurde der Fehler entdeckt und analysiert. In einer Iterationsschleife wurde das Zielsystem mit diesem Wissen erweitert, um die Fertigungsrestriktionen für Faserverbundwerkstoffe nun ebenfalls zu berücksichtigen.

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern konnten die Formen durch Anpassung der Lagen verwendet und anschließend durch KA-RaceIng bei einem Partnerunternehmen belegt und infiltriert werden (Abb. 1.23). Aktuell werden Testfahrten mit der neuen Felge durchgeführt, um die Simulationsergebnisse zu bestätigen.

Mit dem gesammelten Erfahrungswissen aus diesem Anwendungsfall kann ein Referenzprozess für die Entstehung von im Faserverbund gefertigten Produkten erstellt werden. Dieser berücksichtigt die produktionstechnischen Besonderheiten der Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung. Im Phasenmodell in Abbildung 1.24 verlaufen die Aktivitäten der Prinzip- und Gestaltmodellierung weitestgehend parallel mit denen des Produzierens. Zudem taucht die Aktivität Nutzung analysieren früh auf, um wichtige Randbedingungen aus den Nutzungsszenarien abzuleiten und die Lasten und Anforderungen an die Betriebsfestigkeit im Zielsystem zu beschreiben. Um die Übergabe und Vollständigkeit der Informationen zwischen den einzelnen Entwicklungsschritten dieser relativ jungen Technologie zu gewährleisten, wurde die Aktivität Validierung in diesem Referenzprozess betont.

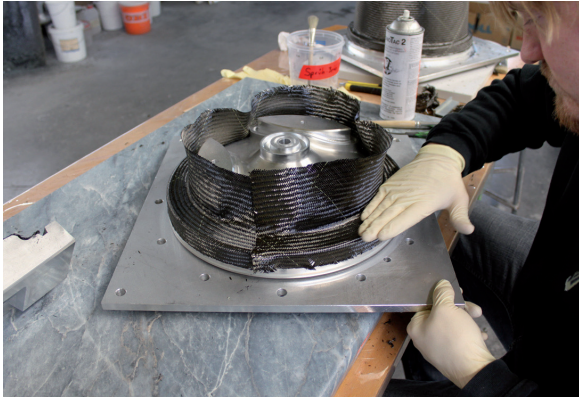


Abb. 1.22: Laminiervorgang bei der Herstellung der Felge



Abb. 1.23: Eingelegter laminiertes Schaumkern in der Form

Die Abbildung 1.25 zeigt die aus kohlenstofffaser-
verstärktem Kunststoff hergestellte Felge, die ein
Gewicht von 1,5 kg erreicht. Das Beispiel dieses
Produktentstehungsprozesses verdeutlicht, wie
das Metamodell iPeM und daraus abgeleitete SOLL-,
IST- und Referenzprozesse dazu geeignet sind, sol-
che Prozesse zu verbessern. Gerade im Leichtbau
ist die Verknüpfung von Zeitplanung und metho-
discher Unterstützung der Entwickler besonders
wichtig.

1.4 Zusammenfassung

Gerade in unerfahrenen Teams oder unter Entwick-
lungsbedingungen, in denen die Zusammenarbeit –
etwa durch global verteilte Teams unterschiedlicher
kultureller Herkunft – erschwert ist, ist ein profes-
sionelles Informations- und Wissensmanagement
zwingend erforderlich. Eine kohärente Speicherung
und Bereitstellung aktueller und möglichst vollständiger
Informationen und die Möglichkeit, diese in

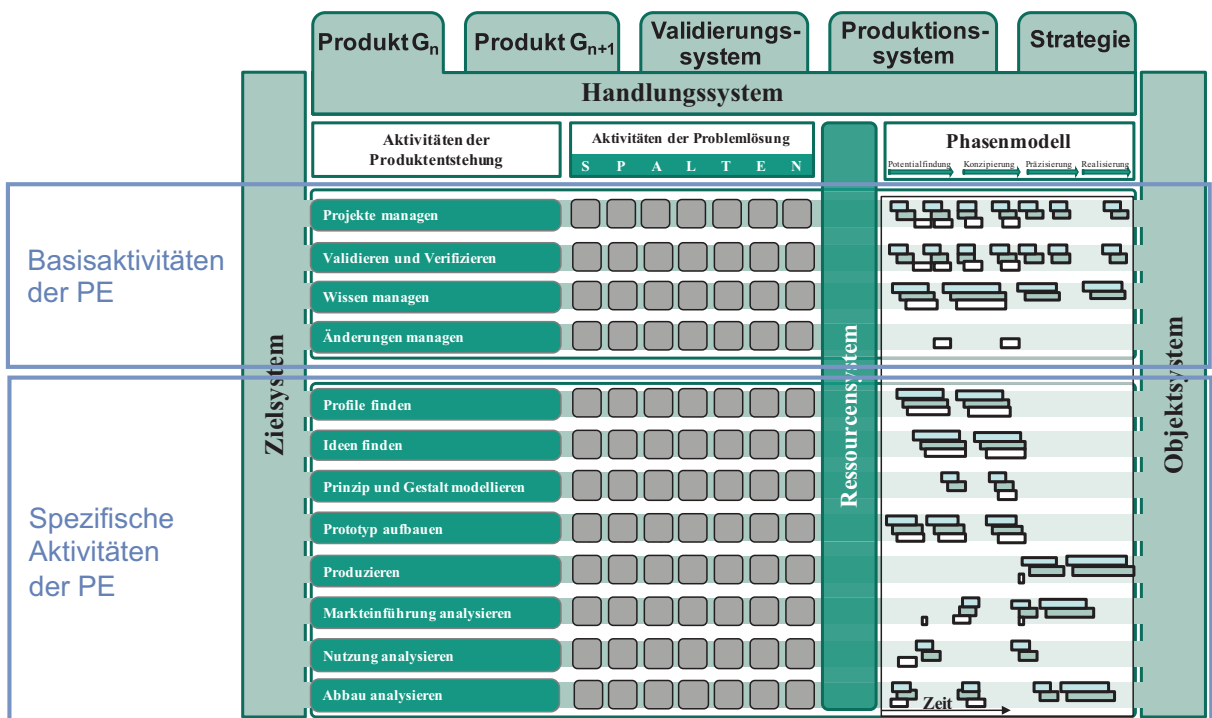


Abb.1.24: Referenz-, SOLL- und IST-Prozess für die Entwicklung von Produkten aus Faserverbundwerkstoffen



Abb. 1.25: Leichtbaufelge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff als Demonstrator des Formula-Student Teams KA-Racing

einem gemeinsamen Verständnis zu teilen, helfen Missverständnisse und Versäumnisse auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Struktur des Metamodells iPeM ermöglicht die verknüpfte Repräsentation von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem im gesamten Organisationskontext sowie der Aktivitätenmatrix, die eine Syntax für die inhaltliche und zeitliche Abfolge der Tätigkeiten in der Produktentstehung bildet. Dies ermöglicht auch eine zielgerichtete und an individuelle Problemstellungen angepasste, methodische Unterstützung sowohl der Entwicklerteams als auch des Controllings. Durch Erfahrungen und Akquise von Know-how über die Entwicklung verschiedener Produktgenerationen hinweg ist es möglich, Referenzprozesse im iPeM abzubilden. Damit lassen sich SOLL-Prozesse erstellen, die an problemspezifische Randbedingungen und Restriktionen angepasst werden können. Im Beispiel der Leichtbaufelge aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff bedeutet dies, dass Aktivitäten sinnvoll parallelisiert und priorisiert wurden, um den Umständen (unbekannte Technologie, unerfahrenes Team, spezielle Fertigungsverfahren) gerecht werden zu können. Der erfolgreiche Prozess dient als ein Muster für zukünftige Projekte. Dieses kann mit dem iPeM explizit gemacht und kommuniziert werden, oder aber auch durch eine Anpassung der einzelnen Elemente auf weitere Problemstellungen bzw. Leichtbauanwendungen projiziert werden.

1.5 Weiterführende Informationen

Literatur

- Albers, A.*: Five Hypotheses and a Meta Model of Engineering Design Processes. In: Proceedings of the TMCE 2010. Ancona, 2010
- Albers, A., Braun, A., Muschik, S.*: Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In: Proceedings of the MMEP 2010. Cambridge, 2010
- Albers, A., Bursac, N., Rapp, S. (2017a)*: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: Forsch Ingenieurwes 81 (1), S. 13–31, zuletzt geprüft am 25.11.2017
- Albers, A., Bursac, N., Wintergerst, E. (2015)*: Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective. In: New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering, S. 16–21, zuletzt geprüft am 19.05.2017
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N. et al. (2018)*: Product Profiles. Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In: Procedia CIRP 70, S. 253–258.
- Albers, A.; Dietmayer K.; Bargende M.; Behrendt M.; Yan, S.; Buchholz, M. et al. (2017b)*: XiL-BW-e – Laboratory Network Baden-Württemberg for Electric Mobility. In: EVS30 Symposium, zuletzt geprüft am 01.12.2017
- Albers, A.; Rapp, S.; Spadinger, M.; Richter, T., Birk, C.; Marthaler, F.; Heimicke, J.; Kurtz, V.; Wessels, H.*: The Reference Systems in PGE, Proceedings of 22nd International Conference on Engineering Design JCED, 2019
- Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Breitschuh, J. (2016a)*: 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In: Casper Boks (Hg.): Proceedings of NordDesign 2016. August 10-12, 2016, Trondheim, Norway. Bristol, United Kingdom: The Design Society, S. 411–420, zuletzt geprüft am 06.09.2017
- Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T. (2016b)*: iPeM – Integrated Product Engineering Model in

- Context of Product Generation Engineering. In: *Procedia CIRP* 50, S. 100–105.
- Albers, A.; Meboldt, M. (2007):* IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: 16th International Conference on Engineering Design, zuletzt geprüft am 14.11.2017
- Andreasen, M. M.:* Concurrent Engineering – effiziente Integration der Aufgaben im Entwicklungsprozess. In: *Handbuch Produktentwicklung*. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- Cooper, R. G.:* Perspective: Third-Generation New Product Processes. *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 11, 1994
- Bursac, N.:* Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung, Forschungsberichte IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (2016)
- Daenzer, W. F., Huber, F.:* *Systems Engineering*. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002
- Deltl, J.:* *Strategische Wettbewerbsbeobachtung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2004
- Ehrlenspiel, K.:* *Integrierte Produktentwicklung*. 3. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2003
- Gausemeier, J., Hahn, A., Kespohl, H.-D., Seifert, L.:* *Vernetzte Produktentwicklung. Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking*. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- Gausemeier, J.:* *Strategiekompetenz und Agilität*. Unternehmertagung des VDMA, 6./7. November 2002
- Gerst, M.:* *Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung* Dissertation. Verlag Dr. Hut, München 2002
- Geyer, E.:* *Produktplanung – Ideenfindung, Ideenbewertung, Ideenverfolgung*. RKW-Handbuch Forschung, Entwicklung, Konstruktion, Beitrag 4170. Berlin, Schmidt 1976
- Henderson, R. M.; Clark, K. B. (1990):* *Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms*. In: *Administrative Science Quarterly* (35), S. 9–30, zuletzt geprüft am 10.09.2017
- Hubka, V., Eder, W. E.:* *Design Science*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1996
- Kesselring, F.:* *Technische Kompositionslehre*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1954
- Matthiesen, S.:* *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. IPEK-Forschungsberichte, Bd. 6, Karlsruhe, 2002
- Meboldt, M.:* *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM)*. IPEK-Forschungsberichte, Bd. 29, Karlsruhe, 2008
- Nord, K.:* *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1999
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. (2007):* *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Heidelberg.
- Patzak, G.:* *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1982
- Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.:* *Qualitätsmanagement*. Springer-Verlag, Berlin 1996
- Richter, T.; Heimicke, J.; Reiß, N.; Breitschuh, J.; Albers, A.; Gutzeit, M. et al. (2018):* Pitch 2.0 – Concept of early Evaluation of Product Profiles in Product Generation Engineering. In: *Proceedings of the TMCE 2018*, S. 395–404. Online verfügbar unter [http://vm-literatur/litdata/refbase/\[16541\]-\[pitch20concept\]-\[richter\]-\[2018\]/16541_richter_2018.pdf](http://vm-literatur/litdata/refbase/[16541]-[pitch20concept]-[richter]-[2018]/16541_richter_2018.pdf), zuletzt geprüft am 05.06.2018
- Rodenacker, W. G.:* *Methodisches Konstruieren*. 4. Aufl., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1994
- Ropohl, G.:* *Einführung in die Systemtechnik. Systemtechnik – Grundlagen und Anwendungen*. Carl Hanser Verlag, München (1975)
- Ropohl, G.:* *Eine Systemtheorie der Technik*. 3. Aufl., Universitätsverlag Karlsruhe, 2009

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Konstruktionslehre. 3. Aufl., Bd. 1., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2009

Schumpeter, J.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Hrsg. v. J. Röpke und O. Stiller. Duncker & Humblot, Berlin, 2006 (Nachdruck der 1. Aufl. von 1912)

Suh, N.: Axiomatic Design: Advances and Applications. Oxford Univ. Press, New York, 2001

Ulrich, K., Eppinger, S.: Product Design and Development. McGraw-Hill, 1999

Vernon, R.: International Investment and International Trade in the Product Cycle. In: Quarterly Journal of Economics. Cambridge, 1966

Wilmsen, M.; Duehr, K.; Heimicke, F.; Albers, A.: The first steps towards innovation: A reference process model for developing product profiles. Proceedings of 22nd International Conference on Engineering Design JCED, 2019

Wögerbauer, H.: Die Technik des Konstruierens. Oldenbourg Verlag, München, 1943

Züst, R., Schregenberger, W.: Systems Engineering. A Methodology for Designing Sustainable Solutions in the Fields of Engineering and Management – A Short Summary. Verlag Eco-Performance, Zürich, 2003

Richtlinien

VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (Ausg. 06-2004)

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
Die VDI-Richtlinie 2221 ist zurückgezogen. Sie ist ersetzt durch

VDI 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung, und

VDI 2221 Blatt 2: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse.

Beide Ausg. 11-2019.

2 Technology Intelligence – Technologiefrühaufklärung mit Künstlicher Intelligenz

Joachim Warschat, Antonino Ardilio

2.1	Auslöser von Innovationen	41	2.4	Die funktionssemantische Methode im Leichtbau	48
2.2	Herausforderungen bei der Technologiesuche	41	2.5	Technologieradar	49
2.2.1	Suchstrategie	41	2.6	Marktextplorer	50
2.2.2	Wissenswachstum	42	2.7	Fazit	51
2.3	Die funktionssemantische Methode (FSM)	43	2.8	Literaturverzeichnis	51
2.3.1	Der Ansatz	43			
2.3.2	Vom Informationsbedarf zur gezielten Suche	44			

Getrieben durch die zunehmende Dynamik in fast allen Branchen auf den Weltmärkten werden Technologieinnovationen oftmals zum wesentlichen Schlüssel, um sich im globalen Wettbewerb nachhaltig und erfolgreich zu behaupten. Gleichzeitig gilt es, den wachsenden Anforderungen aus dem Umwelt- und Klimaschutz hinsichtlich Ressourcenschonung und -effizienz Genüge zu leisten. Ein kontinuierlicher Fokus auf die gezielte strategische Integration von emergenten Technologien und Produktionsverfahren bietet Unternehmen somit die Chance, langfristig einen Vorsprung zur Konkurrenz auszubilden.

Aktivitäten, welche es Unternehmen ermöglichen, technologische Chancen und Risiken zu identifizieren, die das zukünftige Wachstum und Überleben ihres Unternehmens beeinflussen könnten, werden unter den Begriff Technology Intelligence (TI) subsummiert. Ziel der TI ist es, jene technologischen Informationen zu identifizieren, zu verarbeiten und zu verbreiten, die für die strategische Planung und Entscheidungsfindung erforderlich sind. Da sich die Lebenszyklen von Technologien verkürzen und das Geschäft immer globaler wird, wird es immer wichtiger, über effektive TI-Funktionen zu verfügen (Mortara 2007).

Die Herausforderungen beim TI liegen dabei klar auf der Hand: Die Potenziale neuer Technologien für das eigene Produktportfolio müssen rechtzeitig erkannt sowie für den spezifischen Einsatz beurteilt werden. Gleichzeitig müssen die Ansprüche des Marktes und der Kunden erfüllt werden. Diese Fähigkeit, technologische Innovationen erfolgreich zu adaptieren, unterliegt – je nach Anwendungsfall – einer hohen Komplexität, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren für die erfolgreiche Umsetzung eine Rolle spielen kann. Um Risiken und Fehlentwicklungen so weit als möglich zu vermeiden, müssen diese Faktoren systematisch betrachtet und in Beziehung zueinander bewertet werden (Warschat 2003).

Vor allem Branchen mit einem schnellen Technologiewandel, wie beispielsweise der Automobilbau oder die Energietechnik, sind auf eine leistungsfähige Technology Intelligence, d. h. eine systematische, die Zusammenhänge abbildende Informationsversorgung, angewiesen. Dies gilt insbesondere für das innovative Feld der Leichtbautechnologien.

2.1 Auslöser von Innovationen

Der Anstoß zum Einsatz einer neuen Technologie für den Leichtbau kann durch zwei verschiedene Ansatzpunkte gegeben werden: Durch neue naturwissenschaftliche oder technische Erkenntnisse (Technology Push) sowie durch Anforderungen von Anwendern zur Erfüllung von Kundenbedürfnissen (Market Pull) (Vahs, Burmeister 2005).

Beim Technology Push werden Innovationen durch neu entwickelte Technologien, wie beispielsweise durch Faserverbundwerkstoffe oder neue Umformverfahren erzeugt, für die es erst noch die passenden Anwendungsfelder zu finden gilt. Die Technologieentwicklung umfasst den Aufbau der für die Umsetzung nötigen Kompetenzen und die Eliminierung bzw. Verminderung bestehender Schwachstellen alternativer Technologien. Aus diesem Ansatz ergeben sich meist einschneidende z. T. disruptive Innovationen mit einem sehr hohen Neuheitsgrad, da sich die Technologieentwicklung auf keinen Markt oder kein spezifisches Produkt festlegt und das Technologiepotenzial dementsprechend groß ist. Allerdings ist das damit verbundene unternehmerische Risiko aufgrund des noch fehlenden Marktbezugs entsprechend hoch.

Im Gegensatz dazu werden Innovationen beim Market Pull zur Befriedigung von Kundenwünschen initiiert, indem neue Funktionen von Produkten mit Hilfe zu integrierender Technologie realisiert werden. Ausgehend von der Marktsituation werden die relevanten Technologien sowie Kompetenzen identifiziert und gezielt zur Problemlösung eingesetzt. Der Veränderungsgrad solcher Innovationen ist zwar im Vergleich eher gering, allerdings birgt die Einführung durch die bereits vorhandenen Märkte ein geringeres wirtschaftliches Risiko und damit entsprechend höhere Erfolgsaussichten. Die Anzahl der erfolgreichen Innovationen liegt dabei deutlich höher als bei den durch Technology Push initiierten Innovationen.

Bei der Suche nach neuen Technologien (Technology Push) oder neuen Anwendungen (Market Pull) sind allerdings zwei fundamentale Probleme zu überwinden: Zum einen die Generierung der Suchbegriffe,

also die Erarbeitung der Suchstrategie („Was wird gesucht?“), zum anderen das Suchen in einer Welt des exponentiellen Informationswachstums („Wo wird gesucht?“).

2.2 Herausforderungen bei der Technologiesuche

2.2.1 Suchstrategie

Mit konventionellen Suchprozessen suchen wir in der Regel nach Technologien, die benannt werden können. Dabei existiert meistens ein grober Begriff von den Technologien die gesucht werden. Ist es z. B. die Aufgabe, einen leichten aber belastbaren Werkstoff für ein Fahrzeugteil zu finden, gibt der Spezialist „Carbon“ in das Suchsystem ein und findet zwar vielleicht neue Details zu diesem Technologiefeld, aber für ihn nichts wirklich essenziell Neues.

Zum Auffinden wirklich neuer, da disruptiver Technologien ist es deshalb notwendig, auf einer abstrakten Ebene zu suchen. Auch bei der Suche nach neuen Märkten bzw. Anwendungen muss von der Technologie abstrahiert werden, da Märkte bzw. Anwender nicht an einer bestimmten Technologie interessiert sind, sondern an dem Nutzen, den diese stiftet. Diese wird durch die Funktion, welche die Technologie erfüllt, bestimmt.

Der große Vorteil einer Nutzung von Funktionen als „abstrakte Suchbegriffe“ ist, dass diese im Computer als Objekt-Aktivitäts-Relation dargestellt werden können, also als Substantiv-Verb-Kombination. Die Funktionen sind somit das Bindeglied zwischen Produkt und Technologie (Abb. 2.1).

Die Funktionsbeschreibung aus Anwendersicht ist häufig nicht identisch mit der Funktionsbeschreibung aus technologischer Sicht. So sind z. B. zur Erfüllung der Anwender-Funktion „Freie Sicht gewährleisten“ im Fahrzeug in der Regel drei technologische Funktionen notwendig: Entfernen von Wasser

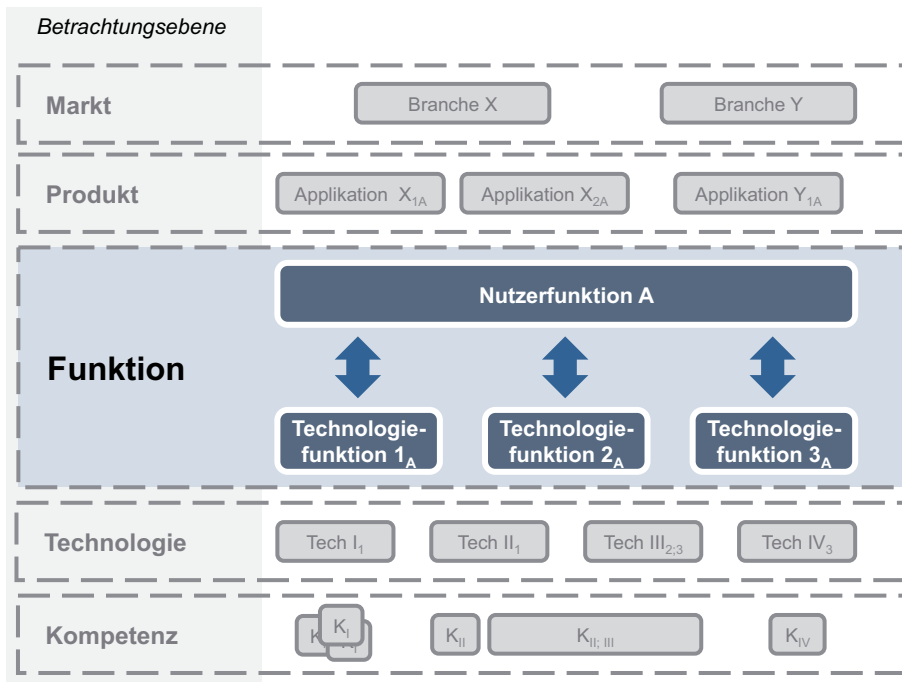


Abb. 2.1: Nutzerfunktion vs. Technologiefunktion

z.B. durch Scheibenwischer, Entfernen von Eis z.B. durch Wärme und Entfernen von Schmutz z.B. durch Sprühen von Wasser (Abb. 2.2).

Für die Suche nach Technologien können die Funktionen beliebig erweitert werden (z. B. mit Synonymen) und mit Attributen versehen werden (physikalische Prinzipien, Materialparameter, Fertigungsverfahren, Reifegrad, Verarbeitungskosten etc.). Die so entstehenden Begriffsnetze werden in Ontologien (Gomez-Perez et al. 2004) abgebildet. Diese können durch semantische Softwaresysteme rechnerintern verarbeitet werden (Dengel 2012).

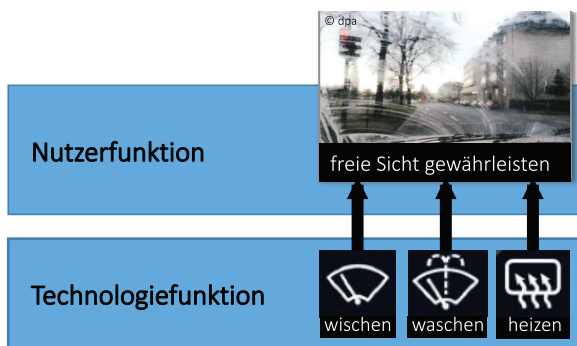


Abb. 2.2: Nutzerfunktion vs. Technologiefunktion

2.2.2 Wissenswachstum

Damit kann das zweite Problem, das exponentiellen Wachstum der Informationen bzw. des Wissens beinhaltet, gelöst werden.

Weltweit nimmt die Zahl der Forscher und Wissenschaftler zu. Selbst wenn die Produktivität des einzelnen Forschers gleichbleibt, steigt die Zahl der Forschungsergebnisse und der wissenschaftlichen Veröffentlichungen stetig an. In Anbetracht einer zunehmenden Verbreitung von Forschungsergebnissen z.B. aufgrund der Open Access Bestrebungen und wachsender grauer Literatur im Internet wird die Menge an verfügbaren technologischen Informationen weiter steigen.

Belegt werden diese Entwicklungen beispielsweise durch die stetig ansteigenden Patentanmeldungen – in den letzten 20 Jahren hat sich die Zahl an Patentanmeldungen vervielfacht (Rosenich) – oder durch das Wachstum der generell zur Verfügung stehenden Datenmenge. Gerade die unstrukturierten Informationen in Form von Texten werden in Zukunft weiter stark ansteigen (Abb. 2.3).

Die Anforderungen, in dieser Situation das notwendige technologische Wissen schnell zu identifizieren,

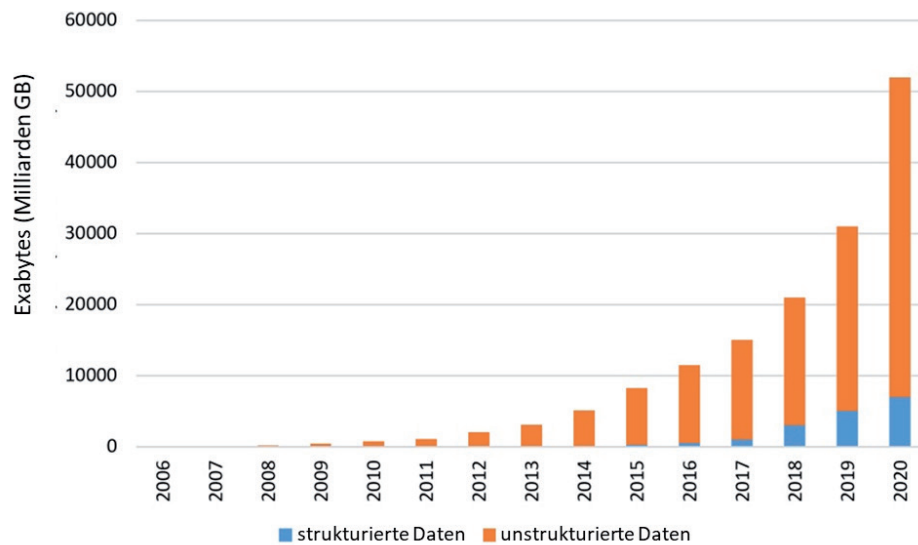


Abb. 2.3: Wachstum strukturierter und unstrukturierter Daten (IDC Research)

zu bewerten und aufzubauen, überfordert zunehmend die Ressourcen der Unternehmen. Die damit verbundenen technischen Risiken, ggf. eine neue Technologie nicht rechtzeitig zu erkennen bzw. zu früh in eine neue Technologie einzusteigen bei unkalkulierbaren finanziellen Risiken, bedingt durch einen zu geringen technologischen Reifegrad mit einem damit verbundenen immensen Technologieentwicklungsaufwand, steigen immer weiter an.

Mit Hilfe rechnergestützter semantischer Tools kann diese Fülle an unstrukturierten technologischen Informationen in angemessener Zeit durchsucht werden (Dengel 2012). Das Problem mit herkömmlichen Suchmaschinen zu lösen, stößt auf Schwierigkeiten. Sie benötigen Begriffe, z. B. Carbon. Gesucht werden soll aber nach Funktionen, die z. B. die Eigenschaften eines Werkstoffs umschreiben. Wie oben erwähnt, führt die Eingabe von Begriffen aber zu mehr oder weniger bekannten Sachverhalten.

Mit Ontologien (Gomez-Perez et al. 2004, Gruber 1993, Guarino 1998, Hermans 2008) kann dagegen viel allgemeiner (inklusive Synonyme, Akronyme, unterschiedliche Sprachen etc.) gesucht werden. Es wird mit Begriffsklassen gearbeitet, d. h. kommt ein bestimmter Begriff nicht vor, wird nach der übergeordneten Klasse gesucht.

Die ontologiebasierten semantischen Systeme stellen ein wichtiges Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz dar. Der Rechner versteht Sprache und kann auf

Basis der Ontologien mit Hilfe eines Reasoners (List of Reasoner, University of Manchester 2018) Schlussfolgerungen ziehen, die so explizit nicht vorhanden sind, sondern sich erst durch die Verknüpfung der Inhalte ergeben.

2.3 Die funktionssemantische Methode (FSM)

2.3.1 Der Ansatz

Um die Probleme der Abstraktion der Technologien und der Bewältigung der Informationsmenge zu lösen, wurde eine funktionssemantische Methode entwickelt und software-technisch unterstützt (Warschat et al. 2013 und 2015). Eine Funktion kann dargestellt werden als Objekt-Aktivitäts-Relation, d. h. an einem Objekt wird eine Aktivität ausgeübt, die das Objekt verändert. Die Änderung kann dabei durch verschiedene Technologien durchgeführt werden. So kann z. B. die Funktion „Blech schneiden“ durch Sägen, Wasserstrahlschneiden, Lasertrennen etc. realisiert werden.

Der Anwender wird vielleicht als Nutzenfunktion eine noch allgemeinere Form wählen: „Blech anpas-

sen“, sodass „Blech schneiden“ nur eine Möglichkeit darstellt und „Blech biegen“ möglicherweise ebenfalls in Frage kommt.

Um die große Zahl an Informationen bewältigen zu können, ist der Rechnereinsatz unabdingbar. Da die Funktionen als Objekt-Aktivität-Relation dargestellt werden können, ergibt sich direkt eine semantische Formulierung: Objekt = Substantiv, Aktivität = Funktionsverb. Somit können zur Suche von Technologien, abgeleitet aus Funktionen, semantische Softwaresysteme (Text-Mining-Systeme) eingesetzt werden. Ein weiteres gewichtiges Argument für die Entwicklung einer semantischen Methode ist die Tatsache, dass der weit überwiegende Teil des dokumentierten menschlichen Wissens in unstrukturierter Form (Veröffentlichungen, Webseiten, etc.) vorliegt (Granitzer 2006). Dabei ist zu beachten, dass es unterschiedliche semantische Konzepte gibt, die das Wissen, in unserem Fall das technologische Wissen, in unterschiedlicher Tiefe und in unterschiedlicher Flexibilität oder „Intelligenz“ repräsentieren.

Die semantische Treppe, in Anlehnung an Blumauer und Pellegrini (2006) sowie an Lassig und McGuinness (2001) ordnet die semantische Reichhaltigkeit aufsteigend an (Abb. 2.4).

Die für die Technologiesuche geeignete Stufe ist die Ontologie. Sie beinhaltet Regeln, die durch einen Reasoner bearbeitet werden können und so eine Form von Intelligenz darstellen, da Schlussfolgerungen gezogen werden können und nicht alles fest vorgegeben werden muss.

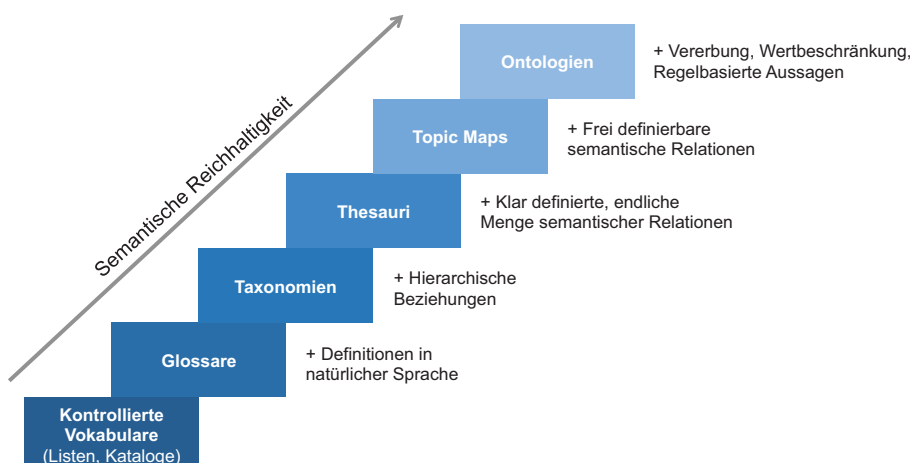


Abb. 2.4: Semantische Treppe

2.3.2 Vom Informationsbedarf zur gezielten Suche

Am Anfang jeder Suche nach neuen Technologien oder neuen Anwendungen steht ein spezielles Erkenntnisinteresse und – damit verbunden – ein Informationsbedarf, der die entsprechenden

- Technologischen Suchfelder und die
- Informationsqualität adressiert.

Dabei sind die Informationsquellen und die Suchtermini zu berücksichtigen bzw. zu gestalten.

Die Informationsquellen müssen Kriterien hinsichtlich

- Informationsgehalt
- Informationsträger
- Zugriff auf Quelle
- Qualität (z.B. Zuverlässigkeit) der Information erfüllen.

Sollen z.B. für die Lösung einer Leichtbauaufgabe auch biomimetische Informationen genutzt werden, ist der Zugang zu einer entsprechenden Datenbank unerlässlich (Le et al. 2017).

Die Suchtermini operieren dann auf den Informationsquellen. Sie müssen thematisch strukturiert werden, und es müssen gegebenenfalls Attribute, wie z.B. Temperaturbeständigkeit, definiert werden, und sie müssen im semantischen System abgebildet werden, um sie im Rechner verarbeitbar zu machen.

Betragsändernde Verben	Betragserschaffende Verben	Betrags erhöhende Verben	Betragsbeibehaltende Verben	Betragsvermindernde Verben	Betragsaufhebende Verben
abändern	anfertigen	anreichern	aufrechterhalten	abklingen	abbrechen
abwandeln	bilden	anschwellen	behalten	abnehmen	abschaffen
ändern	entstehen	anstiegen	beibehalten	abschwächen	aufheben
austauschen	erstellen	anwachsen	bestehen lassen	absinken	auflösen
editieren	erzeugen	aufstocken	bewahren	begrenzen	auslöschen
erneuern	fabrizieren	ausdehnen	bleiben	beschneiden	beenden
korrigieren	fertigen	ausweiten	erhalten	dezimieren	beschließen
modifizieren	formen	erhöhen	halten	drosseln	beseitigen
reformieren	generieren	erweitern	konservieren	herabsetzen	einstellen
transformieren	gestalten	extensivieren	wahren	kürzen	eliminieren
überarbeiten	herstellen	häufen		mindern	entfernen
umändern	hervorbringen	heraufsetzen		nachlassen	entsorgen
umbilden	kreieren	hinzufügen		reduzieren	streichen
umformen	modellieren	intensivieren		reduzieren	wegbringen
umfunktionieren	produzieren	mehren		restringieren	
umgestalten	schaffen	potenzieren		runtersetzen	
umwandeln	schöpfen	steigen		schmälern	
variieren		steigern		schrumpfen	
verändern		strecken		schwächen	
wechsellern		vergrößern		sinken	
		vermehrten		streichen	
		vervielfachen		verkleinern	
		wachsen		verkürzen	
		zahlreicher		vermindern	
		zunehmen		verringern	
				zurückgehen	

Abb. 2.5: Betragsbeeinflussende Verben

Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass in den meisten technischen Dokumenten eher mittelinduzierte Funktionsverben wie „Blech waserstrahlschneiden“ vorkommen, wogegen in anwendungsorientierten Texten oft zweckorientierte Nutzerfunktionen eher allgemein und z.T. ohne Bezug zu einer speziellen Technologie wie „Blech anpassen“ vorkommen.

Eine wichtige Anforderung an die funktionssemantische Methode ist es deshalb, eine Übersetzung von Nutzerfunktionen in Technologiefunktionen zu unterstützen. Und – da es häufig mehrere Technologiefunktionen zur Lösung gibt – synonyme Technologiefunktionen zu ermitteln.

Dazu müssen die auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen definierten Funktionen vergleichbar gemacht werden. Hierzu eignen sich insbesondere Funktionsprofile (Schmitz 2017), die einen Vergleich der Funktionsverben erlauben. Die Basis dafür sind die Merkmale und ihre Ausprägungen, die die Eigenschaften eines Objektes definieren (Birkhofer 1980). Häufig wird zwischen Beschaffenheits- und Funktionsmerkmalen unterschieden. Die Beschaffenheitsmerkmale definieren die elementaren Zustandseigenschaften, wie stoffliche, geometrische, chemische, biologische, elektrische, optische, mechanische Eigenschaften.

Die Funktionsmerkmale setzen auf den Zustandseigenschaften auf und beschreiben die Wirkeigenschaften eines Systems, also die Überführung des Inputs in den Output (Patzak 1982).

Im Leichtbau spielen als Beschaffenheitsmerkmale, z.B. stoffliche Merkmale eine große Rolle, da sie häufig der Ausgangspunkt für die Verwendung eines leichten und festen Werkstoffs sind (CFK, Aluminium, hochfeste Stähle etc.). Der Vergleich der Funktionsverben beruht also vor allem auf den beeinflussbaren Objekteigenschaften (Wolffgramm 1994). Um sicher zu gehen, dass Funktionsverb und Objekt „zusammenpassen“, muss das entsprechende Verwendbarkeitsmerkmal beim Objekt vorhanden sein. So muss z.B. sichergestellt sein, dass bei der Suche nach Synonymen für das Funktionsverb „biologisch abbauen“ nur solche berücksichtigt werden können, die mit Objekten verknüpft sind, die die Eigenschaft „biologisch abbaubar“ haben. Da wir nach Wirkzusammenhängen suchen, ist noch zu bestimmen, welches Ziel die Beeinflussung der Objekteigenschaft haben soll. Es können sechs Arten der Beeinflussung unterschieden werden (Birkhofer 1980, Schmitz 2017): Änderungen, Schaffung, Erhöhung, Beibehaltung, Verminderung und Aufhebung des Betrags der zu beeinflussenden Objekteigenschaften (Abb. 2.5).

Für jedes Funktionsverb definiert das Funktionsprofil die

- beeinflusste Objekteigenschaft,
- Art der Beeinflussung,
- Verwendbarkeitseigenschaft.

Damit stellt das Funktionsprofil die Verbindung zwischen Nutzerperspektive (anwendungsorientiert) und Technologieperspektive (lösungsorientiert) dar (Abb. 2.6).

Zur Ermittlung der Funktionsprofile wird eine Text-Mining-Software eingesetzt, z.B. COGITO von Expert Systems. Damit kann eine große Anzahl von Textdokumenten nach Funktionsprofilen durchsucht werden. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten. Kann aus der Aufgabenstellung eine Nutzer- oder Technologiefunktion in Form eines Objekt-Verb-Terms abgeleitet werden, so kann das Funktionsverb als Startpunkt dienen.

Kann aus der Aufgabenstellung nur eine gewünschte Änderung einer Objekteigenschaft ermittelt werden, so muss zuerst ein initiales Funktionsprofil definiert werden. Dann erst kann nach synonymen

Funktionsverben gesucht werden. Dies geschieht mit Hilfe regelbasierter semantischer Methoden. Die Funktionsprofile werden zuerst kontextunabhängig in einer Ontologie abgespeichert, die die logischen Strukturen der Funktionsprofilermittlung enthält. Erst bei einer direkten Synonymermittlung wird kontextspezifisch daraus eine Synonymität berechnet.

Somit müssen die synonymen Funktionsverben nicht im Vorhinein berechnet und in einer Datenbank gespeichert werden, was hohen Pflegeaufwand nach sich ziehen würde. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass die logische Struktur und die Funktionsprofile vergleichsweise stabil sind, d.h. über längere Zeit als Grundlage der Technologiesuche verwendet werden können, wogegen die verschiedenen konkreten Technologien einem deutlich rascheren Wandel unterworfen sind.

Die Auswertung der logischen Strukturen wird mit Hilfe eines Reasoners durchgeführt. Die Ontologie wird im OWL (Web Ontology Language) Format abgebildet und in Protégé programmiert.

Als Ergebnis erhält man eine Liste synonymer Funktionsverben, die dann vom Experten danach bewertet

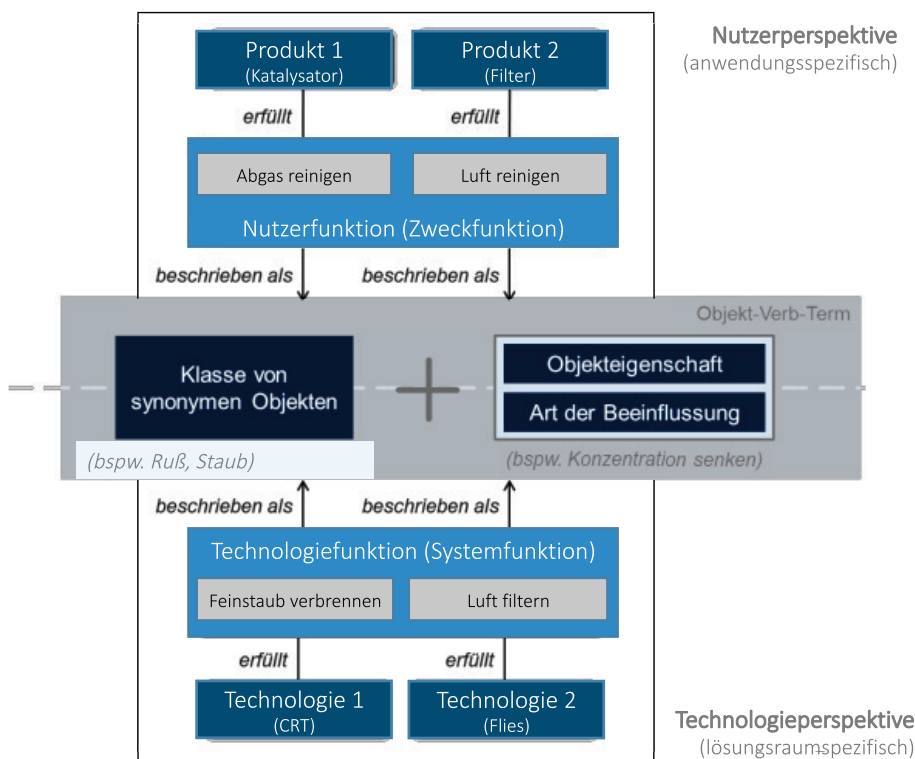


Abb. 2.6: Verbindung von Nutzer- und Technologieperspektive (in Anlehnung an Schmitz 2017)

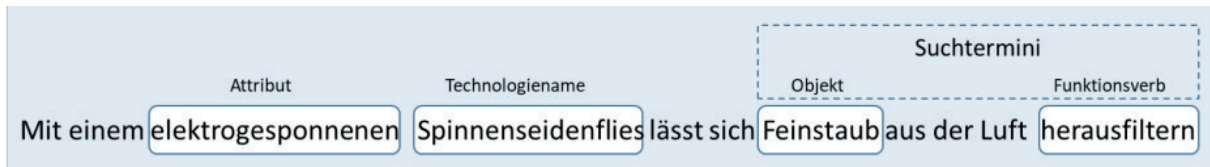


Abb. 2.7: Ermittlung von Technologienamen im Umfeld von Suchtermini

werden, ob die damit verbundenen Wirkprinzipien in das Suchfeld passen und ob sie neue Erkenntnisse bringen können.

Anschließend werden die Objekte auf Basis der Funktionsprofile, die die interessierenden Objektklassen abbilden, weiter spezifiziert. Dazu können z. B. Thesauri herangezogen werden.

Als Ergebnis stehen dann ein Set an

- Funktionsverben und ein Set an
- Objektklassen, sowie ein Set an
- Informationsquellen zur Verfügung,

um eine effiziente Suchabfrage zu generieren. Gesucht sind Namen von Technologien. Um sie zu finden werden Funktionsverben und Objektklassen logisch verknüpft, sodass sich daraus ein Lösungsraum ergibt, der mit hoher Wahrscheinlichkeit die gesuchten Technologienamen enthält. Da Technologienamen Hauptworte sind, muss die Text-Mining-Software alle Substantive der Umgebung der Suchtermini identifizieren.

Die ermittelte Technologie wird dann von Experten geprüft, ob sie in das zu Beginn der Recherche definierte Suchfeld – also zur Problemstellung – passt. Dieser Vorgang wird häufig interaktiv durchgeführt. Sind die Suchtermini zu eng oder zu allgemein festgelegt, müssen sie angepasst werden. Dazu können auch weitere Datenquellen, wie Patentdatenbanken, weitere Fachdatenbanken oder Internetquellen herangezogen werden. Als Benchmark kann die bisher im Unternehmen eingesetzte Technologie dienen. Mit welchen Objekteigenschaften, also Attributen und den Funktionen, kann der Bedarf der Kunden abgedeckt werden und können damit Alleinstellungsmerkmale gegenüber der Konkurrenz generiert werden?

Als Entscheidungsgrundlage können die Attribute extrahiert werden, die die Leistungsfähigkeit der

Technologie beschreiben. Somit erhält man Leistungsprofile der Technologien.

Die funktionssemantische Methode eignet sich auch deshalb sehr gut, weil sie „Schwache Signale“ wahrnehmen kann. So kann z. B. ein Technologiename, der in nur einem Dokument erwähnt wird, gefunden werden, was mit statistischen Methoden nicht gelingt. Neben der Suche nach neuen Technologien eignet sich die funktionssemantische Methode auch zur Ermittlung neuer Anwendungsfelder von Technologien. Dazu werden die unternehmensspezifischen Technologiekompetenzen in Form von Technologiefunktionen und den zugehörigen Leistungsattributen beschrieben. Um zu ermitteln in welchen neuen Anwendungen die Technologie eingesetzt werden kann, werden entsprechende Konkurrenztechnologien identifiziert. Das wird durch die stufenweise Zerlegung der Funktionen bzw. der Baugruppen eines Produktes erreicht, sodass die Zusammenhänge zwischen Produkten, Baugruppen und Funktionen abgebildet werden können.

Die Strukturierung der Funktionen folgt dem Prinzip der Zweck-Mittel-Beziehung, die auf der Wozu-wie-Logik basiert. Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau eines Funktionsbaums.

Die Rangstufen werden so definiert, dass in Richtung der ersten Rangstufe die Frage „wozu“ (Zweck) gestellt wird, und in Richtung der 2., 3. und der weiteren Rangstufen nach dem „wie“ (Mittel) gefragt wird. Die Strukturierung der Funktionen für eine Anwendung schafft die Möglichkeit, für jede Teilfunktion nach synonymen Technologien zu suchen, indem die technischen Funktionen in Suchtermini überführt werden, die mit Hilfe der Funktions-Ontologie um synonyme Suchtermini erweitert werden. Schließlich werden die einzelnen Funktionen und Technologien, Baugruppen, Komponenten oder Verfahren einander zugeordnet.

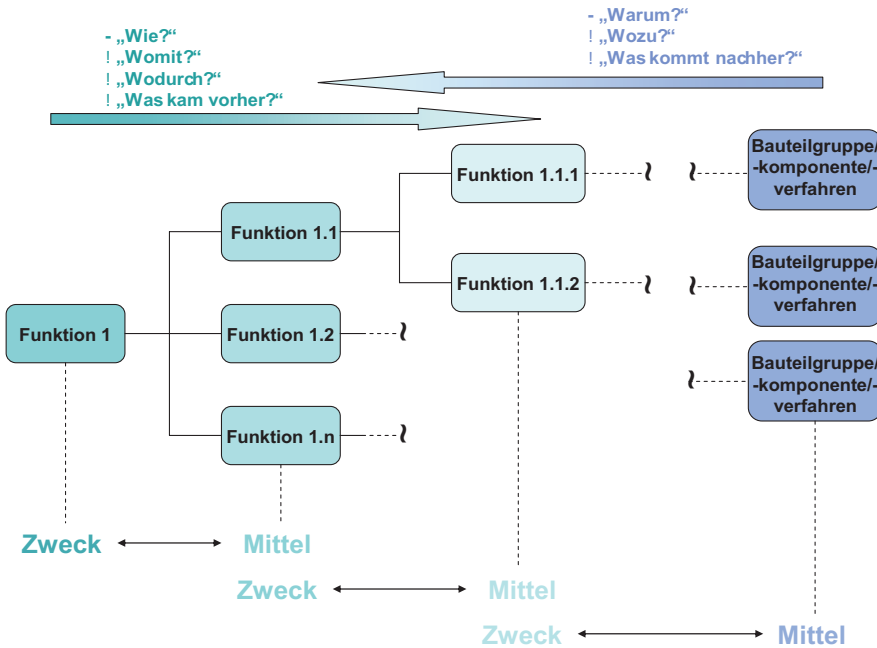


Abb. 2.8: Grafische Darstellung des Funktionsbaums

2.4 Die funktionssemantische Methode im Leichtbau

Ausgangspunkt für die Anwendung der FSM im Leichtbau sind die technischen Funktionen und die entsprechenden Attribute.

Zur Lösung eines Leichtbauproblems können vereinfacht zwei Richtungen eingeschlagen werden (Abb. 2.9).

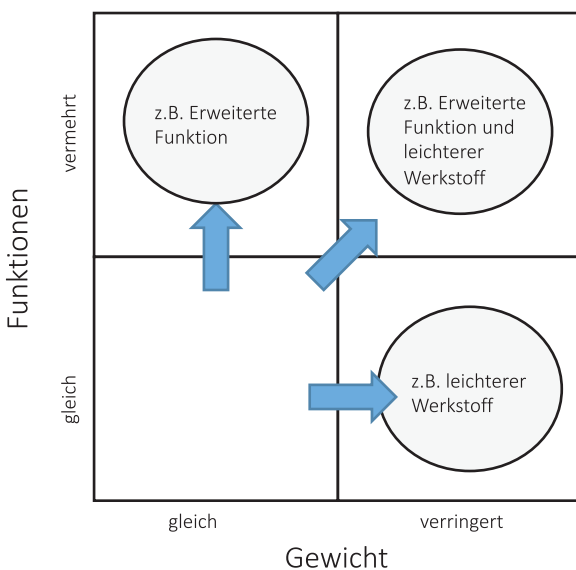


Abb. 2.9: Lösungsmatrix für Leichtbauprobleme

Einmal wird das Gewicht bei konstanter Funktionalität und unveränderten Attributen (Leistungsparameter) verringert, zum anderen wird bei gleichem Gewicht die Funktionalität erhöht und/oder es werden die Leistungsparameter verbessert. Selbstverständlich kann auch eine Kombination der beiden Wege realisiert werden.

Bei der Suche nach synonymen Technologien können die betragbeeinflussenden Verben angewendet werden (Abb. 2.5): Für die Funktionen und Attribute die betragsschaffenden und betragserhöhenden Verben und für das Gewicht die betragvermindernden und betragsaufhebenden Verben.

Mit Hilfe statistischer Textanalysen können diese Funktionsprofile automatisiert erfasst werden. Sie bestehen aus der überschaubaren Anzahl der betragbeeinflussenden Verben und den relevanten Objekteigenschaften (Gewicht, Funktionen und Attribute). Es müssen also nicht alle technischen Funktionen (Funktionsverben) ermittelt und dann auf ihre Verwendbarkeit im speziellen Fall geprüft werden, sondern nur die Funktionsverben werden extrahiert, die die gewünschten Objekteigenschaften in Verbindung mit dem betragbeeinflussenden Verb aufweisen. Der Vorteil ist wieder, dass nicht alle Synonymitäten in einem Katalog aufwändig

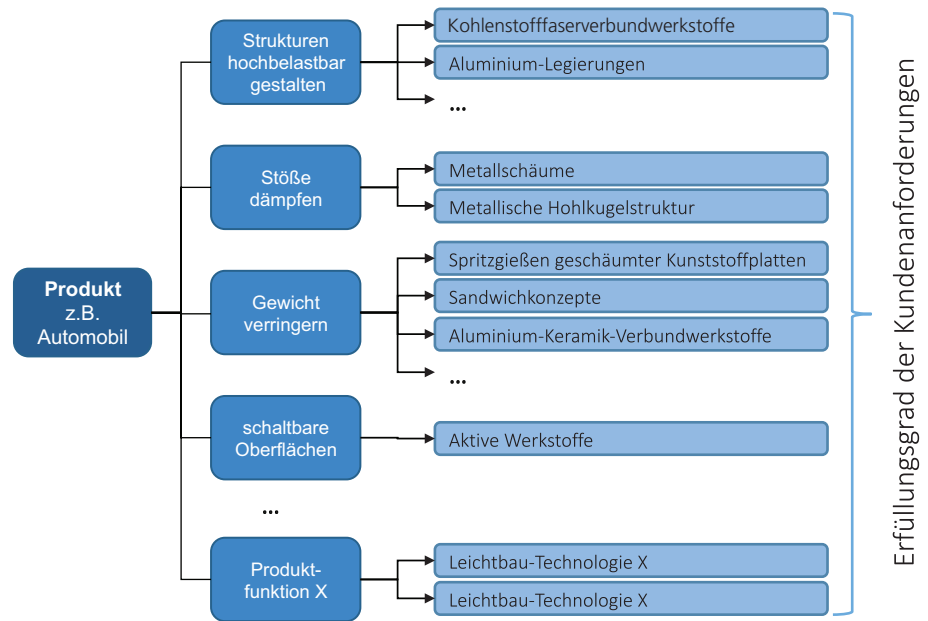


Abb. 2.10: Verknüpfung von Produkt-Technologie mit Kundenanforderungen

gesammelt und gepflegt werden müssen. Die Funktionsontologie ermöglicht es, mit einem Semantic Reasoner nur die fallspezifischen Synonymitäten zu berechnen.

Sind die spezifischen Funktionen ermittelt und die synonymen Technologien ebenfalls, kann die Verbindung zwischen Funktionen, Technologie und Produkt bzw. Baugruppe hergestellt werden (Abb. 2.10).

In einem weiteren Schritt werden dann die gefundenen Leichtbautechnologien auf ihren Erfüllungsgrad hinsichtlich der Kundenanforderungen bewertet.

2.5 Technologieradar

Mit Hilfe der funktionssemantischen Methode kann eine Recherche nach Technologien durchgeführt werden. Gesucht sei ein Bauteil, das höhere Festigkeit bei gleichem oder niedrigerem Gewicht als das bisherige Bauteil aufweist. Als zusätzliche Anforderung sollte es möglich sein, unterschiedliche Festigkeitszonen längs des Bauteils zu realisieren.

Ausgangspunkt ist somit ein Bauteil mit seinen Objekteigenschaften. Die Objekteigenschaft

„Festigkeit“ soll bei zumindest gleichem „Gewicht“ erhöht werden. Daraus wird die technische Funktion „Festkörper fester machen“ abgeleitet. Festigkeit kommt in technischen Texten aber in verschiedenen Ausprägungen vor, z.B. als Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit, Torsionsfestigkeit/Steifigkeit etc. vor.

Text-Mining-Systeme verfügen daher über einen Algorithmus (Stemming), der den Wortstamm ermittelt, sodass alle Spezifikationen von Festigkeit in den Texten erfasst werden. Funktionsverben sind aber in der Regel mehrdeutig, sodass zusätzlich die Objekteigenschaft beeinflussenden Verben (Abb. 2.5, Spalte 2) herangezogen werden, im vorliegenden Beispiel die betragsbeeinflussenden Verben „Betrag schaffen“ und „Betrag erhöhen“. Jetzt kann nach synonymen/alternativen Technologien gesucht werden.



Abb. 2.11: 3D-Druck eines Leichtbauteils (Quelle: Sculpteo)

Neben Multimaterialsystemen wurden nanoporige Schäume und 3D-Druckstrukturen gefunden. Eine Bewertung der Kosten, der Recyclingfähigkeit etc. gab den Ausschlag für 3D-Druckstrukturen. Damit können Stützstrukturen, die z.B. Ähnlichkeit mit Knochenstrukturen, Wabenstrukturen etc. aufweisen, gefertigt werden.

Das Ergebnis mag für einen 3D-Druck-Spezialisten einfach und nicht überraschend sein, aber es wurde ohne Expertenunterstützung gefunden, d.h. auch Nichtspezialisten sind in der Lage, Technologien zu ermitteln. Lediglich die finale Bewertung wird von einem Experten vorgenommen. Damit ist er von einer Menge an Routinearbeit entlastet.

Ein weiterer Vorteil ist das fast vollständige Screening einer Technologiefunktion. So wurden bei der Suche nach Technologien zur Oberflächen-Analyse ca. 20 Technologien durch Fertigungsfachleute ermittelt, während mit Hilfe der FSM über 100 technologische Lösungen gefunden wurden.

2.6 Marktexplorer

Besteht die Aufgabe im Auffinden alternativer Anwendungen einer Technologie, wird ebenfalls FSM eingesetzt (Ardilio 2012).

Beispiel ist hier ein Hersteller von Gasflaschen für Taucher, die in einem speziellen Tiefziehverfahren

nahtlos hergestellt werden und deshalb besonders fest und leicht sind. Ein erster Kreativworkshop zum Finden von alternativen Anwendungen ergab eine Reihe von Vorschlägen nahe an der bisherigen Funktion. Die Ideen reichten vom Speichern von Druckluft für LKW bis zu Sauerstoffflaschen für den medizinischen Bedarf.

Zur Ermittlung von Lösungen für entferntere Funktionen wurde deshalb die funktionssemantische Methode eingesetzt. Hier gibt es zwei Möglichkeiten der Recherche.

In der ersten Variante geht man von der technischen Funktion „Teile tiefziehen“ aus und ermittelt daraus Objekteigenschaften: Hohlkörper, hinterschneidungsfrei, nicht gekrümmt,...

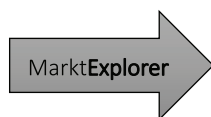
Anschließend werden Synonyme Produktionsverfahren zum Tiefziehen ermittelt, die die gleichen Objekteigenschaften herstellen können, aber zu schwereren Bauteilen führen, wie z.B. Gießen, Bleche schweißen,...

Die zweite Variante geht vom Objekt „Gasflasche“ und den zugehörigen Objekteigenschaften aus. Dann werden Synonyme Objektklassen mit der FSM ermittelt. Die Anwendung beider Varianten führte schließlich unter anderem zu Hochleistungsrohren für verschiedene Anwendungen. Sie sind gewichtsparend und können auch funktionserweiternd sein. So kann z.B. durch die verbesserten Fertigungseigenschaften der Durchfluss von speziellen Medien ermöglicht werden.

Taucherflasche



<https://www.rothmions.fr>



Hochleistungsrohre



<https://www.edelstahl-trummer.de>

Abb. 2.12: Ergebnis der Diversifikation mit dem MarktExplorer

2.7 Fazit

Die beträchtlichen Auswirkungen von Leichtbau-Innovationen auf ganze Wertschöpfungsketten von Produkten, das Zusammenspiel von Nutzung von Leichtbaukonzepten und neuartigen Füge-technologien z. B. in lasttragenden Automobilstrukturen, und die Marktforderungen nach nachhaltigen ressourcenschonenden Produkten stellen die Unternehmen bei der Suche nach neuen Technologien und neuen Anwendungen vor große Herausforderungen. Teure Fehlentwicklungen an den Anforderungen des Kunden vorbei kann sich kaum ein Unternehmen leisten. Der vorgestellte Ansatz bietet für diese Problemstellung einen systematischen Zugang zur Identifikation von Leichtbautechnologien in verschiedenen Märkten. Die eingesetzte Methode eignet sich sehr gut als unterstützendes Hilfsmittel zur systematischen Durchführung einer Technologiefrühaufklärung für Leichtbaukonzepte.

2.8 Literaturverzeichnis

- Ardilio, A.*: Fraunhofer MarktExplorer – Heute schon Märkte für morgen erkunden. In: Hans-Jörg Bullinger (Hrsg.): In: Fokus Technologiemarkt. Technologiepotenziale identifizieren – Marktchancen realisieren. München: Carl Hanser Verlag, S. 127-147, 2012
- Birkhofer, H.*: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980
- Blumauer, A.; Pellegrini, T.*: Semantic Web und semantische Technologien: Zentrale Begriffe und Unterscheidungen. In: Tassilo Pellegrini und Andreas Blumauer (Hrsg.): Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (X.media.press), S. 9-25, 2006
- Dengel, A.*: Semantische Technologien. Grundlagen – Konzepte – Anwendungen. Heidelberg: Springer Verlag, 2012
- Gómez-Pérez, A.; Fernández-López, M.; Corcho, O.*: Ontological engineering. With examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the semantic web. 3. Print. London: Springer (Advanced information and knowledge processing). 2004
- Granitzer, M.*: Statistische Verfahren der Textanalyse. In: T. Pellegrini, Blumauer, A. (HG): Semantic Web: Springer, Se. 437-450, 2006
- Gruber, T.*: Towards Principles for the Design of Ontologies used for Knowledge Sharing. In: N. Guarino, Poli, R. (Hrsg.): Formal Ontology in conceptual Analysis and Knowledge Representation. Deventer, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993
- Guarino, N.*: Formal Ontology and Information Systems. In: Nicola Guarino (Hrsg.): Formal ontology in information systems. Proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6 – 8, Trento, Italy. Amsterdam: IOS.Press [u.a.] (Frontiers in artificial intelligence and applications, 46), S. 3-17, 1998
- Hermans, J.*: Ontologiebasiertes Informations-Retrieval für das Wissensmanagement. Berlin: Logos Verlag, 2008
- Heubach, D.*: Eine funktionsbasierte Analyse der Technologierelevanz von Nanotechnologie in der Produktplanung. [Online-Ausg.], 2009
- Lassila, O.; McGuinness, D.*: The role of frame-based representation on the semantic web. Technical Report KSL-01-02. Stanford University, 2001
- Le, T., Warschat J., Farrenkopf, T.*: An early bioligisation process to improve the acceptance of biomimetics in organisations. In: Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering; S. 175-188, Le, N.T., Do T.V., Ngog H.A. Hoai An L.T. ; Springer 2017
- Mortara, L., Kerr, C., Phaal, R., Probert*: Technology intelligence: Identifying threats and opportunities from new technologies. Wayback Machine., D., University of Cambridge, 2007
- Schmitz, M.*: Ein Verfahren zur Formulierung von Suchstrategien für die Identifikation neuer Technologien. Dissertation, Universität Stuttgart, Fraunhofer Verlag 2017

Rosenich, P.: Der Patent-Tsunami aus Asien. Swiss Engineering, September 2015

Vahs, D.; Burmester, R.: Innovationsmanagement.

Von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Praxisnahes Wirtschaftsstudium), 2005

Warschat, J.: Integriertes Innovationsmanagement.

Erfolgsfaktoren, Methoden, Praxisbeispiele. Dieter Spath (Hrsg.), Studie 2003. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.

Warschat, J.; Korell, M.; Schmitz, M.: Semantik im Technologie-Monitoring. Konzepte, Prozesse und Werkzeuge. In: Jürgen Gausemeier (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Sym-

posium für Vorschau und Technologieplanung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 318, S. 37–52, 2013

Warschat, J.; Schimpf, S.; Korell, M. (Hrsg.): Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotenziale systematisch bewerten. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart; Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015

Wolffgramm, H.: Allgemeine Technologie – Teil 1. Hildesheim: Verlag Franzbecker (Allgemeine Techniklehre, 1), 1994

Wolffgramm, H.: Technische Systeme; Teil 1. Hildesheim: Verlag Franzbecker (Allgemeine Techniklehre, 3), 1997

3 Leichtbaustrategien und Bauweisen

Gundolf Kopp, Norbert Burkardt, Neven Majić

3.1	Einleitung	55	3.4	Bauweisen	66
			3.4.1	Differentialbauweise	66
3.2	Anforderungen an Leichtbau- konstruktionen	55	3.4.2	Integralbauweise	66
			3.4.3	Modulbauweise	67
3.3	Leichtbaustrategien	58	3.4.4	Verbundbauweise	68
3.3.1	Bedingungsleichtbau	59	3.4.4.1	Hybridbauweise	69
3.3.2	Konzeptleichtbau	60	3.4.4.2	Multi-Material-Design	69
3.3.3	Stoffleichtbau	61	3.5	Fazit	71
3.3.4	Formleichtbau	62			
3.3.5	Fertigungsleichtbau	63	3.6	Weiterführende Informationen	71
3.3.6	Leichtbau versus Kosten	63			

3.1 Einleitung

Eine große Herausforderung für Produktentwickler besteht darin, leichte und dabei zuverlässige Produkte zu gestalten. Gerade vor dem Hintergrund des weltweit zunehmenden Ausstoßes an klimaschädlichem CO₂-Gas gewinnt die Gewichtsreduzierung bewegter Massen zunehmend an Bedeutung, um einer effizienten Nutzung ökologischer Ressourcen während der Herstellung und des Betriebes eines Produktes gerecht zu werden. Neben der Funktionserfüllung wird eine möglichst geringe Masse zu einem wesentlichen Teil des Zielsystems eines neuen Produktes. Der Leichtbau ist daher eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung marktfähiger Produkte. Leichtbaustrukturen finden sich bereits in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten. Dabei sind nicht nur Strukturen in der Raumfahrt, wie Raketen und Satelliten oder Luftfahrzeuge, wie Flugzeuge und Hubschrauber, sondern ebenfalls Strukturen für den Straßen- und Schienenfahrzeugbau, wie Automobile und Fahrzeuge für den Rennsport, oder im Bauwesen z. B. Brücken zu nennen. Insbesondere

re im Automobilbau stellt die Entwicklung von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen eine besondere Herausforderung dar, da sehr große und schwere Batterieeinheiten aus Gründen einer geforderten Reichweite notwendig sind und damit leichte Fahrzeugkarosserien unverzichtbar werden. Für die Gestaltung solcher Leichtbaustrukturen bedarf es einer geeigneter Strategie und besonderer Bauweisen, um Gewichtseinsparungen zu erreichen.

3.2 Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen

Die Entwicklung von Leichtbaustrukturen ist ein komplexer und interdisziplinärer Prozess. Umweltverträglichkeit, Mobilität, Sicherheit und Komfort sind zentrale Anforderungen unserer Zeit. Sie stellen für die Produktentwicklung der Automobilindustrie bedeutende Herausforderungen dar. Eine Zusammenstellung von Anforderungen an Baugruppen im Automobilbau zeigt die Abbildung 3.1.



Abb. 3.1: Anforderungen an die Module und Baugruppen im Automobilbau (Braess und Seifert 2003)

Tab. 3.1: Überblick von Anforderungen an Leichtbaukonstruktionen

Rahmenbedingungen	Anforderungen	Kriterien
<ul style="list-style-type: none"> • Gesellschaft • Politik • Gesetzgebung • Märkte • usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökologie Ressourcenverbrauch (Herstellung und Betrieb) • Sicherheit Lasten Zulassungsvorschriften Konstruktionsvorschriften • Kundenakzeptanz Komfort Individualität • Kosten Austauschbarkeit Plattformbildung Montageabläufe Reparaturfreundlichkeit • Bauweise Werkstoffe Fertigungstechnologien • Recyclingfähigkeit • usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Masse • Kräfte • Verkaufszahlen • Stückzahlen • Budgetverfügbarkeit • Werkstoffauswahl • Oberflächenqualität • usw.

Neben der grundsätzlichen Funktion oder Erfüllung der Aufgaben der Leichtbaustruktur müssen unterschiedliche Rahmenbedingungen aus der Gesellschaft, der Politik und Gesetzgebung sowie den Märkten berücksichtigt werden. In Tabelle 3.1 wird ein Überblick über die Rahmenbedingungen, die Anforderungen und die gültigen Kriterien gegeben.

Rahmenbedingungen aus der Gesellschaft

Gesellschaftliche Rahmenbedingungen sind ein Ergebnis eines tief greifenden gesellschaftlichen Wandels. Bei diesem Wandel werden zunehmend Werte wie Individualität und Hedonismus¹ hervorgehoben. Pflicht- und Akzeptanzwerte bleiben hinter dem Erleben und Genießen von Freiheit und Wohlstand zurück. Außerdem ist der heutige Kunde im Bereich Automobil deutlich anspruchsvoller und emanzipierter als der frühere, was seine sinkende Kompromissbereitschaft bezüglich der individuellen Vorzüge erklärt (Neff et al. 2001). Damit unterteilt sich die

¹ Hedonismus (griech. hedone: „Freude, Vergnügen, Lust“) Bezeichnet eine ethische Lehre, nach der das Streben nach Genuss und das Vermeiden von Schmerz eigentliches Motiv, letztes Ziel und sittliches Kriterium des menschlichen Handelns sei.

Gesellschaft in viele unterschiedliche Lebenswelten. Insgesamt ist sie vieldeutiger, schnelllebiger und feinsinniger geworden. Die Verkörperung von Status wird in kleinen, fluktuierenden Teilgesellschaften immer wieder neu definiert. Als Folge dieser Veränderungen ist gerade auf den Automobilmärkten der westlichen Kulturen eine zunehmende Entwicklung zur Individualisierung zu beobachten. Sie wird von Marketingexperten wie folgt erklärt (Winzen 2002): „War der Pkw früher hauptsächlich Fortbewegungsmittel und der Besitz eines solchen bereits ein Statussymbol (...), so gilt heute (...) der Besitz eines Pkw als normal. Es wurde im Verlauf der letzten 20 Jahre somit notwendig, mit anderen Mitteln (...) zu zeigen, dass man sich von seinem Nachbarn abheben will und kann.“

Exklusive, ausgefallene und puristische Fahrzeugkonzepte versprechen zwar das gewünschte Maß an Individualität, lassen aber oftmals andere Kundenanforderungen außer Acht. Über den Trend zur Individualität hinaus gibt es eine Entwicklung, die vernunftbetonte Aspekte, wie Nutzen, Kosten und Umweltschutz beim Neuwagenkauf hervorheben. Gerade die Kosten spielen eine entscheidende Rolle.

Rahmenbedingungen aus Politik und Gesetzgebung

Mobilität ist ein wesentlicher Faktor für den Wohlstand unserer Gesellschaft. Prognostiziert wird eine weitere Zunahme der weltweiten Automobilproduktion von 65 Mio. auf rund 80 Mio. Einheiten pro Jahr bis 2015 (Nassauer 2007). Die mögliche Beeinflussung von klimatischen Veränderungen, verursacht u.a. durch einen hohen CO₂-Ausstoß durch Fahrzeuge, ist allgemein bekannt. Dem steht gleichzeitig das wachsende Umweltbewusstsein in Gesellschaft und Politik gegenüber. Mobilität wird zukünftig verstärkt unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit betrachtet werden. Strengere gesetzliche Regelungen, wie die der Europäischen Kommission, die für Pkw-Neuwagen ab 2012 einen durchschnittlichen Grenzwert von 130 g Kohlenstoffdioxid-Emission pro km festlegt (Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2007), zwingen die Fahrzeughersteller dazu, verbrauchsärmere Fahrzeuge anzubieten. Im Automobilbau sind deshalb in den letzten Jahren und Monaten verstärkte Anstrengungen unternommen worden, die Emissionen zu reduzieren.

Laut der Fahrwiderstandsgleichung geht die Fahrzeugmasse in drei der vier Fahrwiderstandsgrößen ein und ist damit eine den Kraftstoffverbrauch und damit die Emission maßgeblich beeinflussende Größe für konventionell angetriebene Fahrzeuge.

Fahrwiderstandsgleichung:

$F_W = (1 + C_{rot}) \cdot m_F \cdot a_F + m_F \cdot g \cdot f_R(v_F) \cdot \cos \alpha_{St} + m_F \cdot g \cdot \sin \alpha_{St} + \frac{\rho_L}{2} \cdot c_w \cdot A_x \cdot v_{rel}^2$			
m_F	Gesamtfahrzeugmasse [kg]	C_{rot}	Faktor zur Berücksichtigung rotatorisch beschleunigter Massen (0,05 Verbrennungsmotor, 0,03 elektromotorischer Antrieb)
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]	a	Beschleunigung des Fahrzeuges
f_R	Rollwiderstandskoeffizient (abhängig von der Geschwindigkeit und der Bereifung)	ρ_L	Luftdichte
α_{St}	Steigungswinkel	c_w	Luftwiderstandsbeiwert
v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit	A_x	Stirnfläche des Fahrzeuges
		v_{rel}	Relative Fahrgeschwindigkeit

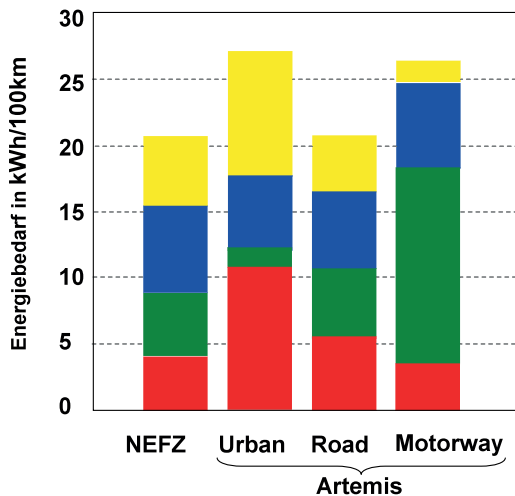
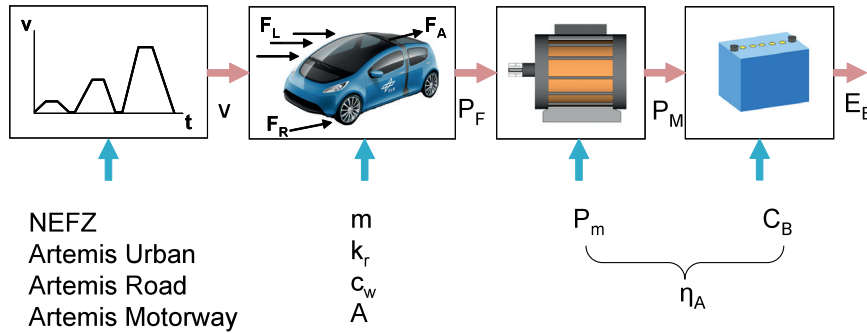
Unter Verwendung von konventionellen Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotor (Diesel- oder Ottomotoren) kann durch eine Massenreduktion um 100 kg – je nach zugrunde gelegtem Fahrzeugtyp und Fahrzyklus – ein Kraftstoffminderverbrauch von 0,3 bis 0,6 Liter je 100 km sowie eine Reduktion der CO₂-Emission um bis zu 10 g/km erzielt werden (Furrer 2007, Förderreuther 2008).

Neue Antriebsformen, wie Hybrid- oder Elektroantrieb, entschärfen diesen Druck auf Leichtbaustrukturen etwas. Diese Antriebsformen können durch Rückgewinnung von Bremsenergie, sogenannter Rekuperation², Beschleunigungsenergie rückgewinnen. Jedoch wird bei diesen Fahrzeugen das Gesamtgewicht z.B. durch Batterien grundsätzlich erhöht. Des Weiteren wird unterschätzt, dass trotz der Möglichkeit zur Rekuperation von Antriebsenergie während des Bremsvorgangs Energieverluste auftreten. In einer Studie wurde der Energiebedarf für den Betrieb eines Elektrofahrzeugs – bezogen auf die Masse, den Luftwiderstand, den Rollwiderstand und die Nebenverbraucher – bestimmt (Abb. 3.2). Das Betriebsverhalten eines Fahrzeugs mit einer Masse von 1753 kg wurde hier mit den vier unterschiedlichen Fahrzyklen NEFZ³, Artemis⁴ Urban, Artemis Road

2 Rekuperation (lat. recuperare) steht für technische Verfahren zur Energierückführung bzw. -gewinnung

3 NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus

4 Artemis: Fahrzyklen, die näher an der Realität liegen als im Vergleich dazu der NEFZ



Fahrzeugparameter

- Fahrzeugmasse 1753 kg
- Rollwiderstand 0,01
- Luftwiderstand 0,62 m²
- Batteriekapazität 80 Wh/kg
- Antriebswirkungsgrad 70 %
- Nebenverbraucher 1,5 kW



Abb. 3.2: Anteil der Fahrzeugmasse am Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs (Friedrich und Hülsebusch 2009)

und Artemis Motorway simuliert. Vor allem im Stadtzyklus (Urban), in dem künftige Elektrofahrzeuge betrieben werden, ist der Anteil des Masseinflusses auf den Energiebedarf höher. Zusätzlich zur Rekuperation ermöglicht eine Reduzierung des Fahrzeuggewichtes vor allem im Stadtverkehr eine Erhöhung der Reichweite.

Entgegen der geforderten Massenreduktion bei Fahrzeugen sorgen stetig steigende Leistungs-, Sicherheits- und Komfortansprüche dafür, dass sich das Fahrzeuggewicht kontinuierlich erhöht. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Fahrzeugmasse des Fahrzeugtyps Golf von Volkswagen, dessen Gewicht in den letzten 20 Jahren stetig anstieg (Goede et al. 2008). Einerseits sind Fahrzeuge immer größer geworden, andererseits werden weitere Sicherheitssysteme, Komfortausstattungen usw. verbaut. Um der Gewichtserhöhung entgegenzuwirken und um im Idealfall eine gewichtsneutrale Kompensation der zusätzlichen Fahrzeugfunktio-

nen zu erzielen, wird Leichtbau zum zentralen Leitgedanken der Fahrzeugentwickler (Röcker 2008). Dieser Leitgedanke lässt sich auf die bereits erwähnten Anwendungsgebiete der Luft- und Raumfahrt, des Schienenfahrzeugbaus, des Bauwesens usw. übertragen.

3.3 Leichtbaustrategien

Während Bauweisen, Werkstoffe und Fertigungstechnologien die Schlüssel zu neuen und verbesserten Leichtbaustrukturen sind, ermöglichen die Leichtbaustrategien eine zielgerichtete Anwendung dieser Schlüssel. Unterschiedliche Bezeichnungen für diverse Leichtbaustrategien sind heute in Gebrauch, wobei diese sich strukturiert in fünf Cluster zusammenfassen lassen (Abb. 3.3).

Im Entwicklungsprozess unterstützen diese Leichtbaustrategien die Gestaltung gewichtsoptimierter



Abb. 3.3: Leichtbaustrategien und Zuordnung diverser weiterer Bezeichnungen

Leichtbaulösungen. Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, wird – ausgehend vom Bedingungsleichtbau, der die Anforderungen an die Leichtbaustruktur vorgibt

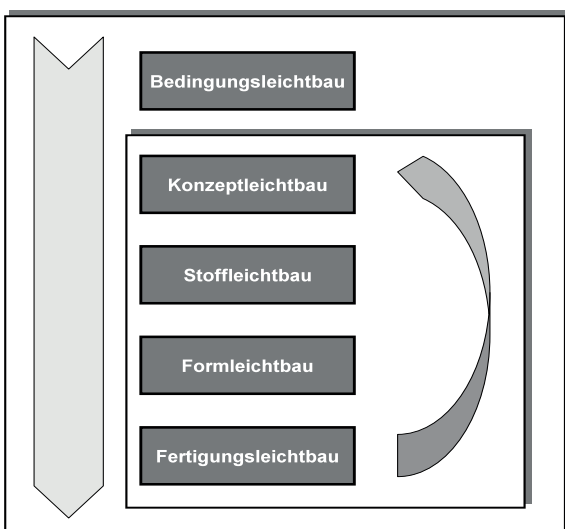


Abb. 3.4: Leichtbaustrategien und vorgeschlagener Ablauf während des Entwicklungsprozesses

und als Basis für weitere Leichtbaustrategien dient – eine Leichtbaustruktur über den Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau entwickelt. Diese vier Leichtbaustrategien können dabei im Entwicklungsprozess in diversen Iterationsschleifen durchlaufen werden und beziehen sich ggf. auf einzelne Bauteile, Baugruppen, Module oder auf die gesamte Leichtbaustruktur.

3.3.1 Bedingungsleichtbau

Der Bedingungsleichtbau, auch als Umfeldleichtbau bezeichnet, umfasst die Anforderungen oder Bedingungen an die Leichtbaustruktur. Diese Anforderungen setzen sich aus den Rahmenbedingungen der Gesellschaft, der Politik und Gesetzgebung sowie der Märkte zusammen. Als Beispiel hierfür sind Anforderungen an die Sicherheit einer Fahrzeugstruktur zu nennen, beispielsweise unterschiedliche Craschanforderungen, denn für die Zulassung eines

neuen Automobils auf dem Markt sind vom Gesetzgeber Mindestanforderungen festgelegt. In Europa sind ECE⁵-Vorschriften zu erfüllen, während in den USA die sogenannten FMVSS⁶-Vorschriften gelten. Des Weiteren gibt es noch Verbraucherschutz-Organisationen, wie z. B. Euro-NCAP⁷ oder US-NCAP⁸, deren Crash-Vorschriften höhere Anforderungen beinhalten. Aus den im Abschnitt 3.2 beschriebenen Rahmenbedingungen kann eine Vielzahl weiterer und notwendiger Anforderungen zur Entwicklung, Produktion, Betrieb, Wartung und Verwertung von Produkten abgeleitet werden.

Aus einer solchen Anforderungsliste ergibt sich noch keine Leichtbaustrategie. Erst durch kritisches Hinterfragen möglichst aller Anforderungen ergeben sich neue Leichtbaupotenziale für die zu entwickelnde Struktur. Es entsteht ein sogenanntes Pflichtenheft, das diejenigen Anforderungen enthält, auf die nicht verzichtet werden kann. Durch die konsequente Streichung nicht notwendiger Anforderungen, welche direkt die Struktur beeinflussen, kann Gewicht eingespart werden. Des Weiteren wird für die Anwendung weiterer Leichtbaustrategien mehr Auswahl- und Konstruktionsfreiheit geschaffen, um zusätzliches Gewicht einsparen zu können. Ein Fahrzeug, das z. B. nur für den amerikanischen Markt zugelassen werden soll, muss nicht unbedingt die Craschanforderungen des Euro-NCAP erfüllen. Die Leichtbaustrategien Zweck-, Spar-, Umweltleichtbau werden dem Begriff Bedingungsleichtbau untergliedert, da diese über den Bedingungsleichtbau bzw. über die Anforderungen aus den Rahmenbedingungen abgeleitet werden können.

Zweckleichtbau

Der Zweckleichtbau ergibt sich aus Anforderungen an die Funktion des Gesamtsystems. Gewichtseinsparung ist daher notwendig oder zweckmäßig zur Erfüllung der Funktion des Gesamtsystems. Am Beispiel eines Automobils kann dies die Achslast-

verteilung sein, um eine sichere Fahrdynamik zu gewährleisten. Bei einem Fahrzeug, dessen Motor im Vorderwagen untergebracht ist, kann es notwendig sein, zusätzliches Gewicht in der Vorderwagenstruktur einzusparen, um eine ausgewogene Achslastverteilung zu erreichen. Im Rennsport oder Flugzeugbau können dies z. B. Anforderungen nach höherer Beschleunigung sein, was vor allem durch eine reduzierte Masse ermöglicht werden kann.

Sparleichtbau

Der Sparleichtbau resultiert aus der Anforderung nach Kosteneinsparung während der Produktherstellung. Sie kann auch als direkte Kosteneinsparungsstrategie bezeichnet werden. Es werden durch die Einsparung von Werkstoff oder die Verkürzung von Prozessketten sowie durch Integration von Funktionen in die Leichtbaustruktur auch die Herstellungskosten reduziert.

Umweltleichtbau

Der Umweltleichtbau – in manchen Literaturquellen auch als Ökoleichtbau bezeichnet – ist das Ergebnis aus definierten Anforderungen an die Ökologie oder Ökonomie während des Betriebes der Leichtbaustruktur. Dabei werden teilweise höhere Kosten für den Werkstoff oder die Produktion akzeptiert, um während des späteren Betriebs Kosten oder Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt erfolgt z. B. eine Erhöhung der Produktions- und Herstellkosten zugunsten eines reduzierten Energieverbrauchs bzw. reduzierter Treibstoffkosten im Betrieb oder zugunsten erhöhter Zuladung. In Bezug auf die Kosten kann diese Leichtbaustrategie im Vergleich zum Sparleichtbau als indirekte Kosteneinsparungsstrategie bezeichnet werden.

3.3.2 Konzeptleichtbau

Der Konzeptleichtbau, teilweise auch als Systemleichtbau bezeichnet, zeichnet sich durch die Betrachtung des Gesamt- bzw. Teilsystems aus. Durch die systematische Betrachtung geeigneter Strukturbauteile, Komponenten und Module und deren

5 ECE: Economic Commission for Europe

6 FMVSS: Federal Motor Vehicle Safety Standard

7 Euro-NCAP: European New Car Assessment Programme

8 US-NCAP: US New Car Assessment Program

Anpassung dieser an das Gesamt- bzw. Teilsystem wird das Gewicht des Gesamtsystems gesenkt. Die Einbindung neuer Lastpfade oder die Entwicklung von Strukturen mit höherer Teile- und Funktionsintegration sind Beispiele hierfür. Dies kann die Anordnung der Komponenten (Package) und das Design einer Komponente zwar erheblich beeinflussen, aber damit das Gewicht des Gesamtsystems signifikant verringern.

Als Beispiel ist die Außenhaut eines Flugzeugflügels zu nennen. Dessen Geometrie ist vor allem für die aerodynamischen Grundeigenschaften und letztendlich für den Auftrieb zuständig. Sie übernimmt auch zusätzliche Funktionen zur Erfüllung von Steifigkeitsanforderungen. Eine weitere Funktion besteht in der Ausbildung einer Tankstruktur im Innern des Flügels, eines sogenannten Integraltanks, bei dem die Struktur gleichzeitig als Treibstoffbehälter dient (Abb. 3.5). Das Beispiel des Flugzeugflügels zeigt, dass unterschiedliche Anforderungen an die Struktur, wie Oberflächengüte, Festigkeiten, Dichtigkeit, Korrosionsbeständigkeit, usw. erfüllt werden müssen. Die Flügelstruktur übernimmt damit multifunktionale Aufgaben, wobei eine klare Abgrenzung zwischen Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau oftmals nicht möglich ist.

Teilweise wird dies auch mit Funktionsleichtbau beschrieben, wobei zwischen passivem (Abb. 3.5) und aktivem Funktionsleichtbau zu unterscheiden ist. Würden dem technischen System „Flügel“ aktive Elemente hinzugefügt bzw. vorhandene Elemente,

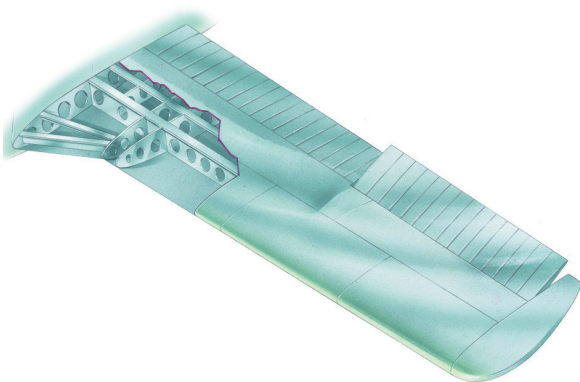


Abb. 3.5: Integraltank zwischen den Tragflächenrippen eines Flugzeugflügels (Quelle: fotolibra)

wie Querruder und Klappen verwendet werden, um zur Minderung von Manöver- oder Böenlasten beizutragen, so könnten dadurch z.B. die Anforderungen an die Steifigkeit verringert werden. Dabei darf das zusätzliche Gewicht durch hinzugefügte Elemente, wie Sensoren oder Steuereinheiten, nicht vernachlässigt werden. Bei der Anwendung von aktiven Werkstoffen und Werkstoffsystemen, wie Piezoelementen oder Carbo-Nano-Tubes als weitere Beispiele für aktive Funktionsintegrationen, wird die direkte Verknüpfung mit dem Stoffleichtbau ersichtlich. Wird der Konzeptleichtbau auf einzelne Module oder Subsysteme angewendet, kann hier auch von Modulleichtbau gesprochen werden.

Durch die in Abbildung 3.4 dargestellte Vorgehensweise hat der Konzeptleichtbau auf die anderen Leichtbastrategien einen großen Einfluss. Gewichts-einsparungspotenziale ergeben sich hier in deren Verknüpfung. Der Konzeptleichtbau hat durch die grundlegende Definition des Gesamtsystems einen weitreichenden Einfluss auf die Ausführung der Struktur. Oftmals ergeben sich Einschränkungen in der Wahl des Werkstoffes bzw. der Geometrie.

3.3.3 Stoffleichtbau

Der Stoff- bzw. Werkstoffleichtbau hat das Ziel, für die gegebenen Anforderungen die Struktur mit dem leichtesten möglichen Werkstoff herzustellen. Durch die Substitution eines Werkstoffes durch einen anderen Werkstoff mit geringerer Dichte kann das Gewicht einer Struktur reduziert werden. Dies scheint eine einfach umsetzbare Strategie zu sein. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass durch die Wahl eines anderen Werkstoffes ohne Anpassung der Geometrie und der ebenfalls damit zusammenhängenden Fertigungsverfahren für die Herstellung der Struktur die Umsetzung des Stoffleichtbaus als nicht einfach gilt. Teilweise sind mit der Umstellung von einem Werkstoff zu einem anderen große Innovationen und Technologiesprünge notwendig. Als Beispiel ist die Substitution von Aluminium durch faserverstärkten Kunststoff im Flugzeugbau zu nennen. Zur Umsetzung reicht es oft nicht aus, einfach den Werkstoff zu ändern. Unter anderem sind Anpassungen

in Bezug auf Kräfteinleitungen oder Füge­technologie erforderlich.

Etwas einfacher gestaltet sich der Stoff­leichtbau, wenn für ein Strukturbauteil ein Werkstoff höherer Festigkeit mit ansonsten ähnlichen Eigenschaften und ähnlicher Verarbeitungstechnologie gewählt wird und so die Wandstärken und damit das Gewicht verringert werden können. Abbildung 3.6 zeigt ein solches Beispiel mit einer Hinterachsfeder für einen VW (Lupo FSI). Es wurde anstelle einer Feder aus Stahl mit 1,1 kg Gewicht eine Feder in Titan ausgeführt. Bei gleichen Kenngrößen lag die Gewichtseinsparung hier bei 450 g (Schauerte et al. 2001).

Beim Stoffleichtbau kommen die unterschiedlichsten Werkstoffe und Werkstoffverbunde zur Anwendung:

- Metallische Werkstoffe
 - Stahl
 - Aluminium
 - Magnesium
 - Titan
- Nicht-metallische Werkstoffe
 - Kunststoffe
 - Technische Keramik
- Verbundwerkstoffe
 - Faserverstärkte Kunststoffe (Kohlenstoff-, Glasfaserverbunde)
 - Keramische Verbundwerkstoffe
 - Metallische Verbundwerkstoffe
- Aktive Werkstoffe
 - Piezowerkstoffe
 - Carbo-Nano-Tubes

Dabei erscheint für den Stoffleichtbau der Einsatz von Verbundwerkstoffen, insbesondere faserverstärkten Kunststoffen, als besonders geeignet. Deren Eigenschaften können den entsprechenden Anforderungen durch die Wahl der Fasern oder Faserkombinationen, die Wahl der Faserorientierung und der Matrix entsprechend angepasst werden. Der Einsatz solcher Verbundwerkstoffe kann je nach Anwendungsfall sehr kostenintensiv oder gar nicht geeignet sein, da unter Umständen weitere Kriterien an das Gesamtsystem außer dem Gewicht berücksichtigt werden müssen.



Abb. 3.6: Hinterachsfedern eines Fahrzeugs aus Stahl und Titan (Schauerte et al. 2001)

Adaptive Werkstoffe sind für den aktiven Funktionsleichtbau besonders interessant, denn durch den Einsatz von Piezokeramik können z.B. unerwünschte Schwingungen von Strukturen gedämpft und Spitzenlasten reduziert werden, was eine gewichtsreduzierte Auslegung der Struktur erlaubt.

3.3.4 Formleichtbau

Das Ziel des Formleichtbaus ist es, eine Struktur an die gegebenen Anforderungen so anzupassen, dass durch eine optimale Kraftverteilung und Formgebung eine Struktur mit minimalem Gewicht entsteht. Die wichtigsten Anforderungen neben dem Gewicht sind Belastungen, Bauräume, Fertigungstechnologien und Funktionsintegration wie Lasteinleitungselemente. Dies verdeutlicht, dass der Formleichtbau mit dem Konzept- und Stoffleichtbau eng verknüpft ist. Beim Formleichtbau werden die Geometrie, Anzahl und Anordnung der Strukturbauteile unter Berücksichtigung der Anforderungen, vor allem der Lasten, konstruktiv umgesetzt. Während des Entwicklungsprozesses kommen neben unterschiedlichen Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien ebenfalls Optimierungsverfahren, wie Topologie- oder Formoptimierungsverfahren zur Anwendung (Abb. 3.7).

Die konstruktive Umsetzung der Struktur im Formleichtbau hängt nicht nur mit den erwähnten

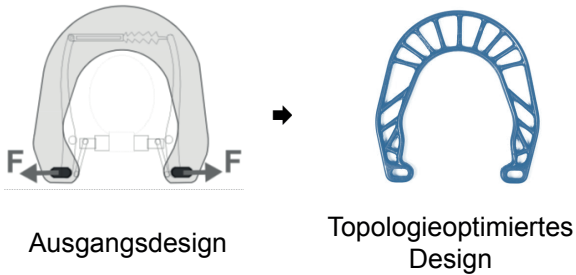


Abb. 3.7: Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers (Spickenheuer et al. 2009)

Leichtbaustrategien (Konzept- und Stoffleichtbau) zusammen, sondern ist größtenteils abhängig von der gewählten Bauweise, nämlich Differential- oder Integralbauweise (Abschnitt 3.4). Bei der Differentialbauweise steht der Formleichtbau für die gewichtsoptimierte konstruktive Gestaltung einzelner Strukturelemente im gewählten Werkstoff und Fertigungsverfahren und definiert die Reihenfolge des Zusammenbaus, das über die Fügetechnologie zu deren Ausführung zu einer lasttragenden Gesamtstruktur führt. Im Vergleich dazu ist der Formleichtbau bei der Integralbauweise für die Geometrie und Oberflächenform verantwortlich und optimiert z. B. die Wandstärken eines Integralbauteils in Bezug auf den verwendeten Werkstoff und das Fertigungsverfahren, um eine gewichtsoptimierte Struktur zu erhalten. Der Formleichtbau wird teilweise aufgrund der beschriebenen Gestalt- und Strukturanpassungen als Gestalt- oder Strukturleichtbau bezeichnet.

3.3.5 Fertigungsleichtbau

Unter dem Begriff Fertigungsleichtbau werden die Gewichtseinsparungspotenziale durch Herstellungs-, Fertigungs- und Montageprozesse bezeichnet. Allerdings kann der Fertigungsleichtbau selten isoliert betrachtet werden, da dieser mit den beiden Leichtbaustrategien Stoff- und Formleichtbau sehr eng verknüpft ist. Fertigungsverfahren, wie Tailored Welded Blanks oder Tailored Rolled Blanks sind zu nennen, die Blechstrukturen mit unterschiedlichen Wandstärken herstellen können und damit optimiert für die in der Struktur auftretenden Beanspruchun-

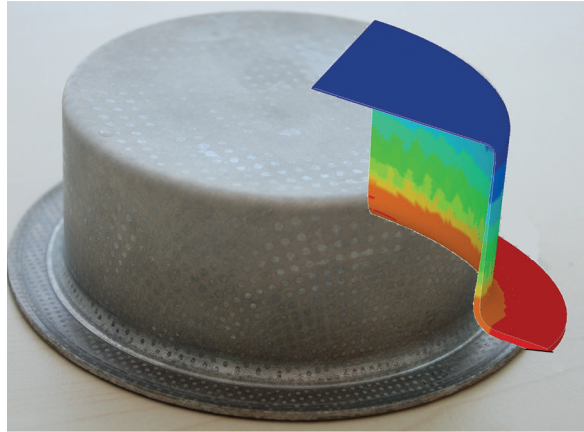


Abb. 3.8: Superplastisch umgeformter Versuchskörper aus Magnesium

gen sind. Des Weiteren können auch Umformprozesse dem Fertigungsleichtbau zugeordnet werden, da diese die Werkstoffeigenschaften verbessern und auch die Wandstärken gezielt reduzieren (s. Kap. III.2). Beispiele hierfür sind das Warmumformen ausgewählter Stahllegierungen oder das superplastische Umformen von Magnesium (s. Kap. II.4) (Abb. 3.8).

Die im Diagramm (Abb. 3.9) dargestellte Probe wurde bei einer Temperatur von 250 °C mit Umformgeschwindigkeiten von 0,3 mm/min bzw. 5 mm/min hergestellt.

Prozesse in der Füge- und Montagetechnologie, wie z. B. Laserschweißen, Lötten oder Kleben sind auch dem Fertigungsleichtbau zuzuordnen (s. Kap. IV.3 und IV.4). Im Vergleich zu geschraubten, genieteten oder punktgeschweißten Strukturen können hier z. B. Flanschabmessungen zum Fügen reduziert werden bzw. homogenere Verbindungen zwischen den zu verbindenden Strukturen realisiert werden.

3.3.6 Leichtbau versus Kosten

Im Leichtbau stellt sich die Frage, wie viel ein Kilogramm Gewichtseinsparung kosten darf. Die Antworten darauf fallen in den verschiedenen Branchen unterschiedlich aus, sie können sogar innerhalb der verschiedenen Anwendungsgebiete stark variieren (Abb. 3.10).

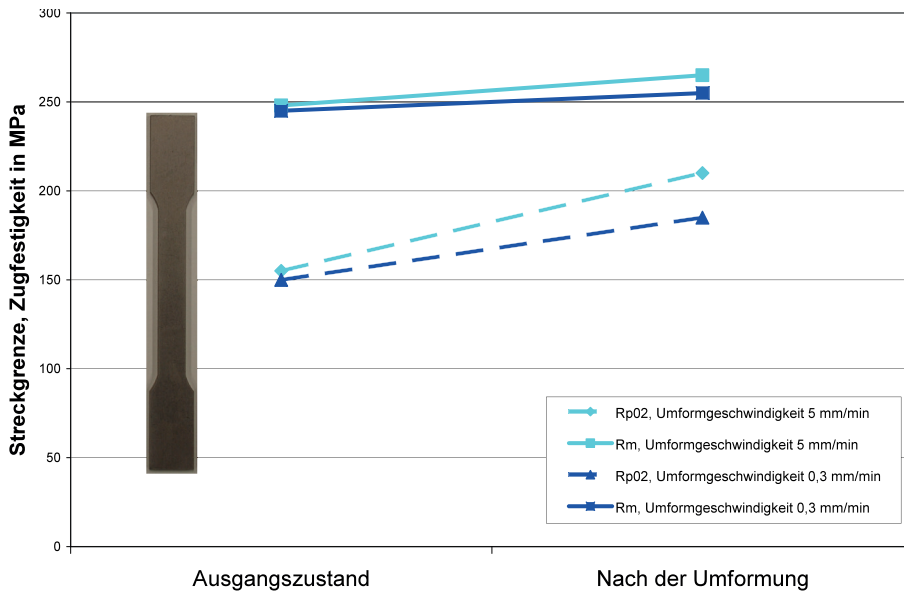


Abb. 3.9: Mechanische Eigenschaften der Magnesiumlegierung AZ31 vor und nach der superplastischen Umformung bei Raumtemperatur

Nicht nur in Bezug auf das Anwendungsgebiet, sondern auch im Zusammenhang mit der Lage des Strukturbauteils bzw. des Bereiches innerhalb der Gesamtstruktur entstehen unterschiedliche Zielvorgaben für Mehrkosten, die im Zusammenhang mit der Gewichtseinsparung noch akzeptiert werden. Beispielsweise werden in verschiedenen Bereichen im Automobil in Abhängigkeit der Antriebsart und der Lage des Aggregats in Verbindung mit der Schwerpunktlage unterschiedliche Mehrkosten pro eingespartes Kilogramm akzeptiert. Das Beispiel nach Abbildung 3.11 zeigt einen Frontantrieb mit einem Antriebsaggregat im Vorderwagen. Aufgrund der Schwerpunktlage und der damit zusammenhängenden Fahrdynamik werden hier höhere Mehrkosten zur Gewichtseinsparung im vorderen Bereich

akzeptiert anstatt im hinteren Fahrzeugbereich. Des Weiteren werden im Dachbereich höhere Kosten pro eingespartes Kilogramm akzeptiert als im Bodenbereich.

Bei der Betrachtung des Gesamtsystems kann die sekundäre Gewichtseinsparung in die Betrachtung der Kosten integriert werden. Eine sekundäre Gewichtseinsparung bezeichnet Einsparungen einer Struktur, die sich auf andere Strukturen auswirken. Im Automobilbau kann bei Gewichtseinsparungen z. B. in der Karosserie durch weitere Anpassungen im Fahrwerk, Bremsen, Getriebe bis hin zum Antriebsaggregat weiteres sogenanntes „sekundäres“ Gewicht eingespart werden. Die Abbildung 3.12 zeigt dies in Zusammenhang mit den beiden Leichtbaustrategien Stoff- und Konzeptleichtbau.

Durch Stoff- und Konzeptleichtbau entstehen primäre Gewichtseinsparungen, die weitere sekundäre Einsparungen durch Anpassungen am Motor, Getriebe oder Fahrwerk erlauben. Diese sekundären Gewichtseinsparungen haben nicht nur einen Einfluss auf das Gesamtgewicht, sie können auch Mehrkosten pro eingespartem Kilogramm erfordern.

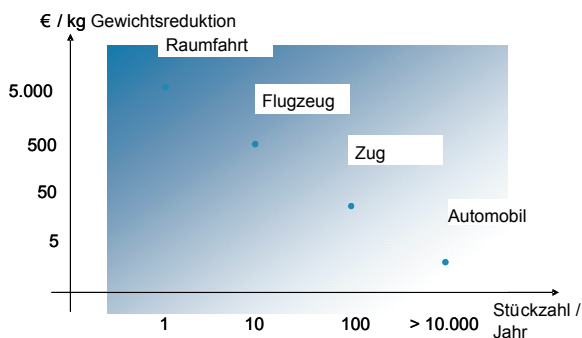


Abb. 3.10: Leichtbaukosten pro eingespartem Kilogramm, die vom Kunden akzeptiert werden (Friedrich 2008)

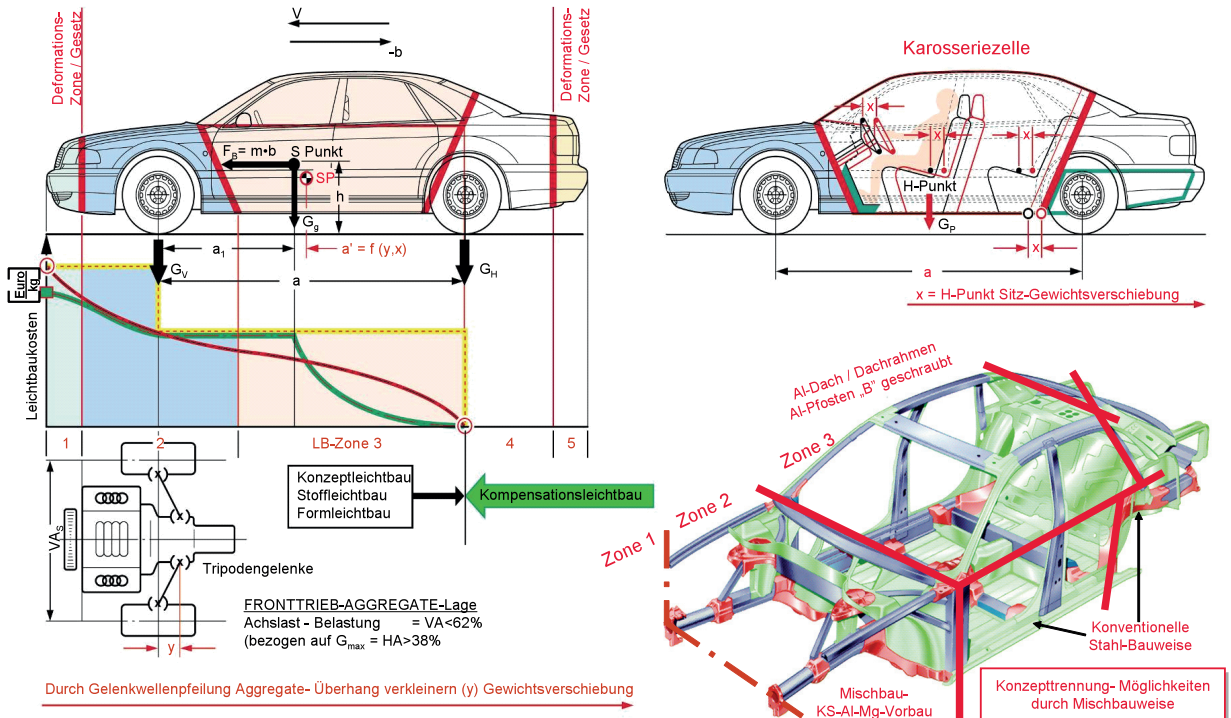


Abb. 3.11: Leichtbauzonen im Automobil (Haldenwanger 1997)

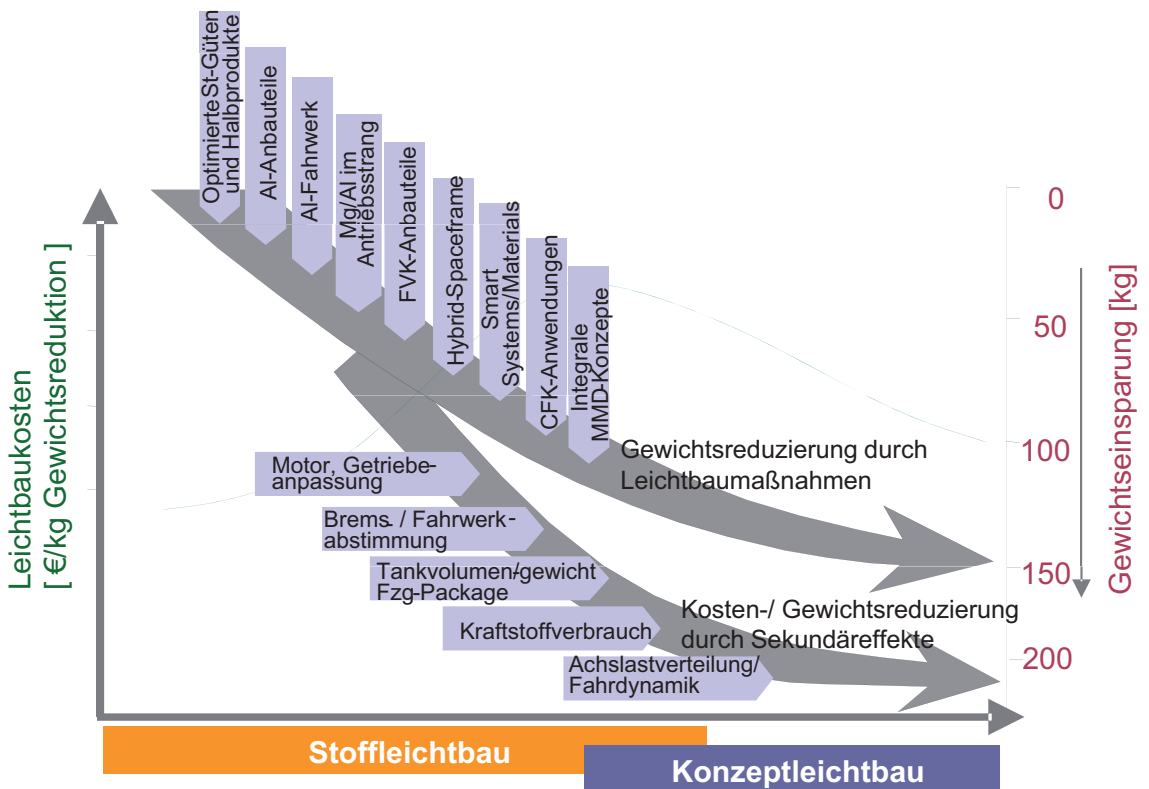


Abb. 3.12: Leichtbaukosten in Zusammenhang mit den sekundären Gewichtseinsparungen am Beispiel Automobil (Friedrich et al. 2003)

3.4 Bauweisen

Eine Gesamtstruktur kann durch unterschiedliche Bauweisen – getrennt oder zusammenhängend – erstellt werden. Des Weiteren kann eine Bauweise sich lediglich auf ein Bauteil, ganze Baugruppen oder die gesamte Struktur beziehen. Welche der Bauweisen bei welchen Strukturen angewendet wird, hängt einerseits von den verwendeten Konstruktionsstrategien und den Konstruktionselementen, wie Bauteilgröße und -anzahl, Wahl der Werkstoffe bzw. der Fertigungsverfahren und andererseits vom betrachteten Umfang bzw. Bereich ab.

3.4.1 Differentialbauweise

Die Differentialbauweise ist eine klassische Bauweise, um Gesamtstrukturen aufzubauen. Es werden einzelne Konstruktionselemente, Einzelteile bzw. Bauteilelemente und Halbzeuge durch Fügen zu einer Gesamtstruktur additiv miteinander verbunden. Die einzelnen Elemente werden dabei – verglichen mit anderen Bauweisen – verhältnismäßig einfach gestaltet. Abbildung 3.13 zeigt einen Teil einer Vorderwagenstruktur eines Fahrzeugs, aufgebaut durch einzelne Blechelemente in Differentialbauweise. Auf diese Weise ergeben sich einige Vorteile. Es können unterschiedliche Werkstoffe durch die einzelnen Elemente kombiniert zur Anwendung kommen und dabei ihr spezifisches Leichtbaupotenzial entwickeln. Die Bauweise dient auch der Fail-Safe-Philosophie. Im Schadensfall können partielle Reparaturen an einzelnen Elementen ausgeführt werden, sie können auch relativ einfach ausgetauscht werden. Am Ende des Bauteillebens sind die einzelnen Elemente einfacher zu recyceln.

Die Differentialbauweise hat neben den beschriebenen Vorteilen auch Nachteile. An den Fügstellen zwischen einzelnen metallischen Werkstoffen kann Kontaktkorrosion auftreten. Neben einem höheren Materialaufwand für einzelne Bauteile z. B. durch Fügefleische ergibt sich konsequenterweise auch ein erhöhter Montageaufwand.



Abb. 3.13: Fahrzeugstruktur in Differentialbauweise (Super Light Car)

3.4.2 Integralbauweise

Die Integralbauweise dagegen hat zum Ziel, die Struktur aus einem Stück herzustellen und durch die Integration von Funktionen (Anschraubpunkte, Versteifungen etc.) und Teilstücken möglichst viel Gewicht einzusparen. Die Leichtbaustrategie Konzeptleichtbau ist eng mit dem Ziel der Funktionsintegration in der integralen Bauweise verknüpft. Die Vorteile dieser Bauweise liegen im minimalen Bauteilgewicht und einem geringen Fügeaufwand innerhalb der Grenzen des Bauteils. Dies wird durch den direkten Vergleich der Differentialbauweise (Abb. 3.13) und der Integralbauweise im gleichen Bauteil- bzw. Funktionsumfang deutlich. Die Abbildung 3.14 zeigt ein integrales Gussbauteil aus Magnesium mit einem Gewichtseinsparungspotenzial von mehr als 60% im Vergleich zur Stahlvariante in Differentialbauweise.

Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber. Die Fertigung ist teilweise aufwändiger, und die Formen zur Herstellung der Bauteile sind komplexer und dadurch teurer. Des Weiteren ist die Materialvariation im Bauteil eingeschränkt.

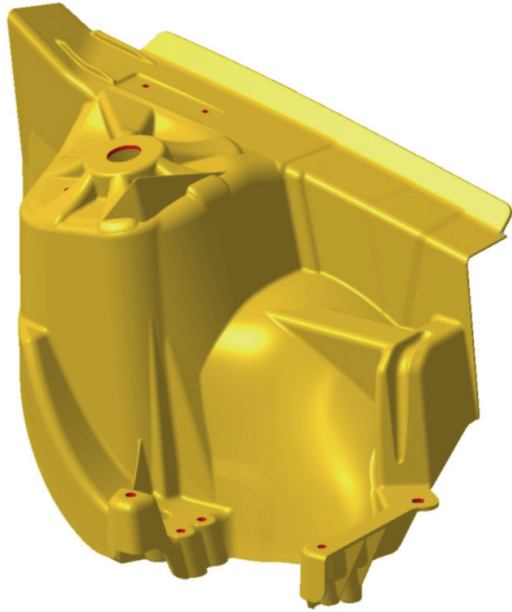


Abb. 3.14: Integrales Gussbauteil einer Vorderwagenstruktur eines Fahrzeugs

3.4.3 Modulbauweise

Eine andere Art des Zusammenbaus ist die Modulbauweise. Dabei kann die Definition für ein Modul wie folgt zusammengefasst werden: Ein Modul ist eine Baugruppe eines größeren Zusammenbaus. Es zeigt eine starke Vernetzung innerhalb seines umfassenden Bereiches und eine im Vergleich dazu schwächere Vernetzung zu seinen Nachbarbauteilen bzw. -modulen. Diese angrenzenden Bauteile und Module können durch eindeutige Schnittstellen abgegrenzt sein. Über diese definierten Schnittstellen wird ein Modul für die mechanische Verbindung mit der Gesamtstruktur und für alle zu übertragenden Leistungen und Informationen in das umgebende System eingebunden. Durch eine optimale Integration und Verkettung von Funktionen und Teilfunktionen auf Ebene der Gesamtstruktur führt es zur Modulbauweise. Das Frontend des VW Polo ist in Modulbauweise ausgeführt (Abb. 3.15). Ein Montageträger nimmt dabei die in einen Querträger integrierten Scheinwerfer, den Kühler und den Stossfänger im Modul auf. Die Definition von Modulen wird anhand unterschiedlicher Vernetzungskriterien vorgenommen, z.B. funktions-

bezogen, prozessbezogen oder strukturbezogen (Tab. 3.2).

Funktionsbezogene Module umfassen Funktionen wie Klimatisierung oder Steuerung. Sie fassen dabei oftmals Elemente, Bauteile oder Baugruppen ähnlicher Funktion zusammen, die teilweise über große Bereiche des Gesamtsystems verstreut platziert sein können.

Prozessbezogene Module beziehen sich z. B. auf Entwicklungs-, Herstellungs- oder Montageprozesse. Ein Beispiel aus der Automobilindustrie sind Montagemodule, wie das Frontend des Polo (Abb. 3.15). Hier werden vormontierte Bauteile und Baugruppen als ein Montagemodul in die Fahrzeugstruktur eingebaut. Dabei ist der Aufwand der Vormontage des Moduls höher als der eigentliche Montageaufwand in die Fahrzeugstruktur. Dieses Modul kann bei Zulieferern vorgefertigt und vormontiert werden und beim Automobilhersteller an das Montageband zeitgetaktet angeliefert werden. Solche bzw. andere Module können bei der Wahl geeigneter Schnittstellen auch in anderen Fahrzeugplattformen und Produktfamilien verwendet werden. Diese Vorteile werden in die Unternehmensstrategie in Bezug auf Variation und Logistikkette mit einbezogen bzw. von solcher Unternehmensstrategie betrieben.

Strukturbezogene Module umfassen strukturelle Bauteile bis hin zu Gesamtstrukturen, wie Karosse-



Abb. 3.15: Frontend in Modulbauweise am Beispiel des VW Polo (Henning 2005)

Tab. 3.2: Beispiele für Moduldefinitionen (Schindler 2008)

Vernetzungskriterien	Modulbegriff	Beispiele aus dem Flugzeugbau	Beispiele aus dem Fahrzeugbau
funktionsbezogen	Funktionsmodul	Bugfahrwerk- bzw. Hauptfahrwerksmodul Cockpitmodul	Klimamodul Federbeinmodul Heizmodul
prozessbezogen	Montagemodul	Klappen Türmodule	Front- oder Heckmodul Dachmodul Türmodul Heckklappenmodul
	Entwicklungsmodul	Klimaanlage Triebwerksmodul	Antriebsstrang Abgasanlage
strukturbezogen	Strukturmodul	Rumpfmodul Tragflächen und Flügelkastenmodul Heckleitwerk	Vorderwagen Karosseriestrukturmodul

riebaumodule in der Fahrzeugindustrie oder ganze Flugzeugstrukturen in der Luftfahrt.

Die Modulbauweise eröffnet durch eine geeignete Wahl der Schnittstellen und damit der Zusammenfassung und Abgrenzung von Modulen die Plattformbildung und erhöht damit den Verwandtschaftsgrad in einer Produktfamilie. Durch diese Denkweise, die die gesamte Struktur umfasst und der Möglichkeit einer Gleichteilestrategie können Entwicklungs-, Herstellungs- und Montagekosten reduziert werden. Allerdings wird bei der Modulbauweise nicht immer die optimale Leichtbaulösung für einzelne Gesamtstrukturen innerhalb der Produktfamilie erreicht, was ein Nachteil sein kann.

3.4.4 Verbundbauweise

In der Verbundbauweise werden verschiedene Werkstoffe in einem Bauteil vereint, um durch deren unterschiedliche Eigenschaften eine Bauteilstruktur mit reduzierter Masse bei gleichbleibenden oder verbesserten Eigenschaften zu erhalten (s. Kap. II.9). Als Werkstoffe kommen Metalle, technische Keramik, verstärkte oder unverstärkte Kunststoffe in Frage, die je nach Anforderung auf unterschiedliche Weise miteinander kombiniert werden. Ein beliebtes Beispiel sind Sandwichstrukturen, bei denen Kerne aus Schäumen (Metall oder Kunststoff), Waben oder pulvermetallurgisch hergestellte Metallstrukturen

mit Decklagen aus Metall- oder Kunststoffplatten versehen werden (Abb. 3.16).

Diese Sandwichstrukturen haben im Vergleich zu Vollmaterial bei gleicher oder verbesserter Biegesteifigkeit ein reduziertes Strukturgewicht. Die Abbildung 3.17 stellt dies am Beispiel der spezifischen Biegesteifigkeit für unterschiedliche Strukturen in Abhängigkeit der Höhe dar.

Die Vorteile der Verbundbauweise sind ihr geringeres Gewicht trotz höherer erreichbarer Steifigkeit sowie funktionsintegriert eine bessere akustische und thermische Dämmung.

Diesen Vorteilen stehen Nachteile, wie geringere Fail-Safe-Eigenschaften, vor allem bei Faserverbundwerkstoffen, die herausfordernde Krafteinleitung, ein erhöhter Fertigungsaufwand und teilweise höhere



Abb. 3.16: Unterschiedliche Kernmaterialien für Sandwichstrukturen (Kopp et al. 2009)

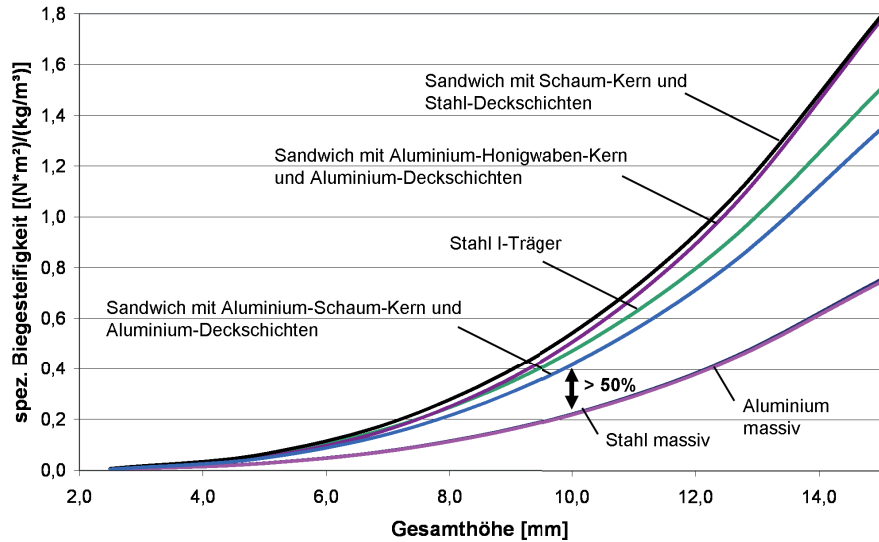


Abb. 3.17: Spezifische Biegesteifigkeit bezogen auf die Höhe (Kopp u. a. 2009)

Werkstoffkosten gegenüber. In der Entwicklungsphase ist die Simulation der Bauteileigenschaften von vielen Fertigungsparametern abhängig, wodurch sich eine genaue Simulationsvorhersage erschwert. Bei Sandwichstrukturen kommt die geringe Darstellbarkeit von Geometriesprüngen als ein weiterer Nachteil hinzu. Innerhalb der Bauteilgrenzen ist die Reparaturfähigkeit ebenfalls eingeschränkt.

3.4.4.1 Hybridbauweise

Bei der Hybridbauweise werden unterschiedliche Werkstoffe auf Bauteilebene kombiniert (s. Kap. III.9). Die Hybridbauweise stellt eine Materialmischbauweise dar. Der Materialverbund wird alleine dadurch hergestellt, dass mindestens ein Leichtmetallwerkstoff in urformender Fertigung (An-, Ein- oder Umgießen) mit einer weiteren Werkstoffkomponente verbunden wird (Abb. 3.18). Die Verbindung kann hier sowohl form- als auch stoffschlüssig sein. Durch diese Kombination werden die Eigenschaften der jeweiligen Elemente der Bauteile und deren unterschiedliche Werkstoffeigenschaften optimal ausgenutzt. Die einzelnen Werkstoffeigenschaften können sich durch die Hybridbauweise ergänzen und ermöglichen dadurch ein hohes Leichtbaupotenzial. Demgegenüber steht ein hoher Fertigungsaufwand durch das Urformverfahren, welcher zu Mehrkosten im Vergleich zu anderen Bauweisen führen kann.

Die Schadensbeurteilung und Reparaturmöglichkeiten sind auch eingeschränkt, und die Gefahr der Korrosion an den form- und stoffschlüssigen Kontaktstellen ist schon während der Entwicklung zu beachten.

3.4.4.2 Multi-Material-Design

Multi-Material-Design ist die konsequente Weiterentwicklung der zuvor aufgezeigten Bauweisen.

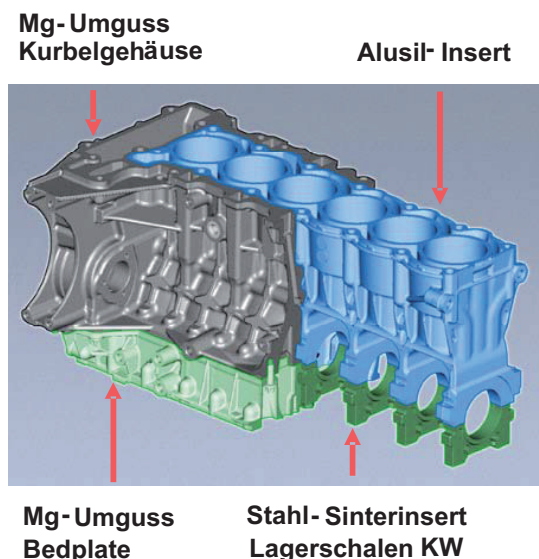


Abb. 3.18: Kurbelgehäuse aus einem Aluminium-Magnesium-Verbund eines Sechszylinder-Motors von BMW (KW-Kurbelwellen-lagerschalen) (Klütting 2004)



Dabei wird für jedes Bauteil ein anforderungsgerechter Werkstoff eingesetzt. D.h. in Multi-Material-Design realisierte Strukturen werden durch unterschiedliche Werkstoffe, z.B. Stahl, Aluminium, Magnesium oder Faserverbundwerkstoffe und durch verschiedene Fertigungsverfahren, wie Gießen, Umformen, Pressen oder Spritzen hergestellt. Dieser Materialmix ist notwendig, um das volle Leichtbaupotenzial ausschöpfen zu können. Bei der Verbindung der Strukturelemente oder Bauteile zu Modulen oder Gesamtstrukturen kommen warme und kalte Fügeverfahren zum Einsatz. Diese Mischung beinhaltet aber nicht nur die Werkstoff- und Fertigungsebene, sondern auch die Konstruktionsbauweisen der Gesamtstruktur auf Systemebene.

Die Anwendung von solchen unterschiedlichen Werkstoffen erfordert allerdings die Anwendung der jeweils geeigneten Fügeverfahren. Thermische Fügeverfahren, wie Schweißen oder Löten, kommen für Kunststoffe nicht in Betracht. Es kommen deshalb überwiegend mechanische Fügeverfahren wie z.B. Nieten, Stanznieten, Clinchen, Direktschrauben oder chemische Fügeverfahren (Kleben) zum Einsatz. Eine Kombination dieser Fügeverfahren, das sogenannte Hybridfügen, findet ebenfalls in Multi-Material-Designstrukturen seine Anwendung (s. Kap. IV.5).

Bei der Auswahl der jeweiligen Fügeverfahren sind der Montageprozess und damit die Zugänglichkeit,

wie z.B. einseitige oder zweiseitige Zugänglichkeit während des Fügens und der notwendige Platzbedarf für Fügevorrichtungen einzuplanen (s. Kap. IV.1). Die mechanischen Eigenschaften in Bezug auf die Kraftübertragung sowie die Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der unterschiedlichen Werkstoffe, die Haltbarkeit bzw. Lebensdauer, die Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit erschweren die Auswahl geeigneter Fügeverfahren.

Vorteile dieser Bauweise sind die diversen Möglichkeiten, ein Gewichtsoptimum durch die Variation der Parameter zu finden. Allerdings stellt diese Parametervielfalt die Entwicklung vor erhebliche Herausforderungen. Neben der Simulation der Eigenschaften, der Montage- und Fügeprozesse sind Korrosions- und Recyclingaspekte nur einige Themen, die das Multi-Material-Design nicht vereinfachen.

Ein Beispiel ist der Audi TT mit der Anwendung diverser Werkstoffe in der Fahrzeugkarosserie, wie Aluminium und Stahl, und der Kombination unterschiedlicher Herstellverfahren für die Bauteile, z.B. Gieß- und Umformprozesse (Abb. 3.19). Durch Multi-Material-Design ergibt sich dabei ein Gewichtsvorteil von 48 % im Vergleich zur Stahl-Referenz und im Vergleich zur Bauweise aus Voll-Aluminium ein weiteres Leichtbaupotenzial von 12 % (Firmenschrift Audi AG 2006).

➤ Karosseriegewicht

➤ 206 kg

➤ Aluminium 69%

■ Bleche 63 kg

■ Gussteile 45 kg

■ Profile 32 kg

➤ Stahl 31%

■ Bleche 66 kg



Abb. 3.19: Audi TT in Multi-Material-Design (Quelle: Audi 2006)

Materialien

- Aluminiumblech
- Aluminiumguss
- Aluminiumstrangpressprofil
- Stahl
- Warm umgeformter Stahl
- Magnesiumblech
- Magnesiumguss
- Glasfaserthermoplast

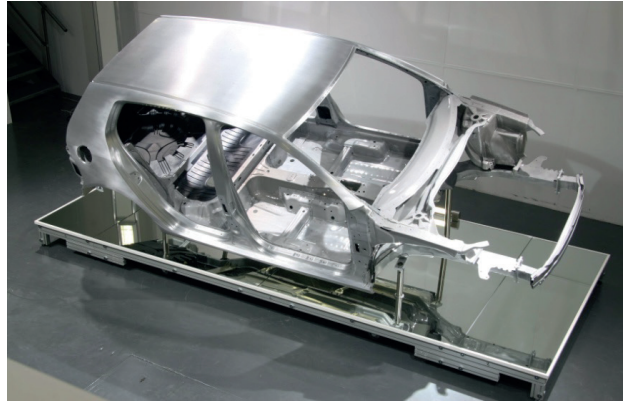
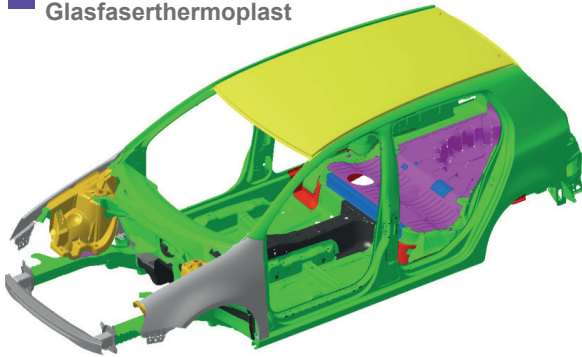


Abb. 3.20: Super Light Car-Karosserie in Multi-Material-Design, links CAD Model, rechts dargestellter Demonstrator

Ein weiteres Beispiel ist der „Super Light Car“ aus dem gleichnamigen europäischen Forschungsprojekt (Abb. 3.20). In diesem Projekt wurde eine Multi-Material-Design Karosserie mit einer Gewichtsreduzierung von insgesamt 35% im Vergleich zu einer konventionellen Stahl-Karosserie einwickelt und prototypisch dargestellt.

3.5 Fazit

Die Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz bewegter Massen spielt im Hinblick auf nachhaltige Strategien zur CO₂-Reduzierung eine wichtige Rolle. Durch Anwendungen geeigneter Leichtbaustrategien und durch neue kostenattraktive Bauweisen wie z. B. die Multi-Material-Design-Bauweise, können erhebliche Gewichtseinsparungen erzielt werden. Dies zeigt auch die Herausforderungen an die Füge-technologie und die Notwendigkeit, die einzelnen Leichtbaustrategien während des Entwicklungsprozesses von Leichtbaustrukturen verknüpft zu betrachten.

Zukünftige Leichtbauprodukte werden daher verstärkt auf werkstoffflexible, modulare Bauweisenkonzepte mit unterschiedlichen Leichtbaustrategien verfolgt.

3.6 Weiterführende Informationen

Literatur

- Braess, H.-H., Seiffert, U.:* Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 3. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003
- Förderreuther, A.:* Reduction of Greenhouse Gases by Aluminium-Intensive Lightweight Design. International Circle of Experts on Car Body Engineering 2008. Bad Nauheim, 26./27. Februar 2008
- Friedrich, H. E., Goede, M. F., Krusche, T.:* Bauweisen für neue Fahrzeugkonzepte im Spannungsfeld von Leichtbau und Kostenattraktivität. Tag der Karosserie, Aachen, 6. Oktober 2003
- Friedrich, H. E., Hülsebusch, D.:* Elektro-Fahrzeugkonzepte und Leichtbau: Anforderungen für neue Werkstoffe? 1. Internationaler eCarTec Kongress für individuelle Elektromobilität, München, 13./14. Oktober 2009
- Friedrich, H. E., Kopp, G.:* Trends, Bauweisen-Konzepte für neue Entwicklungen im Fahrzeugbau. FAT-Forum „CO₂-Reduzierung durch Leichtbau“. VDA, Frankfurt, Dezember 2008

- Furrer, P.*: Karosseriebau mit Aluminiumblech – Neue Lösungen für den kosteneffizienten Leichtbau. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 8.–10. Oktober 2007
- Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L.*: Leichtbaupotenzial durch Mischbauweise im Karosseriebau. International Circle of Experts on Car Body Engineering 2008. Bad Nauheim, 26./27. Februar 2008
- Haldenwanger, H. G.*: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von Pkw-Karosserien. TU Dresden, 1997
- Henning, J.*: Modulare Karosseriekonzepte. 2. Braunschweiger Symposium, Braunschweig, 25. Januar 2005
- Klüting, M., Landerl, C.*: Der neue Sechszylinder-Ottomotor von BMW. Teil I: Konzept und konstruktiver Aufbau. In: MTZ, 65, 2004, S. 868–880
- Kopp, G., Friedrich, H. E., Kuppinger, J., Henning, F.*: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau. In: ATZ, 04/2009, S. 298ff
- Nassauer, J.*: Globaler Automobilmarkt. Munich Network Forum Automobil und Innovation – Internationale Märkte, technische Entwicklungen. München, 28. November 2007
- Neff, T., Junge, M., Köber, F., Viert, W., Hertel, G.*: Bewertung modularer Fahrzeugkonzepte im Spannungsfeld zwischen Kundenorientierung und Standardisierung. In: Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert Automobiltechnik. VDI-Berichte Nr. 1653. VDI Verlag, Düsseldorf, 2001, S. 373–379
- Röcker, O.*: Untersuchungen zur Anwendung hoch- und höchstfester Stähle für walzprofilierte Fahrzeugstrukturkomponenten. Dissertation, Technische Universität Berlin, 31. Januar 2008
- Schauerte, O., Metzner, D., Krafzig, R., Bennewitz, K., Kleemann, A.*: Fahrzeugfedern federleicht : Erster Serieneinsatz einer Achsschraubenfeder aus Titan. In: ATZ, 103, 2001, S. 654–660
- Schindler, V., Sievers, I.*: Forschung für das Auto von morgen. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008
- Spickenheuer, A., Uhlig, K., Gliesche, K., Heinrich, G., Albers, A., Majic, N.*: Steifigkeitsoptimierung von Faserverbundbauteilen für den extremen Leichtbau. 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 2009
- Winzen, U.*: Neue Trends in der Automobilindustrie. In: Die Wirtschaft, Ausg. 7/8, 2002
- Vorschrift**
Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Ein wettbewerbsfähiges Kfz-Regelungssystem für das 21. Jahrhundert. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, Stellungnahme zum Schlussbericht der hochrangigen Gruppe CARS 21. Brüssel, 7. Februar 2007
- Firmenschrift**
Audi AG: Automobil Industrie. Sonderheft Audi TT, 2006

4 Virtuelle Produktentwicklung

Albert Albers, Neven Majić, Andreas Schmid, Manuel Serf

4.1	Computergestützte Konstruktion – Computer Aided Design (CAD)	77	4.3.1.1	Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers	89
			4.3.1.2	Topologieoptimierung eines Felgensterns	91
4.2	Computergestützte Entwicklung (CAE) – Computer Aided Engineering	79	4.3.2	Formoptimierung	94
4.2.1	Produktsimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM)	79	4.3.2.1	CAD-basierte Formoptimierung	95
4.2.2	Entwicklung der FEM	80	4.3.2.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung	96
4.2.3	Anwendungsbereiche der FEM	81	4.3.2.3	Beispiel zur Netz-basierten Formoptimierung	97
4.2.4	Verfügbare FEM-Programme	81	4.3.2.4	Formoptimierung mit Sicken	102
4.2.5	Ablauf einer FEM-Analyse	82	4.3.3	Parameteroptimierung	107
4.2.6	Literatur zu Berechnungsprogrammen und zu FEM	86	4.4	Fazit	110
4.3	Strukturoptimierung	86	4.5	Weiterführende Informationen	111
4.3.1	Topologieoptimierung	87			

Die virtuelle Produktentwicklung hat sich in den letzten Jahrzehnten parallel zur rasanten Entwicklung immer leistungsfähigerer Computer zunehmend weiterentwickelt und bestimmt den heutigen Produktentstehungsprozess und insbesondere die methodische Entwicklung innovativer Leichtbauprodukte. Ihr Potenzial zur Kosten- und Zeitersparnis ist der Schlüssel zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Noch bevor ein Produkt tatsächlich gefertigt wird, ist es weitgehend möglich, den gesamten Produktentstehungsprozess vom Herstellungsverfahren bis zum fertigen Bauteil durch rechnergestützte Anwendungen zu simulieren und frühzeitig zu validieren. Die Zeitspanne von der Produktidee bis zum fertigen Produkt kann sich dadurch erheblich verkürzen.

Neben der schon seit Jahrzehnten eingesetzten CAD/CAE-Technik kommen zunehmend Techniken zum Einsatz, die einen intuitiveren Umgang mit dem virtuellen Produkt ermöglichen. Dazu zählen Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR). Während es bei VR lediglich darauf ankommt, die Wirklichkeit und ihre physikalischen Eigenschaften möglichst in Echtzeit in einer interaktiven virtuellen Umgebung darzustellen, wie dies z. B. bei Computerspielen der Fall ist, geht man bei AR noch einen Schritt weiter. Bei AR werden die virtuelle und die reale Welt vor dem Auge des Betrachters überlagert. Um dem Nutzer ein möglichst realistisches Abbild zu präsentieren, werden bei VR und AR auch Datenbrillen verwendet. Datenhandschuhe und Bewegungstracking ermöglichen mitunter eine direkte Manipulation der virtuellen Umgebung.

Neben den Anstrengungen zur verbesserten Interaktion und Visualisierung liegt aber das Hauptaugenmerk der virtuellen PE auf der Realisierung eines durchgängigen Datenflusses. Das beste CAD-Modell nützt nichts, wenn es nicht für eine FEM-Analyse genutzt werden kann oder wenn die Daten nicht in die Fertigung übernommen werden können. Das eigentliche Ziel ist daher die durchgängige digitale Unterstützung des Produktentstehungsprozesses. Alle virtuellen und digitalen Werkzeuge sind darauf ausgerichtet, die Planung, Produktentwicklung und Produktion gleichermaßen zu unterstützen. In Forschung und Lehre unterscheidet man z.T. zwischen digitalen Werkzeugen für die kollaborative Produktentstehung und der Virtualisierung und Automatisierung des ganzen Prozesses. Zu ersterem gehören alle CAD/CAE-Techniken, wie sie in diesem Beitrag beschrieben werden. Die Virtualisierung und Automatisierung gipfeln in der Erzeugung des so genannten Digital Twin bzw. des Cyber Physical Production Systems, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird, da sie nicht Leichtbau-spezifisch sind.

4.1 Computergestützte Konstruktion – Computer Aided Design (CAD)

Während früher 2D-Konstruktionen am Zeichenbrett von Konstrukteuren erstellt wurden, gehört die virtuelle Konstruktion von 3D-Bauteilen am Computer zum heutigen Standard. Dieser computergestützte Entwurf (engl. Computer Aided Design, CAD) stellt somit eine Art „elektronisches Zeichenbrett“ dar. Mit der Nutzung von CAD-Systemen haben sich nicht nur die Arbeitsbedingungen, sondern auch der Arbeitsablauf des Konstrukteurs verändert, wobei auch an zukünftigen Werkzeugen für den „Konstrukteur von morgen“ zur Erhöhung der realen Virtualität gearbeitet wird (Abb. 4.1). Insbesondere die Nutzung von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR)-Technologien verspricht einen zukünftigen intuitiveren Einsatz von CAD sowie den Produktentwickler unterstützenden weiteren Systemen und Produkten. Durch die Entwicklung der letzten Jahre und durch den immer stärker werdenden Einsatz von hochleistungsfähigen Smartphones wurde eine Basis geschaffen, VR- und AR-Technologien im großen Maßstab einsetzen zu können. Durch die daraus resultierende gestiegene Nutzung von VR- und AR-Systemen stieg die Akzeptanz dieser Systeme und ein intuitiver Einsatz beispielsweise zur Interaktion des Konstrukteurs mit dreidimensionalen Modellen wurde ermöglicht.

Die Vision ist es, künftig den Computerbildschirm durch spezielle AR-Brillen zu ersetzen, sodass der Nutzer digitale Prototypen in 3D sehen und dadurch

vor allem intuitiver interagieren und bewerten kann. Durch den Einsatz von 3D-Projektionssystemen wird die gemeinsame Bearbeitung von Konstruktionsmodellen durch mehrere Bearbeiter im virtuellen Raum möglich. Bis der „Konstrukteur von morgen“ allerdings komplette virtuelle Welten erfahren kann, ist noch weiterer Entwicklungsaufwand notwendig.

Mit den modernen CAD-Systemen werden Produkte als räumliche Geometriedaten am Bildschirm virtuell erzeugt. Dabei werden sie in Form von Einzelteilen und Baugruppen als Volumenmodelle modelliert und zu einem virtuellen Gesamtprodukt zusammengesetzt, sodass 2D- oder 3D-Konstruktionszeichnungen abgeleitet werden können (Abb. 4.2). Diese Datenmodelle sind die Grundlage für die weitere Planung der Fertigung und für die Weiterentwicklung bis zur Serienreife.

Die Darstellung von 3D-Konstruktionsobjekten ist als Linien- oder Kantenmodell, Flächenmodell, Volumenmodell oder Hybridmodell möglich. 3D-Kanten- oder Drahtmodelle werden zur Ableitung von Schnitten aus einem Volumen- oder Flächenmodell zur Erzeugung von technischen Zeichnungen herangezogen. Für diese Darstellungsform sind die Raumkoordinaten von Eckpunkten sowie die zu verbindenden Linienelemente (Polygone) notwendig. Eine Erweiterung von Linien- oder Kantenmodellen durch ebene und gekrümmte Hüllflächen führt zu Flächenmodellen, die im Jahr 1983 eingeführt wurden und sich bis heute im Automobilbau durchgesetzt haben. Volumenelemente als 3D-Konstruktionsobjekte können seit Mitte der 1990er Jahre in die Konstruktions-

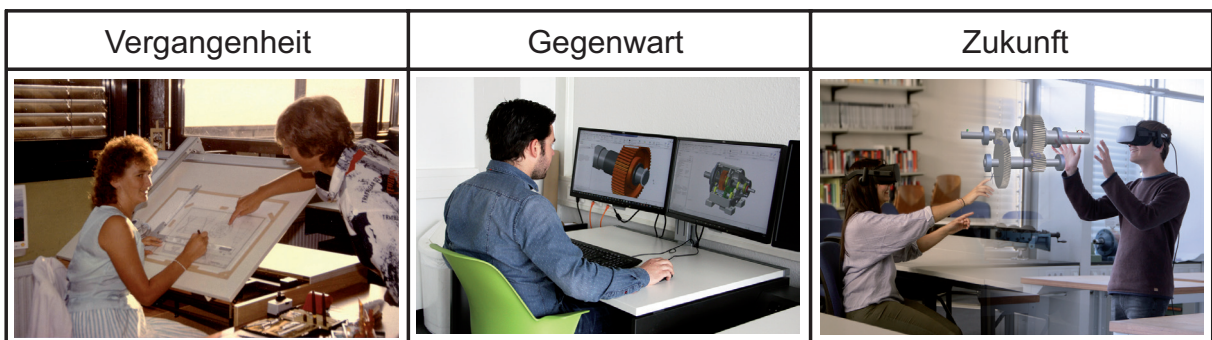


Abb. 4.1: Entwicklung der Arbeitsbedingungen eines Konstrukteurs

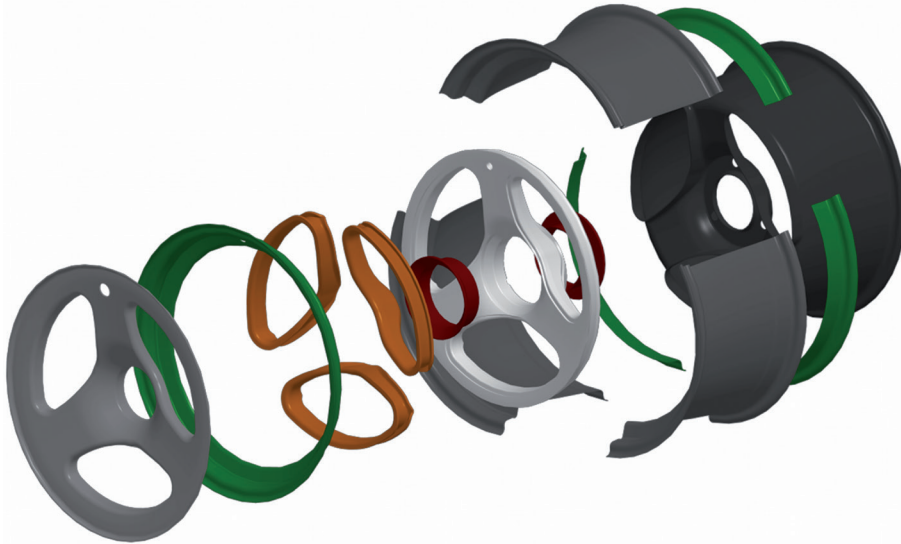


Abb. 4.2: Digitales CAD-Modell einer Felge in Explosionsdarstellung

arbeiten aufgenommen werden. Eine Weiterführung der Entwicklung resultiert in Hybridmodellen, eine Kombination aus Flächen- und Volumenmodell.

Ein weiteres Merkmal eines modernen 3D-CAD-Systems ist der Aufbau parametrischer Modelle, bei denen Volumen, Körper, Flächen und Bedingungen assoziativ durch Parameter erzeugt werden können. Beispielsweise kann ein Rohr durch Veränderung seines Außendurchmessers mit beliebigen Wandstärken konstruiert werden. Mit Hilfe dieser parametrisch assoziativen Modellkonstruktion lassen sich sehr schnell Konstruktionsänderungen durchführen.

Moderne 3D-CAD-Systeme unterstützen diese Modellierungsverfahren mit unterschiedlichen Funktionalitäten, mit deren Hilfe 3D-Modelle beliebiger Komplexität erzeugt werden können. Zu den gängigsten kommerziellen CAD-Softwarepaketen für 3D-Modelle zählen zurzeit:

- CREO der Fa. Parametric Technology Corporation (PTC)
- Catia der Fa. Dassault Systèmes
- SolidWorks der Fa. Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporation
- NX der Fa. Siemens PLM Software
- Solid Edge der Fa. Siemens PLM Software
- AutoCAD der Fa. Autodesk
- Autodesk Inventor sowie Fusion 360 der Fa. Autodesk.

Die meisten dieser Programme verwenden eigene Dateiformate, was den Datenaustausch zwischen verschiedenen CAD-Programmen teils erschwert. Es ist zwischen CAD-systemneutralen und CAD-systemspezifischen Datenformaten zu unterscheiden. Mit den CAD-systemneutralen Formaten gelingt in der Regel nur die Übertragung von Kanten-, Flächen- und Volumenmodellen. Die Konstruktionshistorie geht in der Regel verloren, damit sind die übertragenen Daten für eine Weiterverarbeitung nur bedingt geeignet. Wesentliche CAD-systemneutrale Datenformate sind VDAFS, IGES, SAT, IFC und STEP. Als Datenaustauschformat hat sich das Drawing Interchange Format (DXF) von der Firma Autodesk als Standard für Zeichnungen weitgehend etabliert. Dieses Dateiformat findet seine Verwendung bei AutoCAD und vielen anderen CAD-Programmen.

Mit dem Vorhandensein von 3D-Modellen haben sich neue Methoden der virtuellen Untersuchung von Baugruppen etabliert, die als Digital Mock-Up (DMU) bezeichnet werden. Dieses DMU beinhaltet ein digitales Versuchsmodell des späteren Produktes, das in Baugruppen und Einzelteile untergliedert ist. Eine Vielzahl von Untersuchungen wie Ein- und Ausbauntersuchungen, Kollisionsprüfungen und Montierbarkeit lassen sich damit durchführen. Es hilft darüber hinaus bei der Abstimmung, Analyse und Konkretisierung von Entwicklungsergebnissen, was es zu einer Art von Entscheidungsplattform macht.

Standard in der Industrie ist heutzutage auch die Weiterverarbeitung der CAD-Modelle. Aus den CAD-Modellen können die Fertigungsdaten abgeleitet werden und damit automatisiert Programme für die Steuerung der Werkzeugmaschinen erstellt werden. Damit entfällt die manuelle, zeitaufwändige und meist fehlerträchtige CNC-Programmierung. Des Weiteren können die CAD-Modelle direkt durch generative Verfahren gefertigt werden. Diese Verfahren wurden in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und deren Einsatzmöglichkeiten wurden erweitert, sodass sie einen immer stärker werdenden Einsatz in Unternehmen finden.

Da es eine hohe Anzahl an Literatur zur Konstruktion und Entwicklung von Bauteilen am Markt gibt, werden im Weiteren nur einige Standardwerke genannt: Steinhilper und Sauer 2008, Conrad 2005, Hoenow und Meißner 2004, Klein 2009, Koller 1994, Kurz et al. 2004, Wiedemann 2007, Hoenow und Meißner 2009 oder Pahl et al. 2005.

4.2 Computergestützte Entwicklung (CAE) – Computer Aided Engineering

Um die Effizienz der virtuellen Produktentstehung zu steigern und damit den zunehmenden Trend nach Variantenvielfalt, kurzen Produktentstehungszyklen und geringen Fertigungsstückzahlen gerecht zu werden, hat sich die computergestützte Entwicklung bzw. computergestützte Berechnung (engl. Computer Aided Engineering, CAE) als Schlüsseltechnik durchgesetzt. Mit Hilfe der CAE werden Entwicklungsingenieure bei ihren täglichen technischen und wissenschaftlichen Aufgaben unterstützt, wobei im Sprachgebrauch der Begriff CAE dem Bereich Berechnung und Simulation zugeordnet wird. Besonders bei der Entwicklung von innovativen Leichtbau-Produkten wird das risikobehaftete Erfahrungswissen der Ingenieure um quantifizierbare Aussagen über verschiedene Berechnungsvarianten ergänzt oder eben ersetzt. Dabei ersetzt der Einsatz von CAE-Methoden die physischen Versuche mit Prototypen nicht voll-

ständig, aber das Zusammenspiel beider Methoden ermöglicht es, detailliertere und vor allem im Produktentwicklungsprozess früher verfügbare Erkenntnisse über das zu entwickelnde Produkt zu erlangen.

4.2.1 Produktsimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM)

Ein wesentliches Merkmal der rechnergestützten Entwicklung ist die Auslegung und Bewertung des Bauteil bzw. Systemverhaltens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM). Da nur in einfachen Fällen eine analytische Lösung berechnet werden kann, ist in den meisten Fällen ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) des zu lösenden Problems zu bilden, welches die Realität hinreichend genau abbildet, um eine Näherungslösung bestimmen zu können. Dadurch eröffnet die FEM als numerisches Näherungsverfahren eine neue Dimension in der Ingenieurswelt. Das breite Spektrum der Anwendungen und kostengünstigen Einsatzmöglichkeiten trägt dazu bei, dass sich diese Methode als Alternative oder zumindest als Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen etabliert hat. Dadurch lassen sich im Produktentstehungsprozess teure Prototypen und Versuchsaufbauten reduzieren oder sogar vermeiden, und der Weg zum fertigen Produkt wird kürzer. Um rasch auf sich ändernde Kundenanforderungen reagieren zu können, bietet die FEM die Möglichkeit einer schnellen Untersuchung und Bewertung von Produktideen, lange bevor ein Prototyp gebaut wird. Einige der wesentlichen Vorteile der FEM sind:

- Reduzierung von Prototypen
- Reduzierung der Entwicklungszeiten
- Senkung der Entwicklungs- und Produktionskosten
- Einsparung von Material
- Frühzeitiges Erkennen von potenziellen Schwachstellen
- Qualitätssteigerung des Produktes
- Kosten- und Gewichtsersparnis durch Optimierung des Produktes
- Flexible Anpassung an Kundenerfordernisse.

4.2.2 Entwicklung der FEM

Den Begriff Finite-Elemente-Methode prägte erstmals Clough im Jahr 1960, dessen Besonderheit die Zerlegung einer Struktur in endliche finite Elemente ist. Auf Basis von speziellen Funktionen (so genannten Ansatzfunktionen) für jedes finite Element lassen sich Gleichungssysteme aufstellen und zu einem Gesamtgleichungssystem zusammenfassen, welches durch so genannte Solver gelöst wird. Die FEM als numerische Berechnungsmethode wurde erstmals in den frühen 60er Jahren für Ingenieursaufgaben in der Luft- und Raumfahrtindustrie zur Strukturuntersuchung von Flugzeugflügeln eingesetzt. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methode hat dazu geführt, dass sie auch in der Fahrzeugindustrie ihre Anwendung und Akzeptanz gefunden hat. Mit der rasanten Entwicklung der Computertechnologie gewann die Methode immer mehr an Bedeutung und wurde nach und nach effizienter und ausgereifter. Kaum eine technische Entwicklung hat den Berechnungsprozess seit den 70er Jahren in der Praxis so revolutioniert wie die

Anwendung der FEM. Mittlerweile deckt sie ein weites Anwendungsspektrum ab. Der Umgang mit FEM erfordert allerdings ausgebildete Fachleute, die im heutigen Sprachgebrauch als Berechnungsingenieure bezeichnet werden. Berechnungsingenieure können mit ihren leistungsfähigen Rechnern und spezieller Software virtuelle Versuche beliebig oft wiederholen. Die Anwendung der FEM von Konstrukteuren dagegen scheiterte in den letzten Jahren allerdings aus Gründen der großen Unterschiede zwischen CAD- und FEM-Systemen. Mittlerweile werden in kommerziellen CAD-Systemen unterschiedliche FEM-Werkzeuge integriert, die bereits einen Berechnungsprozess während der Konstruktionsphase erlauben. Damit ist ein Verbindungselement, ein so genanntes CAD-FEM-System zwischen Konstruktion und Berechnung, gelungen. Hier sind beispielsweise CATIA, CREO, I-DEAS oder UNIGRAPHICS zu nennen. Konstrukteure und Designer können ohne detaillierten FEM-Hintergrund in den Berechnungsprozess eingebunden werden, wobei derzeit nur Berechnungen mit einer sehr geringen Komplexitätsstufe möglich sind.

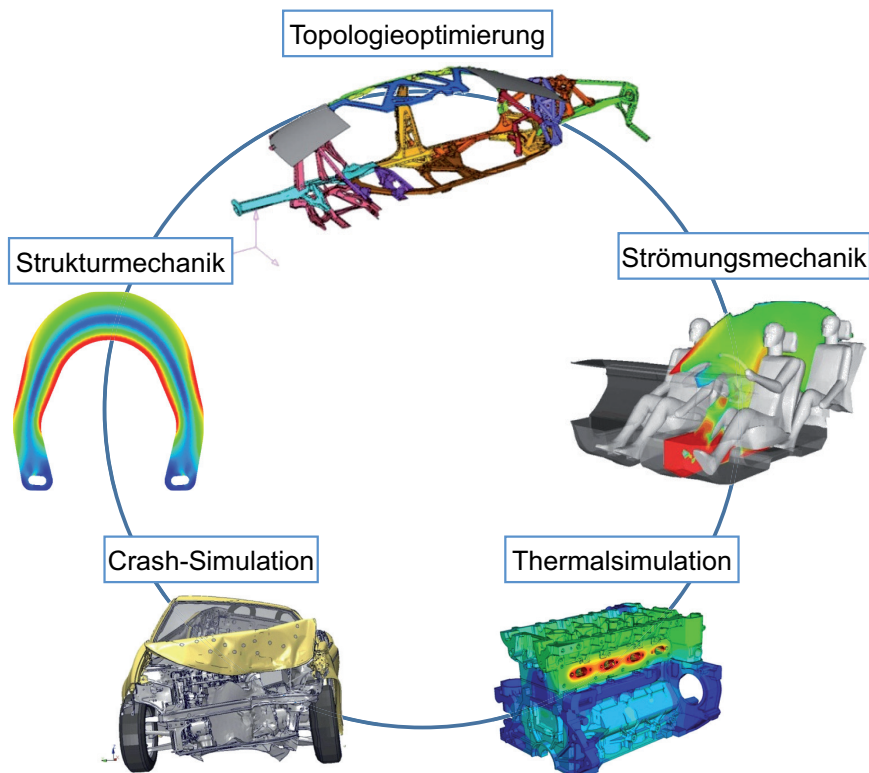


Abb. 4.3: Verschiedene Simulations- und Analysearten im Überblick (Quelle: TECOSIM GmbH)

4.2.3 Anwendungsbereiche der FEM

Tab. 4.1: Übersicht über unterschiedliche FEM-Analysen

Statische Analysen • lineare Verformungs- und Spannungsanalyse • nichtlineares Materialverhalten/geometrisches Verhalten
Stabilitätsanalyse • Beuluntersuchungen
Dynamische Analysen • Modalanalyse • Frequenzganganalyse • Antwortspektrum • Lebensdauer
Impakt-Analyse • Falltests • Crash • Explosion
Optimierung • Topologieoptimierung • Formoptimierung • Parameteroptimierung
Bruchmechanik • Rissentstehung • Rissfortschritt
Verbundwerkstoffe • lineare/nichtlineare Verformungs- und Spannungsanalyse • Untersuchung auf Faserbruch und Zwischenfaserbruch • Delaminationsuntersuchung
Thermische Berechnungen • Wärmeübertragung • stationäres und instationäres Verhalten
Strömungsberechnungen • stationär, instationär • laminar, turbulent • kompressibel, inkompressibel
Elektrische und magnetische Felder • Magnetfeldberechnung • Elektromagnetfeldberechnung
Akustische Berechnungen • Geräuschreduzierung • Schallverteilung

Die meisten der heutigen kommerziellen FEM-Softwarepakete ermöglichen die Durchführung einer linearen Verformungs- und Spannungsanalyse, wobei weitere Funktionalitäten für die Berechnung

unterschiedlicher statischer sowie dynamischer Problemstellungen zur Verfügung stehen. Die FEM wird überwiegend im Maschinenbau, Fahrzeugbau, der Luft- und Raumfahrt sowie dem Bauwesen eingesetzt, wobei sie zunehmend auch in der Biomechanik zur Untersuchung der Funktionen und Strukturen von Bewegungsapparaten im medizinischen Bereich herangezogen wird. Eine Übersicht der unterschiedlichen Analysearten kann Abbildung 4.3 und Tabelle 4.1 entnommen werden.

4.2.4 Verfügbare FEM-Programme

Mit der rasanten Entwicklung der Computertechnologie hat die Anzahl an kommerziellen Simulationswerkzeugen stetig zugenommen. Eines der ersten kommerziellen FEM-Programme wurde 1965

Tab. 4.2: Kommerzielle Simulations- und Optimierungsprogramme

SOFTWARE	
Name	Internet-Link
Strukturmechanik	
MSC.NASTRAN	www.mscsoftware.com
NX.Nastran	www.plm.automation.siemens.com
ABAQUS	www.3ds.com
ANSYS	www.ansys.com
PERMAS	www.intes.de
OptiStruct	www.altairhyperworks.de
Transiente Vorgänge	
PAM-CRASH	www.esi-group.com
LS-DYNA	www.dynamore.de
RADIOSS	www.altairhyperworks.de
ABAQUS	www.3ds.com
Strömungsmechanik	
ANSYS	www.ansys.com
STAR-CCM+	www.cd-adapco.com
Topologie- und Formoptimierung	
TOSCA	www.3ds.com
OptiStruct	www.altairhyperworks.de
Parameteroptimierung	
optiSLang	www.dynardo.de
LS-OPT	www.dynamore.de
OptiStruct	www.altairhyperworks.de
Optimus	www.cybernet.co.jp
Isight	www.3ds.com
modeFRONTIER	www.esteco.com
Mehrkörpersimulation	
SIMPACT	www.simpact.com
MSC.Adams	www.mscsoftware.com
MADYMO	www.madymo.com



I

bei der NASA entwickelt, das unter dem Namen NASTRAN (NASA Structural Analysis) bekannt ist und bis heute intensiv in der Praxis eingesetzt wird. Je nach Anwendungsbereich haben sich mittlerweile verschiedene FEM-Programme etabliert. Ein Auszug von FEM-Programmen kann Tabelle 4.2 entnommen werden.

Einige kommerzielle FEM-Programme bieten die Möglichkeit, verschiedene Solver einsetzen zu können. Damit ist es dem Anwender möglich, den Solver zu wählen, der für den gewünschten Anwendungsbereich am besten geeignet ist. So genannte universell einsetzbare FEM-Programme sind z.B. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, PAM-CRASH oder LS-DYNA, wobei die meisten Solver sich durch eine oder mehrere Kernkompetenzen auszeichnen.

4.2.5 Ablauf einer FEM-Analyse

Ein FEM-basierter Berechnungsprozess setzt sich aus mehreren Schritten zusammen, wobei die Schritte 3, 4 und 5 ein FEM-Programm benötigen:

1. Konstruktionsdaten
2. Idealisierung
3. Pre-Processing
4. Solver
5. Post-Processing.

Eine Veranschaulichung der einzelnen Schritte am Beispiel eines Fahrradbremskraftverstärkers zeigt Abbildung 4.4. Die Beschreibung des genauen Ablaufs ist nachfolgend wiedergegeben, wobei zusätzliche Checklisten den Anwender in der täglichen Praxis unterstützen sollen. Allerdings ist zu erwäh-

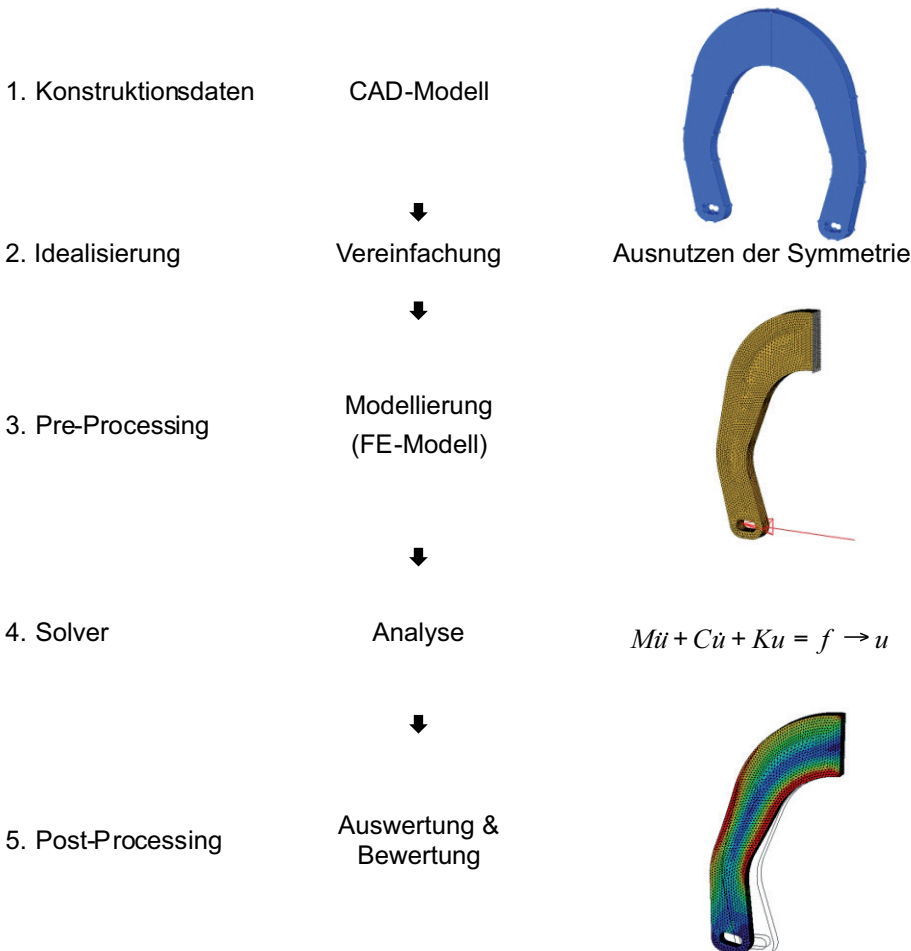


Abb. 4.4: Ablauf der FEM-Analyse am Beispiel eines Fahrradbremskraftverstärkers

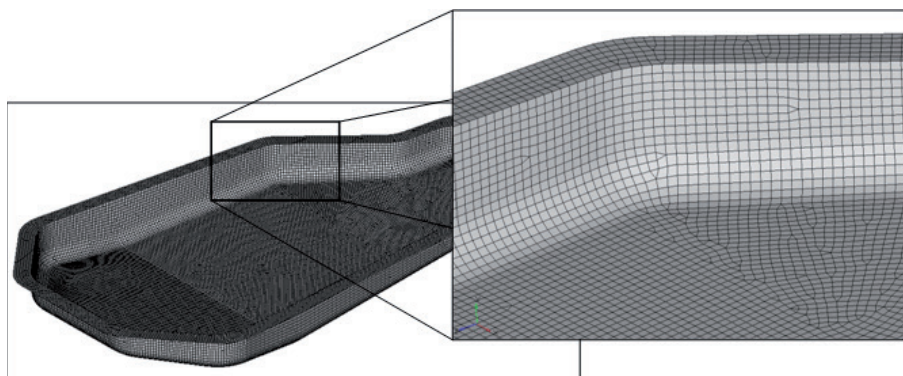


Abb. 4.5: Vernetzung einer Ölwanne mit 2D-Elementen

nen, dass die Checklisten keinesfalls als vollständig angesehen werden können, sondern lediglich als Orientierungshilfe heranzuziehen sind.

1. Konstruktionsdaten

In der Regel stehen Konstruktionsdaten für die Modellierung zur Verfügung. Die meisten Pre-Processing-Programme beinhalten Schnittstellen zu kompatiblen CAD-Formaten. So können gängige CAD-Formate, wie z. B. IGES, STEP oder VDA, eingelesen werden. Sofern bei der frühen Konzeptphase keine CAD-Daten existieren, können vereinfachte CAD-Modelle auch in den Pre-Processing-Programmen erstellt werden.

2. Idealisierung

Um sowohl das Pre-Processing als auch die Analysedauer gering zu halten, ist es notwendig, die Problemstellung zu vereinfachen. Außerdem ist die Modellierung der gesamten realen Bauteileigenschaften nahezu unmöglich und in der Regel auch nicht notwendig. Sie hängt sehr stark davon ab, welches Berechnungsziel der Anwender erreichen möchte. So ist z. B. bei der Untersuchung des Strukturverhaltens bei einer Crash-Berechnung eines Fahrzeugs die Modellierung von Verkleidungselementen, wie z. B. eines Kotflügels, nicht unbedingt notwendig.

Eine sehr wichtige Fragestellung ist, mit welcher Dimension (1D/2D/3D) sich das Problem ausreichend genau untersuchen lässt. Weitere Modellierungseinfachungen umfassen das Ausnutzen der Symme-

trie (System und Belastung sind symmetrisch) und Antimetrie (System ist symmetrisch bei unsymmetrischer Belastung) sowie die Vernachlässigung von Einzelheiten, die für die Analyse nicht relevant sind.

Checkliste der Idealisierung

- Modellierungsdimension (1D, 2D oder 3D)
- Vernachlässigung irrelevanter Einzelheiten
- Vereinfachung der Anbindungen
- Elementtyp (linear, quadratisch, ...)
- Materialtyp (elastisch/elasto-plastisch, ...)
- Starre oder elastische Lagerung
- Ausnutzung von Symmetrie und Antimetrie.

3. Pre-Processing

Während früher für eine FEM-Analyse der Berechnungsingenieur auf Basis von Konstruktionszeichnungen ein FE-Modell erstellen musste, erfolgt heute die Übertragung von CAD-Daten an das Pre-Processing durch weitgehend standardisierte Austauschformate. Bei diesem Pre-Processing wird unter Berücksichtigung von Idealisierungsüberlegungen ein realitätsnahes Rechenmodell erstellt. Im Vordergrund steht dabei die Zerlegung des Bauteils in finite Elemente. Dieser Schritt ist im Sprachgebrauch als Diskretisierung oder Vernetzung bekannt (Abb. 4.5). Eine manuelle Vernetzung ist zwar möglich, jedoch bei vielen Problemstellungen nicht praktikabel. Deshalb wird häufig mit Angabe einer gewählten Elementgröße eine automatische Diskretisierung durchgeführt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Elemente die Geometriekontur möglichst

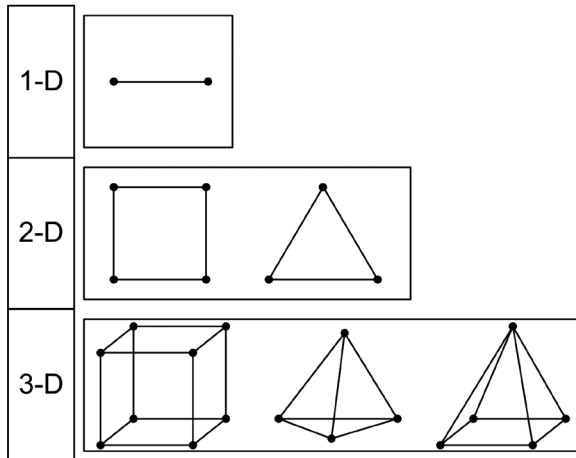


Abb. 4.6: Übersicht über Elementtypen zur Vernetzung von CAD-Modellen

genau abbilden und dass sie in relevanten Bereichen eine hinreichend kleine Elementgröße aufweisen. Unterschiedliche Elementtypen sind in der Abbildung 4.6 dargestellt. Je nach gewähltem Elementtyp können unterschiedliche Ergebnisgenauigkeiten erreicht werden.

Die in Abbildung 4.6 dargestellten Elementtypen basieren auf einer linearen Ansatzfunktion, d. h. die Verschiebungen in den Eckpunkten der Elemente werden zuerst berechnet, und die Verschiebungen zwischen diesen Eckpunkten werden anschließend linear approximiert. In Bereichen mit hohen Spannungsänderungen oder Verformungen, wie z. B. im Kerbbereich, sollte aus Genauigkeitsgründen feiner vernetzt oder ein Elementtyp höherer Ordnung gewählt werden. Höhere Ordnung bedeutet z. B. ein Element mit quadratischen Ansatzfunktionen, die allerdings neben der Verschiebungsberechnung in den Eckpunkten auch die Ermittlung der Verschiebungen in der Mitte der Elementkanten erfordert. Dadurch kann zwischen den berechneten Verschiebungswerten an den Eckpunkten ein quadratischer Verschiebungsverlauf ermittelt werden, der eine höhere Genauigkeit liefert. Diese höhere Genauigkeit geht jedoch zu Lasten der Berechnungszeit.

Den finiten Elementen können neben dem Elementtyp weitere Eigenschaften zugewiesen werden, wie z. B. Wandstärke und Materialtyp. Voraussetzung für die Analyse mit einem FEM-Solver ist ein zu definieren-

der Lastfall, der Last- und Randbedingungen berücksichtigt. Hierfür können z. B. einerseits Kräfte oder Drücke und andererseits Lagerungen oder Zwangsverschiebungen aufgebracht werden. Die Checkliste für Pre-Processing gibt einen Überblick über die durchzuführenden Schritte, wobei die Aufzählung keinesfalls als vollständig angesehen werden kann, sondern lediglich als Orientierungshilfe dient.

Checkliste Pre-Processing

- CAD-Daten einlesen
- CAD-Daten aufbereiten
- CAD-Vereinfachung (Symmetrie, Radien, Absatzhöhe, ...)
 - Abstraktion (2D oder 3D, Vernachlässigung irrelevanter Details)
 - Erzeugen einer Mittelfläche
- Vernetzen der CAD-Daten
 - Manuelle oder automatische Vernetzung
 - Keine große Abweichung zur Geometriekontur
 - Netzkriterien und -qualität beachten
- Zuweisung der Elementdaten (Elementtyp, Wandstärke,...)
- Materialzuweisung
- Anbindungen (Verschraubung, Klebung, Schweißpunkte, ...)
- Kontaktdefinition (Crash, große Verformungen, ...)
- Definition des Reibmodells
- Ergebnisumfang für das Post-Processing anfordern
- Last- und Randbedingungen
 - Lagerung
 - Loslager
 - Festlager
 - Einspannung
- Art der Belastung
 - Statisch
 - Dynamisch
 - Stochastisch
 - Stationär
 - Instationär
- Typ der Belastung
 - Zwangsverschiebungen
 - Kräfte, Momente, Drücke
 - Temperaturen

- Eigenspannungen/Vorspannungen
- Eigengewicht
- Lastfälle
 - Einzelner Lastfall
 - Kombination von Lastfällen
- Solveroptionen einstellen (Statik, Eigenfrequenzanalyse, ...)
- Überprüfung des Berechnungsmodells

4. Solver (Löser)

Das beim Pre-Processing erstellte FE-Modell stellt den Input für eine Analyse mit einem Solver dar. Manche Pre-Processing-Programme erlauben den Analysestart innerhalb der Pre-Processing Bedienoberfläche, da eine Kopplung zum Solver besteht. Im Gegensatz hierzu lassen sich in der Regel die Berechnungen auch mit einzugebenden Befehlen in der Konsole des Betriebssystems starten. Es ist über die Bedienungsanleitung zur Softwareinstallation zu erfahren, ob diese eingesetzte Software auf allen Betriebssystemen (Unix, Windows, Linux) sowie unter 32bit und 64bit lauffähig ist, um die gesamte Leistungsfähigkeit des Solvers als Anwender nutzen zu können. Eine voll parallelisierte Software kann z.B. Berechnungen auf mehrere Prozessoren verteilen, sodass sich die Berechnungszeiten deutlich verkürzen können. Auch erfahrenen Berechnungsingenieuren fällt es nicht immer leicht, die automatisch generierten Fehlerprotokolle der Solver zu interpretieren und darauf basierend eine Korrektur des FE-Modells vorzunehmen. Deshalb stellen die meisten Pre-Processing-Programme Funktionalitäten zur Verfügung, die die Kontrolle der FE-Modelle ermöglichen. Der Prozess zur Erstellung eines lauffähigen Berechnungsmodells ist deshalb in den meisten Fällen ein iterativer Prozess. Erst wenn eine erfolgreiche Berechnung durchgeführt ist und Ergebnisdateien vorliegen, kann die Auswertung im Rahmen des Post-Processing stattfinden.

5. Post-Processing

Der letzte Schritt des FEM-Ablaufs beinhaltet die Ergebnisvisualisierung und deren Interpretation.

Voraussetzung für die Auswertung sind die nach der Berechnung angelegten Ergebnisdateien, sodass z.B. Kräfte, Spannungen oder Verformungen auswertbar sind. Es ist jedoch zu beachten, dass der Ergebnisumfang nur im Rahmen des Pre-Processing angefordert werden kann. D.h. wenn sich bestimmte Ergebnisgrößen nicht auswerten lassen, ist eine erneute Simulation in vollem Umfang notwendig. Insbesondere bei umfangreichen Berechnungen kann daher eine längere Wartezeit von mehreren Stunden anfallen. Es existieren so genannte Stand-Alone-Post-Processing-Programme, die ausschließlich für die Visualisierung der Ergebnisse herangezogen werden. Daneben existieren integrierte Pre-/Post-Processing-Umgebungen, die beide Aspekte abdecken. Im Zuge des Auswertungsprozesses sind sowohl die Kurvenverläufe, wie z.B. Kraft-Verschiebungs-Kurven als auch Animationen möglich. Besonders bei Crash-Berechnungen von Strukturen ist die Animation zum Verständnis des Strukturverhaltens von wesentlicher Bedeutung. Einzelne Komponenten, wie z.B. die Motorhaube oder Motoreinheit, können ausgeblendet werden, um die Verformung der Längsträgerstruktur zu bewerten.

Die Qualität der Ergebnisinterpretation hängt neben der Qualität des FE-Modells auch von der Erfahrung des Anwenders ab. Aufgrund der Komplexität des Berechnungsablaufs können sich in jedem Schritt des Berechnungsablaufs viele Fehler einschleichen, die ohne ein qualifiziertes Wissen kaum entdeckt werden können. Um daher eine fachliche Bewertung und Prüfung der Plausibilität von Berechnungsergebnissen erfolgreich durchführen zu können, sollte der Anwender grundlegende Kenntnisse in der technischen Mechanik sowie ein mathematisches Grundverständnis haben.

Checkliste Post-Processing

- Plausibilitätskontrollen
 - Handrechnungen
 - Verformungszustand
 - Vergleich mit vereinfachten FE-Modellen
 - Energieerhaltung bei dynamischen Analysen
- Kontrolle des statischen Gleichgewichts
- Vergleich mit den realen Versuchsergebnissen

I Bei dem beschriebenen Berechnungsablauf handelt es sich um einen iterativen Prozess, der durch ständige Änderungen und Anpassungen geprägt ist. Der dafür notwendige Zeit- und Arbeitsaufwand ist schwer zu kalkulieren und kann in der Regel nur von erfahrenen FEM-Anwendern im Umgang mit Simulationsprogrammen abgeschätzt werden. Es hat sich gezeigt, dass ca. 65–75 % des Arbeitsaufwands für die Erstellung des FE-Modells, ca. 5–10 % für die Fehlerbeseitigung und ca. 20–25 % für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse benötigt werden.

4.2.6 Literatur zu Berechnungsprogrammen und zu FEM

Es gibt leider so gut wie keine Bücher über kommerzielle Pre-/Post-Processing-Programme. Dafür bieten viele Programme so genannte „Tutorials“ an, mit denen grundlegende Funktionalitäten in der Bedienung, Analyse und Auswertung kennengelernt werden können. Eine weitere Möglichkeit ist der Besuch von Kursen, bei denen in der Regel auch Schulungsunterlagen zur Verfügung gestellt werden. Für die FEM gibt es aufgrund des großen Anwendungsspektrums eine Fülle an Büchern. Viele davon geben eine mathematisch orientierte Einführung sowie Anwendungsbeispiele an. Eine vollständig detaillierte Anleitung zur FE-Analyse, die alle Anwendungsgebiete umfasst, ist derzeit als Handbuch nicht zu finden. Dennoch werden im Folgenden ausgewählte Standardwerke empfohlen, die die Grundlagen und die Anwendung der FEM beschreiben: Fröhlich 1995, Steinbuch 1998, Müller et al. 1999, Link 2002, Bathe 2002, Klein 2007, Steinke 2007, Knothe et al. 2008, Klein 2015.

4.3 Strukturoptimierung

Die Strukturoptimierung unterstützt die stetige Konkretisierung des Produktes im Verlauf des Produktentstehungsprozesses. Ihr Ziel besteht darin,

mechanisch oder thermisch belastete Bauteile in ihrer Gestalt so zu verändern, dass diese den Anforderungen und Bedingungen, die zum Teil stetigen Veränderungen unterliegen, möglichst gut gerecht werden können. Die Ziele werden mit einer so genannten *Zielfunktion* formuliert, die mit Hilfe bestimmter Optimierungsalgorithmen minimiert bzw. maximiert wird. Die vom Optimierer veränderbaren Größen in der Zielfunktion werden in der Regel als *Designvariable* bezeichnet. Damit können Leitstützstrukturen und Wirkflächen einer Gesamtstruktur gezielt verändert werden. Je nach Art dieser Designvariablen können verschiedene Disziplinen der Strukturoptimierung unterschieden werden (Abb. 4.7). Dies verdeutlicht die Unterschiede zwischen Topologieoptimierung (engl. topology optimization), Formoptimierung (engl. shape optimization) und Parameteroptimierung (engl. parameter optimization). Trotz der Tatsache, dass sich diese Optimierungsmethoden strikt voneinander abgrenzen, ist eine Anwendung aller Methoden notwendig, um das höchste Leichtbaupotenzial zu erzielen.

Die einzelnen Disziplinen zeichnen sich durch folgende Merkmale aus, wobei die Annahme bestimmter Lastbedingungen jeweils vorausgesetzt wird:

- Bei der Topologieoptimierung wird eine Materialverteilung in einem gegebenen Bauraum ermittelt. Die Designvariablen sind hierbei die Dichte- bzw. E-Modul-Verteilung im Designraum.
- Bei der Formoptimierung wird die Oberflächenkontur eines gegebenen Bauteils variiert.
- Bei der Parameteroptimierung werden z.B. Wandstärken, Faserlagen oder Faserrichtungen variiert.

Die Topologieoptimierung bietet im Vergleich zu den anderen Optimierungsmethoden das höchste Potenzial, um Gewicht bei einem Bauteil einzusparen.

In der Praxis kommen folgende Zielfunktionen häufig zur Anwendung:

- Masse → Minimierung
- Steifigkeit → Maximierung
- Spannung → Minimierung
- Verformung → Minimierung
- Eigenfrequenzen → Maximierung



Die allgemeine Definition eines Optimierungsproblems lautet:

„Minimiere (oder maximiere) eine Zielfunktion (engl. objective function) unter Einhaltung vorgegebener Randbedingungen (engl. constraints)“.

Zur Umsetzung der Optimierungsverfahren ist eine mathematische Formulierung notwendig. Dies kann wie folgt ausgedrückt werden:

- Minimiere: $F(X)$ Zielfunktion, (z.B. Nachgiebigkeit eines Bauteils)
- $g_j(X) \leq 0 \quad j = 1 \dots m$ Ungleichheitsnebenbedingung (z.B. Gesamtmasse darf nicht überschritten werden)
- $h_k(X) = 0 \quad k = 1 \dots l$ Gleichheitsnebenbedingung (z.B. Grundgleichung der FEM: $F=Ku$)
- $X_i^l \leq X_i \leq X_i^u \quad i = 1 \dots n$ Schranken (z.B. Volumen darf nicht höher als 70% des Ausgangsvolumens werden)

Die so genannten Designvariablen bilden zusammen einen Vektor:

$$X = [X_1 \dots X_n]^T$$

Diese Variablen stellen die Parameter dar, die im Verlauf einer Optimierung verändert werden können. Sie bestimmen also die Eigenschaften und das Verhalten des zu optimierenden Modells.

4.3.1 Topologieoptimierung

Das Bauteildesign spielt für den Leichtbau eine sehr große Rolle. Daher wird die Topologieoptimierung in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses eingesetzt, um kraftflussgerechte Designvorschläge für den Konstruktionsprozess neuer Leichtbaustrukturen zu ermitteln. Diese Designvorschläge unterscheiden sich dabei teilweise deutlich von Konstruktionsentwürfen, die mit einem klassischen ingenieurmäßigen „Trial and Error“-Vorgehen

	Topologie-optimierung	Form-optimierung	Parameter-optimierung
Vorgegeben	Designraum, Lastfall, Lagerung	Designentwurf	Designentwurf
Variation	Materialverteilung	Bauteil-oberflächennetz	Z. B. Wandstärke oder Faserorientierung

Abb. 4.7: Teildisziplinen der Strukturoptimierung am Beispiel eines Felgensterns

erarbeitet werden. Die theoretischen Grundlagen der Topologieoptimierung sind bereits sehr gut beschrieben, und schon heutzutage finden diese Verfahren eine weite Verbreitung im industriellen Konstruktionsprozess. Die Voraussetzung für einen Topologieoptimierungsprozess ist ein vom Konstrukteur definierter Bauraum. Auf Basis dieses Bauraums, der in einen Designraum und einen Non-Design-Raum unterteilt werden kann, sowie der dazugehörigen Belastungen, Randbedingungen und Materialeigenschaften kann ein FE-Modell erstellt werden. Die Änderung der virtuellen Masse im Designraum erfolgt durch eine Steifigkeitsänderung der finiten Elemente, bis die vom Anwender

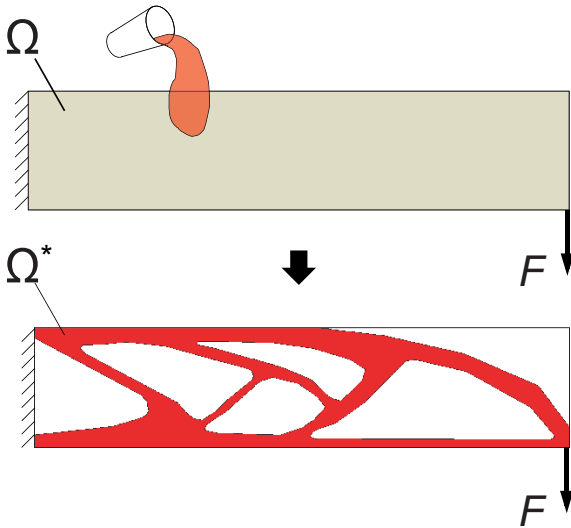


Abb. 4.8: Prinzip der Materialverteilung als Ziel der Topologieoptimierung am Beispiel eines einseitig eingespannten Balkens

geforderte Gewichtsreduktion erreicht ist. Die Designvariablen sind hierbei normierte Dichten, die zwischen den Werten 0 und 1 variieren. Aufgrund von Zwischenwerten ist in der Regel eine reine 0-1-Verteilung nicht vorhanden. Eine hohe normierte Dichte entspricht einer Materialbelegung. Die Abbildung 4.8 zeigt das Ergebnis einer Topologieoptimierung anhand eines einseitig eingespannten Balkens unter Last, bei dem aus einem vorgegebenen Bauraum Ω ein Designvorschlag Ω^* ermittelt wird. Der Initialisierungsschritt umfasst die Erstellung eines lauffähigen FE-Modells, mit dem eine Analy-

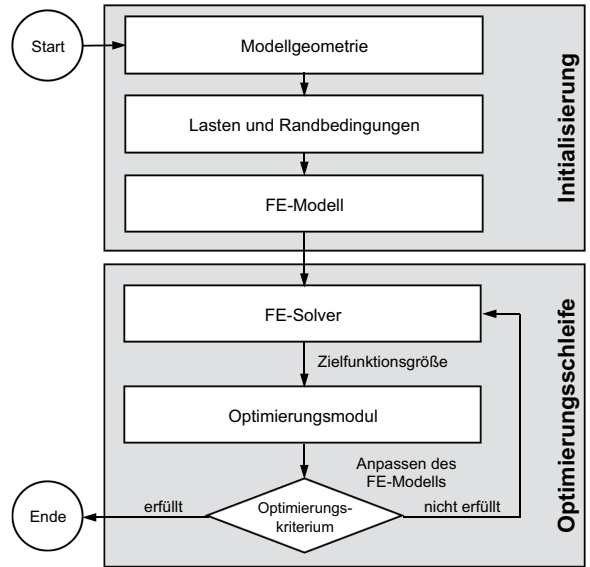


Abb. 4.9: Prinzipieller Ablauf der Topologieoptimierung

se (FE-Solver) entweder statisch, dynamisch oder nicht-linear durchgeführt werden kann. Der eigentliche Optimierungsprozess beschränkt sich auf den iterativen Prozess zwischen FE-Solver und dem Optimierungsmodul. Ausgehend von einer durch den FE-Solver für den Designraum berechneten Antwortgröße, wie etwa der Dehnungsenergie als Maß für die Nachgiebigkeit, wird das FE-Modell durch das Optimierungsmodul modifiziert. Je nach Optimierungsaufgabe können für die Modifikation unterschiedliche Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden (Abb. 4.9).

Fertigungsrestriktionen

Im Sinne einer effizienten Produktentwicklung sind fertigungsbedingte Randbedingungen, die als Restriktion in die Strukturoptimierung eingehen, für den Erfolg der Optimierungsmethoden in der Praxis von großer Bedeutung. Einige dieser Restriktionen sind bereits in kommerziellen Softwaretools implementiert (Abb. 4.10). Hierzu zählen zum Beispiel:

- Entformbarkeit
- Minimal / Maximal zulässige Wandstärken
- Symmetrie
- Dichtheit (keine Durchbrüche in der Struktur).

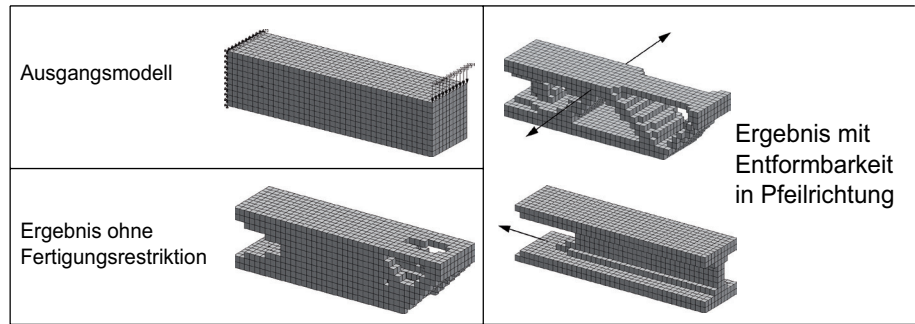


Abb. 4.10: Kragträger mit unterschiedlichen Entformungsrichtungen (Quelle: FE-DESIGN)

Neben diesen Fertigungsrestriktionen existieren auch erweiterte Formen von Topologieoptimierungen, die beispielsweise die Faserausrichtung von faserverstärkten Kunststoffen oder die Materialverteilung von generativ hergestellten Bauteilen berücksichtigen.

Bekannte kommerzielle Topologieoptimierungsprogramme, die auch unterschiedliche Umfänge zur Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen anbieten, sind zum Beispiel SIMULIA von der Fa. Dassault Systèmes (Frankreich), OptiStruct von der Fa. ALTAIR (USA), ANSYS von der Fa. ANSYS Inc. (USA) oder OPTISHAPETS von der Fa. Quint (Japan).

4.3.1.1 Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers

Im Rahmen dieses Beispiels soll die Gestalt eines Fahrradbremskraftverstärkers (engl. Brake Booster) mit dem Ziel einer hohen massenspezifischen Steifigkeit ermittelt werden. Um diese optimierte

Geometrie im Vergleich zu einem kommerziell verfügbaren Fahrradbremskraftverstärker aus Aluminium bewerten zu können, soll das Topologieoptimierungsergebnis hergestellt und experimentell untersucht werden.

Der in Abbildung 4.11 dargestellte Fahrradbremskraftverstärker kann als ein U-förmiger Versteifungsbügel bezeichnet werden, der bei so genannten V-Bremsen zur besseren Dosierbarkeit der Bremskraft und Vergrößerung der Bremswirkung eingesetzt wird.

Der gewählte Bauraum für die Topologieoptimierung orientiert sich an dem in Abb. 4.11 dargestellten Brake Booster, dessen Abmessungen in der Höhe ca. 130 mm und in der Breite ca. 120 mm betragen. Entsprechend des im vorherigen Abschnitt dargestellten Optimierungsprozesses bildet der erste Schritt die Geometriemodellierung und Vernetzung mit Volumenelementen. Die durchschnittliche Kantenlänge von ca. 1 mm soll zu einer hohen Auflösung der Materialverteilung führen. Durch Verwendung

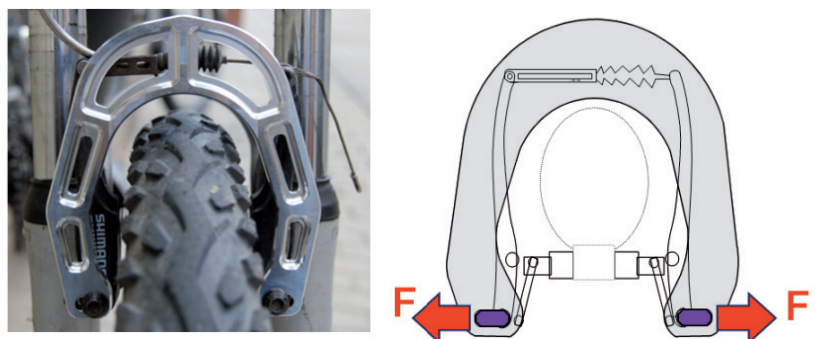


Abb. 4.11: Fahrradbremskraftverstärker mit Belastungssituation (Quelle: Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.)

Fahrradbremskraftverstärker

Lastfall

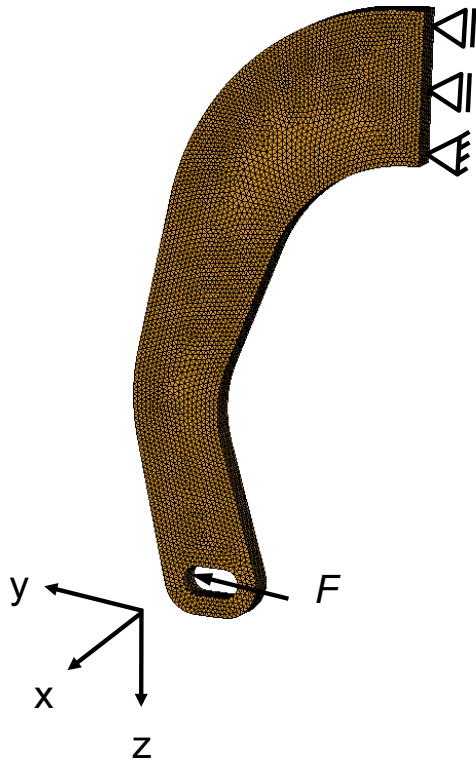


Abb. 4.12: FE-Modell mit Volumenelementen, Einzelkraft und Symmetrierandbedingungen

von Symmetrieeigenschaften der Geometrie kann der Designraum halbiert werden, sodass insgesamt 56 000 Volumenelemente erzeugt werden. In Abbildung 4.12 ist das FE-Modell mit den dazugehörigen Symmetrierandbedingungen und der aufgebracht Einzelkraft F in y -Richtung von 500 N dargestellt. Für den Topologieoptimierungsprozess wird als Nebenbedingung eine Massereduktion um 30 % der Ausgangsmasse festgelegt. Das Ergebnis dieses Prozesses mit den dabei durchgeführten Einzelschritten

zeigt die Abbildung 4.13. Der erste Schritt bestand in der Topologieoptimierung mit TOSCA. Aufbauend auf diesem Ergebnis wurde die Kontur mittels TOSCA geglättet. Es ergeben sich dabei zum Teil sehr dünne und inhomogene Streben. Daher ist eine Überführung in eine fertigungsgerechte Geometrie erforderlich, was insbesondere für die kurzen Streben zutrifft. Eine Bewertung dieser Materialverteilung hat ergeben, dass homogene Streben mit einem bestimmten Minstdurchmesser zwingend für die Fertigung notwendig sind. Um nicht allzu sehr von der geglätteten Kontur abzuweichen, wird eine Unterteilung in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Wandstärken durchgeführt (Abb. 4.14). Eine zu große Geometrieabweichung hätte voraussichtlich zu einem schlechteren Steifigkeit-Masse-Verhältnis geführt. Neben der Volumenreduktion als Nebenbedingung wird auf die Minstdicke als optionale Nebenbedingung bewusst verzichtet, um die zusätzlichen Überlegungen zu einer fertigungsgerechten Geometrie zu verdeutlichen. Auf Basis dieser neuen Geometrie kann ein weiteres FE-Modell erstellt werden, das nun für die Ermittlung der massenspezifischen Steifigkeit verwendet werden kann (Abb. 4.14).

Damit ist es nun möglich, das optimierte Bauteil aus Aluminium durch Fräsen herzustellen. Sowohl der kommerziell verfügbare Brake Booster als auch der gefertigte optimierte Brake Booster sind experimentell an einer Zugprüfmaschine untersucht, sodass Kraft-Weg-Kurven (F - s -Kurven) ermittelt werden können.

Zur Bewertung der Steifigkeitseigenschaften dient die massenspezifische Steifigkeit, bei der die Strukturverschiebung mit der Masse verknüpft ist. Die

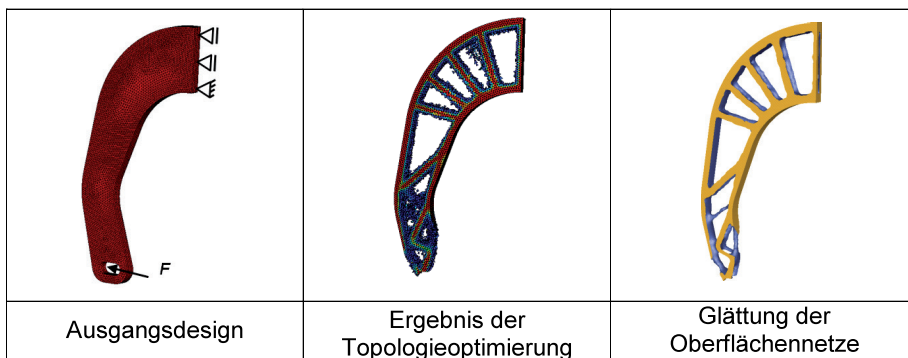


Abb. 4.13: Topologieoptimierung eines Fahrradbremskraftverstärkers

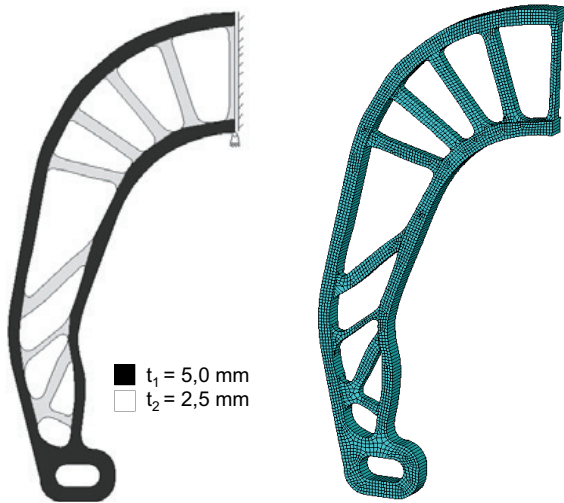


Abb. 4.14: Fertigungsgerechtes FE-Modell mit Volumenelementen, Einzelkraft und Symmetrierandbedingung

dabei ermittelte massenspezifische Steifigkeit des Referenzbauteils mit dem optimierten Brake Booster ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die topologieoptimierte Form fast die doppelte massenspezifische Steifigkeit erreicht. Auch der Vergleich zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen führt bei beiden Varianten zu einer sehr guten Übereinstimmung.

4.3.1.2 Topologieoptimierung eines Felgensterns

Bei diesem Beispiel soll ein Designvorschlag für einen Felgenstern ermittelt werden. Die dabei gesuchte Geometrie soll mit drei Speichen maximale Steifigkeit besitzen. Um die Übertragbarkeit der numerischen Ergebnisse auf die reale Fertigung zu erleichtern, werden spezielle Restriktionen bei der Optimierung berücksichtigt.

Zunächst wird auf Basis eines CAD-Modells der Felge ein Berechnungsmodell erstellt. Die in Abbildung 4.16 (links) gezeigte Schnittdarstellung der Felge zeigt den Bauraum. Um lediglich die Topologie des Felgensterns zu optimieren, wird im CAD-System eine Trennung zwischen dem Bereich für den zu ermittelnden Felgenstern und der restlichen Struktur durchgeführt, die das Felgenbett sowie den Naben-

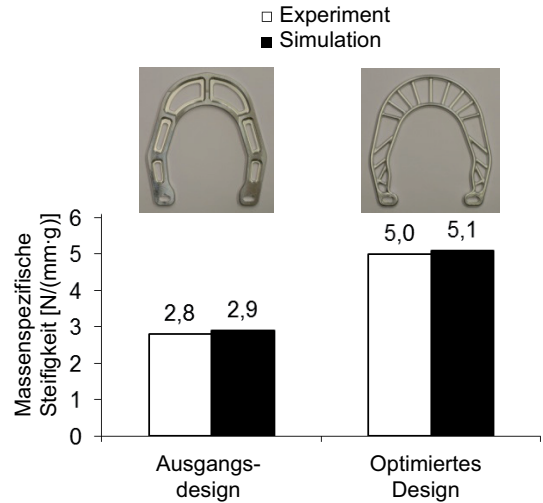


Abb. 4.15: Vergleich der massenspezifischen Steifigkeit zwischen Ausgangsdesign (Referenz) und dem topologieoptimierten Brake Booster

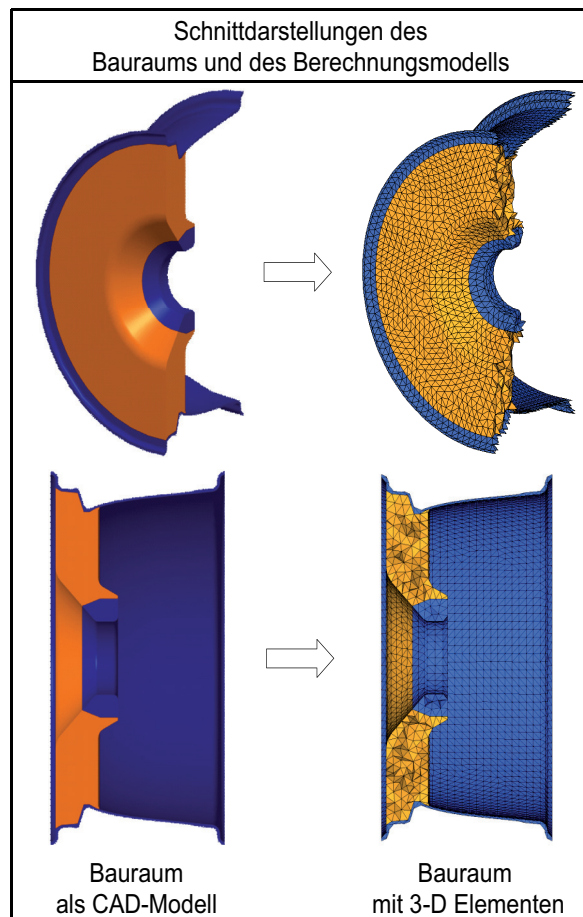


Abb. 4.16: Bauraum des CAD-Modells (links) und Bauraumdiskretisierung mit 3-D-Elementen (rechts)