

Rinje Brandis

***Systematik für die integrative
Konzipierung der Montage auf
Basis der Prinziplösung
mechatronischer Systeme***

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2014

ISSN 2195-5239

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Rinje Brandis

Hersteller: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Druck · Buch · Verlag
Münster

Printed in Germany

Geleitwort

Unternehmen sind heute mehr denn je dazu gezwungen, innovative und qualitativ hochwertige Produkte in kürzester Zeit zu attraktiven Preisen auf den Markt zu bringen. Dies erfordert neue Ansätze in der Produktentstehung. Die Produktentstehung umfasst die Aufgabenbereiche Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung, welche die Hauptpole eines vernetzten Handlungssystems darstellen. Zwischen dem Produkt und dem zugehörigen Montagesystem bestehen vielfache Wechselwirkungen. Montageverfahren schränken den Gestaltungsraum in der Produktentwicklung ein. Andererseits erfordern bspw. innovative Materialkombinationen neue Fügeverfahren. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Herausforderung, Produkt und Montagesystem als Einheit zu betrachten und sie von Beginn an im engen Wechselspiel zu entwickeln.

Herr Brandis hat sich dieser Herausforderung gestellt und eine Systematik für die integrative Konzipierung der Montage entwickelt. Die Systematik unterstützt die beteiligten Produktentwickler und Montageplaner bei der Erstellung eines ersten Montagekonzepts. Sie umfasst hierfür ein detailliertes Vorgehensmodell, eine Spezifikationstechnik sowie Methoden für die Lösung von Teilaufgaben. Die Anwendung der Systematik wird anschaulich am Beispiel der Konzipierung eines Pedelecs sowie des zugehörigen Montagesystems erläutert.

Die von Herrn Brandis entwickelte Systematik liefert einen wichtigen Beitrag zu einer neuen Schule der Produktentstehung für mechatronische Systeme. Durch die Verknüpfung von Produkt- und Produktionssystemkonzipierung ist die Systematik ein zentraler Baustein auf dem Weg zu diesem Ziel.

Paderborn, im Februar 2014

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Rinje Brandis
aus *Bielefeld*

Tag des Kolloquiums: 20. Januar 2014
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts. Ihre Grundlage bildet meine Forschungsarbeit im BMBF-Verbundprojekt VireS – Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung.

Die Zeit am Lehrstuhl für Produktentstehung war stets herausfordernd und sehr lehrreich. Sie hat meine Arbeitsweise nachhaltig geprägt. Ein großer Dank gilt daher Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für seine Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen als Mitarbeiter und Teamleiter. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, sehr selbstständig zu handeln und gestaltend mitzuwirken.

Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza vom wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie danke ich für die Übernahme des Koreferats meiner Dissertation.

Ein großer Dank gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die sehr gute Zusammenarbeit, die vielen hilfreichen Diskussionen und die schöne Zeit am Lehrstuhl. An erster Stelle steht hierbei das Team Integrative Produktionssystemplanung: Frank Bauer, Jan Brökelmann, Dominic Dettmer, Daniel Köchling, Johannes Kolsch, Daniel Nordsiek, Marcus Petersen, Gerald Rehage, Mariana Reyes Krupp, Vinzent Rudtsch und Jörg Schaffrath. Dies gilt in besonderem Maße für die beiden Erstgenannten, die mich die gesamte Zeit über begleitet haben und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Weiterhin danke ich Tobias Mittag, der mich als studentische Hilfskraft beim Test der entwickelten Systematik unterstützt hat sowie Jan Kapischke für die Unterstützung bei der Designstudie.

Abschließend geht ein besonderer Dank an meine Eltern Gabriele und Onno für ihr Vertrauen und die Unterstützung auf dem gesamten Weg. Gleiches gilt für meine Geschwister Gerrit und Lilli. Der größte Dank gilt meiner Frau Annika. Sie war in dieser Zeit immer für mich da, hat mir den Rücken freigehalten und stets an mich geglaubt.

Ohne Euch wäre dies so nicht möglich gewesen. Danke!

Paderborn, im Februar 2014

Rinje Brandis

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [BGN+09] BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.; NORDSIEK, D.; REYES-PEREZ, M.: A Holistic Approach for the Conceptual Design of Production Systems regarding the Interaction between Product and Production System. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). October 5-7 2009, Munich, Germany, 2009
- [BDT10] BRANDIS, R.; DOROCIAC, R.; TERFLOTH, A.: Softwareunterstützte Modellierung der Prinziplösung – Ein neuer Ansatz für eine integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung. Produkt Daten Journal, 17. Jahrgang, Nr. 2 2010, ProSTEP iViP e.V., Darmstadt, 2010
- [GBK10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; KAISER, L.: Auswahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18.-19. März 2010, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010
- [GBN+10] GÜNTHER, T.; BRANDIS, R.; NORDSIEK, D.; PETERS, S.; RÜHL, J.: Frühzeitige und qualifizierte Kostenprognose für Produktionssysteme – Praxisbeispiel anhand einer mechatronischen Baugruppe. In: Projektträger Karlsruhe (PTKA) (Hrsg.): 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010 – Produktion in Deutschland hat Zukunft. 9.-10. März 2010, Karlsruhe, 2010
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Proceedings of the Design 2010 – 11th International Design Conference. May 17-20 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [OB11] OLBRICH, R.; BRANDIS, R.: Methode zur frühzeitigen Ableitung von Fertigungsprozessen für Blechteile. In: Gausemeier, J.; Schäfer, F.; Trächtler, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 19.-20. Mai 2011, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [Bra12] BRANDIS, R.: Disziplinübergreifende, modellbasierte Entwicklung – Integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Digital Engineering, 3/2012, WIN-Verlag, Vaterstetten, 2012
- [GBD+12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; DOROCIAC, R.; MÜLDER, A.; NYBEN, A.; TERFLOTH, A.: Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GBK12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; KAISER, L.: Integrative Conceptual Design of Products and Production Systems for Mechatronic Systems. Proceedings of the 13th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (Mechatronics-REM 2012). November 21-23 2012, Paris, France, 2012
- [NBG13] NORDSIEK, D.; BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.: Integrative Produktionssystemkonzipierung in der Mechatronik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 108 (2013) 9, Carl Hanser Verlag, München, 2013

Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme

Moderne technische Produkte sind i. d. R. mechatronische Systeme, deren erfolgreiche Entwicklung die abgestimmte Zusammenarbeit der beteiligten Fachdisziplinen erfordert. Weiterhin müssen die Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und dem zugehörigen Produktionssystem frühzeitig im Entwicklungsprozess Berücksichtigung finden. Ein geeigneter Ansatzpunkt ist die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Die Schnittstelle bildet die Konzipierung der Montage, die im Wesentlichen die montageorientierte Strukturierung des Produkts sowie die Erstellung einer ersten Montageablaufstruktur umfasst. Das Montagekonzept bildet den Ausgangspunkt für die Konzipierung der Fertigungsprozesse. Etablierte Ansätze betrachten diesen Übergang nur unzureichend.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstand eine *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme*. Den Kern bildet ein Vorgehensmodell, welches die durchzuführenden Tätigkeiten detailliert beschreibt. Eine Modellierungstechnik ermöglicht die Beschreibung des Produkt- und Produktionssystemkonzepts. Weiterhin sind bestehende sowie neue Methoden und Werkzeuge für die Lösung von Teilaufgaben integriert. Produktentwickler und Montageplaner werden bei der Erstellung eines ersten Montagekonzepts unterstützt. Die Systematik schließt somit die Lücke zwischen der Produkt- und der Produktionssystemkonzipierung. Ihre Anwendung wird an einem durchgängigen Beispiel beschrieben.

Design Framework for the Conceptual Design of the Assembly Based on the Principle Solution of Mechatronic Systems

For the successful design of mechatronic systems, the collaboration of experts of the participating domains is necessary. In addition the interdependencies between the product and the associated production system must already be considered at an early stage of the development process. A suitable starting point is the integrative conceptual design. The linkage between these phases is the conceptual design of the assembly system, including the assembly-oriented structuring of the product as well as the creation of a first assembly sequence. The assembly concept is the basis for the design of manufacturing processes. In established approaches this transition is not considered adequately.

In the present work *a design framework for the conceptual design of the assembly based on the principle solution of mechatronic systems* is presented. The design framework consists of three components: a detailed procedure model, which describes the activities, a technique for the description of the conceptual design of the product and the production system as well as a collection of methods required to solve specific tasks within the conceptual design. The approach supports the development of a first assembly concept and closes the gap between the conceptual design of the product and the conceptual design of the according production system. The use of the design framework is illustrated and explained by means of a consistent application example.

Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Problematik	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Problemanalyse	5
2.1 Begriffsbestimmungen	5
2.1.1 Produktentstehung	5
2.1.2 Prinziplösung – Konzept – Konzeption	6
2.1.3 Systematik – Methodik	6
2.1.4 Der Systembegriff	7
2.1.5 Produktstruktur – Erzeugnisstruktur – Erzeugnisgliederung	8
2.1.6 Gestalt – Baustruktur	10
2.1.7 Produktion – Fertigungstechnik – Fertigung	11
2.1.8 Montage – Fügen	11
2.1.9 Produktionssystem	12
2.1.10 Montageablaufstruktur – Montagevorranggraph	13
2.2 Der Produktentstehungsprozess	14
2.3 Mechatronische Systeme	17
2.4 Entwicklung mechatronischer Produkte	18
2.4.1 Entwicklung als Problemlösungsprozess	18
2.4.2 Entwicklungsmethodik für technische Systeme und Produkte ...	20
2.4.3 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	23
2.4.3.1 Problemlösungszyklus als Mikrozyklus	24
2.4.3.2 V-Modell auf der Makroebene	24
2.4.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik	26
2.5 Entwicklung von Produktionssystemen	26
2.5.1 Aufgaben der Arbeitsplanung	27
2.5.1.1 Arbeitsablaufplanung	28
2.5.1.2 Arbeitsmittelplanung	28
2.5.1.3 Arbeitsstättenplanung	29

2.5.1.4	Materialflussplanung (Produktionslogistik).....	30
2.5.2	Entwicklungssystematik für Produktionssysteme.....	30
2.5.2.1	Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme.....	31
2.5.2.2	Vorgehen bei der Arbeitsablaufplanung.....	33
2.5.2.3	Vorgehen bei der Montageplanung.....	34
2.5.3	Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	38
2.6	Integrative Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme.....	38
2.6.1	Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption.....	39
2.6.2	Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung.....	44
2.6.3	Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik.....	47
2.7	Problemabgrenzung.....	48
2.8	Anforderungen.....	52
3	Stand der Technik.....	54
3.1	Integrative Entwicklung von Produkt und Montage.....	54
3.1.1	Integrierter Vorgehensplan für Konstruktion und Montageplanung nach BICHELMAIER.....	54
3.1.2	Integrierte Produktentwicklung und Montageplanung nach GRUNWALD.....	57
3.1.3	Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen nach MÜLLER.....	58
3.1.4	Systematik zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme nach NORDSIEK.....	61
3.2	Frühzeitige Gestaltmodellierung.....	62
3.2.1	Methodisches Gestalten nach EHRENSPIEL.....	63
3.2.2	Baukonzept nach PONN/LINDEMANN.....	63
3.2.3	Contact and Channel Model nach ALBERS/MATTHIESEN.....	65
3.2.4	Schrittweise Gestaltsynthese nach LEMBURG.....	66
3.2.5	Module Interface Graph nach BLEES.....	67
3.3	Montageorientierte Produktstrukturierung.....	68
3.3.1	Design Structure Matrix.....	69
3.3.2	Produktstrukturierung nach STEFFEN.....	70
3.3.3	Produktstrukturierung nach DAHL.....	72
3.3.4	Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS).....	74
3.3.5	Modularisierung nach KOEPPEN.....	76
3.3.6	Modularisierung nach VDI-Richtlinie 2223.....	78
3.3.7	Festlegung der Produktarchitektur nach SEDCHAICHARN.....	79

3.4	Technologieauswahl.....	81
3.4.1	Verbindungsauswahl nach VDI-Richtlinie 2232	81
3.4.2	Technologieauswahl nach ASHBY.....	83
3.4.3	Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER.....	85
3.4.4	Konstruktionskataloge	86
3.5	Montagegerechte Produktgestaltung	88
3.5.1	Design for Assembly (DfA).....	88
3.5.2	Informationssystem für DfX-Richtlinien nach BAUER.....	90
3.6	Kommerzielle Softwaresysteme für die integrierte Produktentstehung	91
3.7	Handlungsbedarf.....	92
4	Anwendungsbeispiel Pedelec	96
5	Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage.....	99
5.1	Grundidee.....	99
5.2	Lösungsansatz	100
5.3	Prinzipielles Vorgehen der Systematik.....	101
5.4	Bestandteile der Systematik.....	104
5.4.1	Vorgehensmodell	105
5.4.2	Spezifikationstechnik.....	105
5.4.3	Methoden	106
6	Anwendung der Systematik zur Konzipierung der Montage	108
6.1	Konzipieren der Produktgestalt	108
6.1.1	Spezifikation der Produktgestalt.....	109
6.1.1.1	Gestaltung von Bauteilen	112
6.1.1.2	Gestaltung von Baugruppen	113
6.1.2	Analyse der Wirkstruktur	114
6.1.3	Formalisierung der Bauzusammenhänge	116
6.1.4	Konkretisierung der Bauzusammenhänge	117
6.2	Planen und Klären der Montageaufgabe.....	119
6.2.1	Analyse der Produkthanforderungen.....	119
6.2.2	Ermittlung weiterer Montageanforderungen	120
6.2.3	Festlegung der grundsätzlichen Montagemethode	121
6.3	Montageorientierte Produktstrukturierung	122
6.3.1	Identifikation von Montagezwangsfolgen	124
6.3.2	Ableitung der Beziehungsmatrizen.....	126
6.3.3	Montageorientierte Strukturierung.....	128
6.3.3.1	Cluster	130
6.3.3.2	Brücken und freie Elemente.....	132

6.3.3.3	Clusterüberlappung.....	133
6.3.4	Erstellung der montageorientierten Erzeugnisgliederung	135
6.4	Konzipierung des Montageprozesses	136
6.4.1	Ableitung einer ersten Prozesskette.....	137
6.4.2	Ergänzung bekannter Montageprozesse	138
6.4.3	Hierarchisierung und Detailierung der Montageprozesse	139
6.4.4	Auswahl neuer Montageverfahren	144
6.4.4.1	Formulierung der Verbindungsanforderungen	145
6.4.4.2	Identifikation geeigneter Montageverfahren	146
6.4.4.3	Bewertung und Auswahl	148
6.4.4.4	Konkretisierung der Prozesskette	150
6.4.4.5	Anpassung der Prinziplösung / Verfahrensentwicklung	150
6.4.5	Ableitung von Produktrestriktionen.....	151
6.5	Konzipierung des Montagesystems	153
6.5.1	Auswahl und Zuweisung der Ressourcen	153
6.5.1.1	Analyse der Eingangsinformationen	153
6.5.1.2	Erstellen von Ressourcenmatrizen	154
6.5.1.3	Analyse der Verfügbarkeit.....	154
6.5.1.4	Verknüpfung zu Ressourcenfolgen	155
6.5.1.5	Aufstellen des Ressourcendiagramms.....	155
6.5.2	Anordnung der Ressourcen	156
6.6	Bewertung der Anforderungserfüllung der Systematik.....	157
7	Zusammenfassung und Ausblick	160
8	Abkürzungsverzeichnis	163
9	Literaturverzeichnis	167

Anhang

A1 Ergänzungen zur Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme	A-1
A2 Ergänzungen zum Stand der Technik	A-2
A2.1 Symbolik zur Gestaltbeschreibung	A-2
A2.2 Übersicht Checklisten und Konstruktionskataloge	A-3
A2.3 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach ASHBY	A-5
A2.4 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER	A-7
A3 Ergänzungen zum Produktkonzept des Pedelecs	A-8
A4 Ergänzungen zur Anwendung der Systematik.....	A-11
A4.1 Sichtenbildung im Mechatronic Modeller.....	A-11
A4.2 Klassifikation von Verbindungen	A-12
A4.3 Faktoren zur Bestimmung von Montageanforderungen	A-13
A4.4 Gewichtungsfaktoren für die Produktstrukturierung	A-14
A4.5 Identifikation von Clustern am Beispiel Pedelec	A-15
A4.6 Montageorientierte Erzeugnisgliederung.....	A-16
A4.7 Gliederungsansätze in der Montage	A-17
A4.8 Bestimmung der Bewertungssumme	A-18
A4.9 Technologiesteckbrief	A-20
A4.10 Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK	A-21

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) geförderten Verbundprojekts VireS – „Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung“ (siehe [GLL12]). Das Ziel war ein Instrumentarium für die integrative Entwicklung von Produkten und den zugehörigen Produktionssystemen unter frühzeitiger Berücksichtigung der Aspekte Kosten und Robustheit. Die beschriebene *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* schließt die Lücke zwischen der Produktkonzipierung und der Konzipierung des Produktionssystems und liefert einen Beitrag zum Instrumentarium.

1.1 Problematik

Produzierende Unternehmen stehen heute immer neuen Herausforderungen gegenüber. Nicht nur die Märkte unterliegen schnellen Änderungen, auch Einflussfaktoren aus dem Unternehmensumfeld wirken auf das Unternehmen ein und verändern sich dynamisch [NWD+08, S. 409], [WZ09, S. 9]. Beispiele für sogenannte Megatrends sind die Globalisierung, die Durchdringung mit neuen Technologien, die Dynamisierung des Produktlebenszyklus sowie die Ressourcenverknappung [AR11, S. 1]. Die Folgen sind eine Verkürzung der Innovations- und Produktlebenszyklen [AR11, S. 34], eine Steigerung der Variantenzahl durch kundenindividuelle Produkte [Kin05, S. 11], [BA12, S. 246] sowie eine Zunahme der Komplexität der Produkte und der Produktionsprozesse [VWB+09, S. 4]. Weiterhin sind geringe Herstellkosten und eine hohe Produktqualität gefordert. Die Unternehmen stehen bei der Produkt- und Prozessentwicklung folglich unter einem stetig wachsenden Zeit- und Innovationsdruck.

Bei modernen maschinenbaulichen Erzeugnissen handelt es sich in der Regel um mechatronische Systeme, die durch das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik geprägt sind. Kennzeichnend für diese Produkte sind eine räumliche Integration mechanischer und elektronischer Komponenten, eine hohe Funktionsintegration sowie die Miniaturisierung der Komponenten [VDI2206, S. 10f.]. Ein Beispiel sind spritzgegossene dreidimensionale Schaltungsträger, sogenannte MID-Bauteile¹, die sowohl elektrische als auch mechanische Funktionen erfüllen. Weiterhin kommen vielfach neue Werkstoffe und Werkstoffsysteme zum Einsatz [AR11, S. 116], bspw. hybride Leichtbaustrukturen aus Multimaterialsystemen mit integrierter Sensorik zur Bauteilüberwachung. Mechatronik und neue Werkstoffe lassen gänzlich neue Möglichkeiten in der Produktgestaltung zu, gleichzeitig steigt jedoch die Komplexität der Produkte und Entwicklungsprozesse [GN12, S. 13].

¹ MID: Moulded Interconnect Devices

Die Entwicklung moderner maschinenbaulicher Erzeugnisse ist durch die synergetische Zusammenarbeit einer Vielzahl von Fachdisziplinen² geprägt. Dies umfasst auch die Planung der zugehörigen Produktionssysteme, um die wirtschaftliche und technische Herstellbarkeit zu gewährleisten [HB11, S. 1f.]. Produkt und Produktionssystem lassen sich nicht mehr getrennt voneinander betrachten. Einerseits wird bereits das Produktkonzept durch Fertigungs- und Montagetechnologien determiniert [Wes05, S. 137]. Andererseits schränken Produkteigenschaften und die Produktgestalt die Auswahl möglicher Fertigungstechnologien ein [BEW+05, S. 155], [Tas05, S. 45] bzw. erfordern innovative Produktkonzepte die Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien und Produktionssystemen. Produkt und Produktionssystem müssen daher von Beginn an in einem engen Wechselspiel entwickelt werden [VDI2206, S. 41], [SLB09, S. 84], [EE11, S. 141].

Ein Lösungsansatz für die beschriebene Problematik ist die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem³. Die strategische Produktplanung sowie die Produkt- und Produktionssystementwicklung werden ganzheitlich betrachtet, es werden interdisziplinäre Entwicklungsteams gebildet und vormals sequentielle Arbeitsabläufe parallelisiert. Hierfür ist eine Integration der Methoden und Arbeitstechniken der beteiligten Fachdisziplinen erforderlich [ZML+03, S. 580], [Ehr09, S. 188f.], [AR11, S. 63]. Die Herausforderungen liegen in der Koordination der parallelen Aktivitäten, der Abstimmung der beteiligten Fachbereiche und Organisationseinheiten sowie dem frühzeitigen Austausch der Ergebnisse [ELP+05, S. 21].

Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem sollte frühestmöglich beginnen [EE11, S. 141]. Ein geeigneter Ansatzpunkt ist die Phase der Konzipierung [VDI2206, S. 43], [Mic06, S. 21]. Als Resultat liegt die sog. Prinziplösung vor, welche die Wirkungsweise und den Systemaufbau festgelegt [GFD+09, S. 209f.] und die Basis für die Konzipierung des Produktionssystems darstellt [Nor12, S. 2]. Die Schnittstelle zwischen der Prinziplösung und dem Produktionssystemkonzept bildet die Konzipierung der Montage. Diese hat produktseitig Einfluss auf die Systemstruktur sowie die Gestalt und auf Seiten des Produktionssystems bestimmt sie maßgeblich die Struktur des Produktionsprozesses sowie den Automatisierungsgrad.

Heute erfolgt die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem meist sequenziell und arbeitsteilig in verschiedenen Fachabteilungen. Die Abläufe sind wenig durchgängig und von abteilungsspezifischen Arbeitsweisen geprägt (Methoden, Softwarewerkzeuge etc.), wobei der Informations- und Erfahrungsaustausch nur sehr eingeschränkt und in der Regel bilateral zwischen den beteiligten Fachleuten erfolgt. Die Häufigkeit und Intensität sind von den persönlichen Gewohnheiten und Arbeitsweisen der beteilig-

² Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Fachdisziplin und Domäne synonym verwendet

³ Synonym werden die Begriffe *Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung* sowie *Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung* verwendet (vgl. [GLR+00], [ESA05], [AR11]).

ten Akteure abhängig [SL09b, S. 111], [EEW10, S. 200]. Hierdurch hängt die Ergebnisqualität stark von den produktionstechnischen Kenntnissen und dem Verhalten des Produktentwicklers⁴ ab [Mor04, S. 6]. Es besteht die Gefahr unnötiger zeit- und kostenintensiver Iterationsschleifen im Produktentstehungsprozess (z. B. Konstruktionsänderungen), als Folge von Produktnachbesserungen [EEW10, S. 200]. Daher müssen die erforderlichen Arbeitsschritte im Produktentstehungsprozess koordiniert und der Einsatz der Methoden gezielt gesteuert werden [Wac94, S. 56]. Es fehlt eine systematische Vorgehensweise für die frühzeitige Abstimmung zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung. Dies gilt in besonderem Maße für die Konzipierung der Montage als Schnittstelle zwischen den beiden Bereichen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme*. Dadurch sollen Produktentwickler und Montageplaner möglichst frühzeitig bei der Erstellung eines Montagekonzepts unterstützt werden. Als Resultat liegen eine montageorientierte Produktstruktur, eine erste Montageablaufstruktur, geeignete Montageverfahren und eine erste Beschreibung des Montagesystems vor.

Das Montagekonzept bildet das Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung (vgl. [Fra03, S. 27f.]). Auf Seiten der Produktentwicklung ermöglicht es die Überprüfung der Produktgestalt unter montageorientierten Gesichtspunkten, bspw. hinsichtlich Montagegerechtigkeit und Automatisierbarkeit. In der Produktionssystementwicklung ist es der Ausgangspunkt für die Konzipierung der Fertigungsprozesse. Weiterhin enthält das Montagekonzept Informationen für frühzeitige Analysen, z. B. lassen sich die Montagekosten abschätzen (vgl. [GBN+10]), die einen wesentlichen Anteil der späteren Herstellkosten ausmachen.

Der Kern der Systematik ist ein Vorgehensmodell, welches die durchzuführenden Tätigkeiten bei der Konzipierung der Montage sowie die zugehörigen Ein- und Ausgangsinformationen detailliert beschreibt. Weiterhin steuert es den Einsatz der Methoden und Werkzeuge. Den beteiligten Fachleuten stehen somit ein prozessorganisatorischer Leitfaden sowie Methoden und Werkzeuge zur Verfügung.

⁴ Die Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße sowohl auf Frauen als auf Männer. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch die männliche Form (Ingenieur, Konstrukteur etc.) für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weibliche Form wird dabei stets mitgedacht. Eine Ausnahme bilden Inhalte, die ausdrücklich auf Frauen bezogen werden.

1.3 Vorgehensweise

Die beschriebene Problematik wird in **Kapitel 2** detailliert und analysiert. Zu Beginn werden die für die Arbeit relevanten Begriffe erläutert und die Arbeit in den Produktentstehungsprozess eingeordnet. Es folgt eine Beschreibung der Eigenschaften und Besonderheiten mechatronischer Systeme. Anschließend werden Entwicklungsmethoden für Produkte und Produktionssysteme analysiert. Der Fokus liegt hierbei auf der frühen Entwicklungsphase mechatronischer Systeme, der sogenannten Konzipierung, sowie auf der Arbeitsablauf- und Montageplanung. Das Kapitel schließt mit der Abgrenzung des Problems und der Ableitung von Anforderungen an die Systematik.

In **Kapitel 3** wird ein Überblick über den Stand der Technik gegeben. Zunächst werden Vorgehensweisen für die integrative Entwicklung von Produkt und Montage untersucht. Anschließend folgt die Vorstellung dedizierter Methoden, die Teilaufgaben der Montagekonzipierung unterstützen. Dies sind Ansätze zur frühzeitigen Gestaltmodellierung, der montageorientierten Produktstrukturierung, der Technologieauswahl sowie der montagegerechten Produktgestaltung. Abschließend werden die untersuchten Ansätze gegen die Anforderungen bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

Die entwickelte Systematik wird am Beispiel eines Demonstrators vorgestellt. Dieser wird in **Kapitel 4** beschrieben. Es handelt sich um ein Elektrofahrrad mit tretkraftabhängiger Motorunterstützung, ein sog. Pedelec (Pedal Electric Cycle).

In **Kapitel 5** wird die Grundidee der zu entwickelnden *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* vorgestellt. Anschließend wird diese in die Entwicklungsmethodik zur integrativen Konzipierung von mechatronischen Systemen und der zugehörigen Produktionssysteme eingeordnet und ihre Bestandteile werden kurz erläutert.

Inhalt von **Kapitel 6** ist die detaillierte Erläuterung der entwickelten Systematik. Dies umfasst das Vorgehen, die einzusetzenden Methoden sowie die zugehörigen Werkzeuge. Das Pedelec dient als durchgängiges Beispiel für die nachvollziehbare Erläuterung der Systematik. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Systematik gegen die in Kapitel 2 abgeleiteten Anforderungen.

In **Kapitel 7** wird die Arbeit abschließend zusammengefasst. Weiterhin wird ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen gegeben und der aus dieser Arbeit resultierende Forschungsbedarf wird beschrieben.

Der **Anhang** umfasst ergänzende Informationen und Erläuterungen. Dies sind bspw. Ergänzungen zum Stand der Technik sowie zur Anwendung der Systematik.

2 Problemanalyse

Das Ziel dieses Kapitels sind Anforderungen an eine *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme*. Den Ausgangspunkt bildet die in Kapitel 1 beschriebene Problematik. Sie wird in diesem Kapitel detailliert betrachtet und analysiert. Zunächst führt Kapitel 2.1 die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Begriffe ein und definiert diese. Anschließend wird in Kapitel 2.2 der allgemeine Produktentstehungsprozess für mechatronische Systeme vorgestellt und die integrative Konzipierung der Montage in diesen eingeordnet. Auf die Eigenschaften und Besonderheiten mechatronischer Systeme wird in Kapitel 2.3 eingegangen. Die Grundlagen der Entwicklung derartiger Systeme sind Inhalt von Kapitel 2.4. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Konzipierung, da das Produktkonzept den Ausgangspunkt für die Montagekonzipierung bildet. Kapitel 2.5 geht auf die Entwicklung von Produktionssystemen ein. Die Arbeitsplanung und insb. die Montageplanung als Schnittstelle zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung stehen hierbei im Fokus. In Kapitel 2.6 wird die Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme vorgestellt. Abschließend erfolgen die Problemabgrenzung in Kapitel 2.7 und die Ableitung von Anforderungen in Kapitel 2.8.

2.1 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Begriffe kurz erläutert. Bei Bedarf werden diese definiert und in den Kontext der Arbeit eingebettet.

2.1.1 Produktentstehung

Die Produktentstehung¹ beschreibt einen Teil des Produktlebenszyklus. Den Ausgangspunkt bildet die Geschäfts- oder Produktidee. Der Abschluss der Produktentstehung ist in der Literatur unterschiedlich festgelegt. Nach WESTKÄMPER endet die Produktentstehung mit dem Prototypenbau. Aspekte der Produktionssystementwicklung werden nicht berücksichtigt [Wes05, S. 117f.]. Die Produktentstehung nach GAUSEMEIER ET AL. umfasst zusätzlich die Produktionssystementwicklung und endet mit dem Serienanlauf [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14]. EHRENSPIEL, ABELE und REINHART fassen auch die Fertigung als Teil der Produktentstehung auf. Sie endet mit der Auslieferung an den Kunden [Ehr09, S. 1], [AR11, S. 6].

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Produktentstehung der Prozess von der Geschäfts- bzw. Produktidee bis zum Serienanlauf des Produkts verstanden. Dieser umfasst die

¹ Die Begriffe *Produkterstellung* und *Produktengineering* werden in der Literatur synonym verwendet [GLR+00, S. 2], [Ehr09, S. 695].

Phasen Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung [GPW09, S. 39f.].

2.1.2 Prinziplösung – Konzept – Konzeption

Das Ergebnis der Konzipierung im Rahmen der Produktentwicklung ist die **Prinziplösung** [PBF+07, S. 198], [Ehr09, S. 254] (vgl. Kap. 2.4.1). Sie beschreibt die Wirkungsweise sowie den Aufbau des Systems mittels Lösungsprinzipien und stellt somit einen ersten Lösungsvorschlag für die Entwicklungsaufgabe dar [VDI2221, S. 41]. Eine vollständige Lösungsbeschreibung liegt mit der Prinziplösung nicht vor [PL11, S. 114].

Die Begriffe **Konzept** und **Konzeption** werden umgangssprachlich häufig synonym gebraucht. In der Sozialpädagogik werden die Begriffe nach ihrem Konkretisierungsgrad unterschieden. Unter einem Konzept ist ein erster, noch modifizierbarer Entwurf zu verstehen. Demgegenüber beschreibt die Konzeption den festgelegten und ausgearbeiteten Entwurf [Kre08, S. 9f.]. Bei der Prinziplösung handelt es sich dementsprechend um ein Konzept [Nor12, S. 6].

Die vorliegende Arbeit folgt dieser Definition. Mit der Prinziplösung wird ein Produktkonzept beschrieben. Dieser erste Entwurf ist im weiteren Entwicklungsverlauf zu detaillieren und zu konkretisieren. Analog handelt es sich bei dem Resultat der Produktionssystemkonzipierung um ein Produktionssystemkonzept.

2.1.3 Systematik – Methodik

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter einer **Systematik** eine „*planmäßige, einheitliche Darstellung [bzw.] einheitliche Gestaltung nach bestimmten Ordnungsprinzipien*“ verstanden [Dud10]. Der Begriff findet vorwiegend in der Biologie Gebrauch und beschreibt die „*Wissenschaft von der Vielfalt der Organismen und ihrer Erfassung in einem System*“ [Dud13b-ol]. Systematiken im Bereich Maschinenbau sind z. B. die Systematik der Einteilung der Stähle [GS12, S. 12] oder die Systematik der Maschinen- und Konstruktionselemente [BBJ+12, S. 131].

BISCHOF und HANSEN verwendeten den Begriff erstmalig im Kontext der Produktentwicklung. Demnach ist eine Konstruktionssystematik „*das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkenntnisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes*“ [Han55, S. 36], [Hub76, S. 74]. Hiervon ausgehend definiert DUMITRESCU eine Entwicklungssystematik als:

„Ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung des Anwenders. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsprozess

nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken/Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein“ [Dum11, S. 6].

Allgemein wird unter einer **Methodik** ein Teilgebiet einer Wissenschaft verstanden, welches sich mit dem Methodengefüge des entsprechenden Fachgebiets befasst und Methoden bereitstellt [Mül90, S. 17]. Häufig wird in der Produktentwicklung auch das „Zusammenwirken verschiedener Einzelmethoden“ als Methodik bezeichnet [Lin07, S. 33]. Darüber hinaus beinhalten solche Entwicklungsmethodiken Erkenntnisse aus der Denk- und Arbeitspsychologie sowie organisatorische Leitlinien zur interdisziplinären Zusammenarbeit [PBF+07, S. 10f.], [Dum11, S. 6].

Die Arbeit folgt der Definition nach DUMITRSCU. Somit besteht die zu entwickelnde Systematik aus einem Vorgehensmodell und Hilfsmitteln. Die Hilfsmittel sollen die integrative Konzipierung der Montage unterstützen. Es sind etablierte Hilfsmittel zu verwenden und in das Vorgehen zu integrieren. Ist dies nicht möglich, sind die Hilfsmittel auf die gegebene Problemstellung anzupassen bzw. neue Hilfsmittel zu entwickeln.

2.1.4 Der Systembegriff

Komplexe technische Erzeugnisse sowie die zur ihrer Herstellung eingesetzten Produktionssysteme können nach den Grundprinzipien der Systemtheorie als Systeme betrachtet werden [HWF+12, S. 34ff.]. Die systemtheoretische Betrachtung erleichtert das Verständnis und den Umgang mit komplexen Systemen [Sch05b, S. 32f.], [Lin07, S. 54], [VWB+09, S. 100ff.]. EHRENSPIEL definiert ein System folgendermaßen:

„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System)“ [Ehr09, S. 19].

Die Elemente beschreiben das System auf der gewählten Betrachtungsebene. Sie können ihrerseits auch als Systeme aufgefasst werden, die wiederum aus einzelnen Elementen (Teilsystemen) bestehen. Hierdurch ergeben sich hierarchische Ordnungsbeziehungen (Aggregationsbeziehungen). Weiterhin existieren Flussbeziehungen zwischen den Elementen, wie Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Die Gesamtheit der Elemente und ihrer Beziehungen wird als Struktur des Systems bezeichnet. Über Ein- und Ausgangsgrößen werden die Beziehungen des Systems zu seiner Umgebung beschrieben, welche sämtliche Elemente und Einflüsse außerhalb der Systemgrenze umfasst. Diese können auf das System einwirken bzw. vom System beeinflusst werden. Als Verhalten wird die Gesamtheit aller Reaktionen des Systems bezeichnet [Mül90, S. 58], [PBF+07, S. 17], [Ehr09, S. 19ff.]. Bild 2-1 zeigt die Grundbegriffe der Systemtheorie.

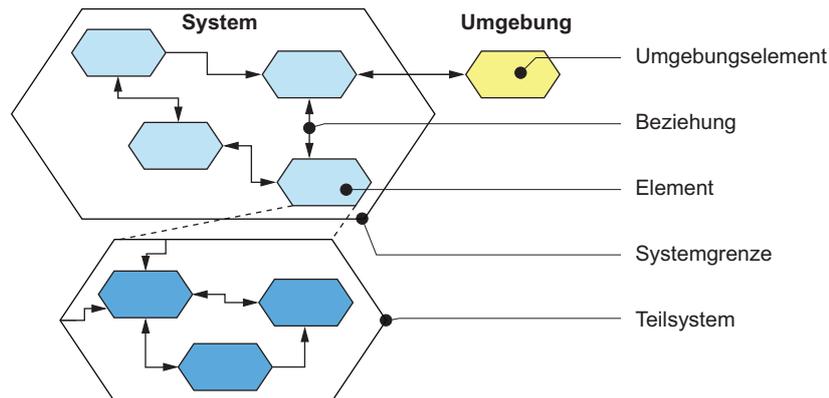


Bild 2-1: Grundbegriffe der Systemtheorie nach [DH02, S. 5]

Der Nutzen der Systemtheorie und dem „Denken in Systemen“ liegt in einer erheblichen Vereinfachung der Planung, Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme [Ehr09, S. 26], [DH02, S. 9ff.]:

- **Komplexitätsreduzierung** durch klare Systemgrenzen, Betrachtung einzelner Elemente als „Black-Box“, Hierarchisierung des Systems über mehrere Betrachtungsebenen und die Bildung unterschiedlicher Sichten auf das System.
- **Frühzeitige Identifikation der Eigenschaften** des Systems durch gedankliche, graphische oder mathematische Modelle und deren Simulation.
- **Reduktion auf das Wesentliche** eines Systems durch eine abstrakte Modellierung der relevanten Systembestandteile.

2.1.5 Produktstruktur – Erzeugnisstruktur – Erzeugnisgliederung

Die Begriffe Produktstruktur, Erzeugnisstruktur und Erzeugnisgliederung sind nicht einheitlich definiert und werden in der Literatur unterschiedlich verwendet. Teilweise werden sie auch synonym genutzt [Bre97, S. 4], [Rap99, S. 9ff.].

Als **Produktstruktur** bezeichnen EVERSHEIM und UNGEHEUER *die Zusammensetzung eines Erzeugnisses aus Teilelementen und deren Zuordnung untereinander* [Ung86, S. 158], [Eve89, S. 145]. SCHUH definiert die Produktstruktur als die Zusammensetzung eines Produkts, das aus Komponenten, Baugruppen und Einzelteilen besteht [Sch05a, S. 119ff.]. Nach RAPP ist die Produktstruktur eine Produkteigenschaft, welche die Zuordnung der Produktbestandteile zueinander beschreibt [Rap99, S. 9f.]. MEIER definiert die Produktstruktur als *„strukturierte Abbildung eines Produkts aus seinen physischen Komponenten. Sie zeigt die Zusammenhänge zwischen den Komponenten sowie deren Schnittstellen“* [Mei07, S. 43].

Die **Erzeugnisstruktur** ist nach DIN 199 definiert als die *„Gesamtheit der nach einem bestimmten Gesichtspunkt festgelegten Beziehungen zwischen den Gruppen und Teilen eines Erzeugnisses“* [DIN199-5, S. 1]. Ihre Gliederung kann z. B. funktional oder mon-

tageorientiert erfolgen und die Darstellung graphisch als Strukturbaum oder tabellarisch als Stückliste erfolgen [DIN199-5, S. 1].

Die **Erzeugnisgliederung** wird zum Teil synonym zur Produktstruktur gesetzt [Ung86, S. 158]. Nach anderen Definition ist sie ein Abbild der Produktstruktur und somit eine Sichtweise auf diese [Rap99, S. 9f.].

In der vorliegende Arbeit wird das Begriffsverständnis von RAPP zugrunde gelegt [Rap99, S. 9f.]. Bild 2-2 zeigt den Zusammenhang zwischen Produktstruktur und Erzeugnisgliederung.

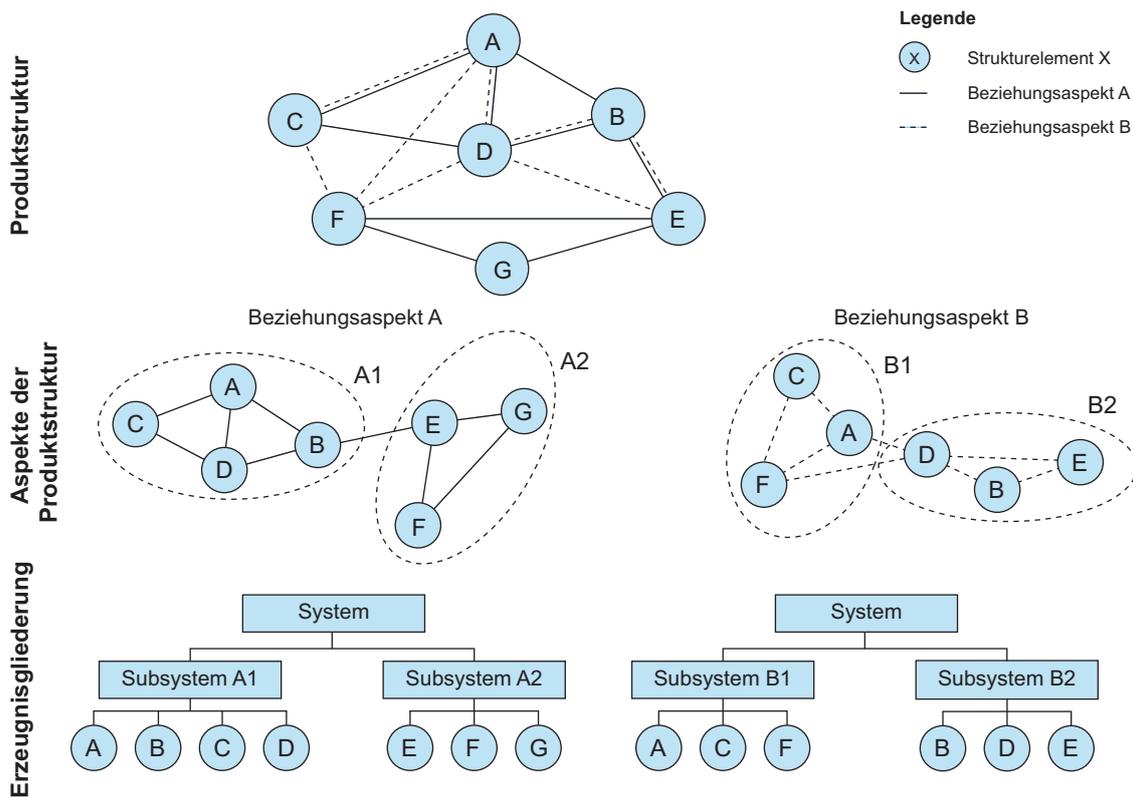


Bild 2-2: Zusammenhang zwischen Produktstruktur und Erzeugnisgliederung nach [Rie03, S. 31]

Unter der Produktstruktur wird die Gesamtheit aller Beziehungen zwischen den Elementen des Produkts verstanden [Rap99, S. 9], [Rie03, S. 30]. Durch die Konzentration auf einen Beziehungsaspekt werden Sichten auf die Produktstruktur gebildet. Beispiele sind die Funktionsstruktur (Abbildung funktionaler Beziehungen) und die Baustruktur (Abbildung baulicher Beziehungen). Die Begriffe Produktstruktur und Erzeugnisstruktur werden synonym verwendet. Als Erzeugnisgliederung wird die Abbildung nach einem Beziehungsaspekt bezeichnet, wobei Elementen zu übergeordneten Einheiten (z. B. Baugruppen, Montagegruppen, Verkaufseinheiten, Module) zusammengefasst werden. Die Erzeugnisgliederung ist keine Produkteigenschaft, sondern eine hierarchische Abbildung der Produktstruktur [Rap99, S. 10]. Die Darstellung der Erzeugnisgliederung kann bspw. als Strukturbild oder Stückliste erfolgen.

2.1.6 Gestalt – Baustruktur

Die **Gestalt** ist die Gesamtheit der geometrischen Merkmale eines materiellen Objekts. Sie umfasst die Makrogeometrie (Form, Größe), die Mikrogeometrie (Oberfläche) sowie den Werkstoff. Die Gestalt eines Systems wird über die Gestalt der einzelnen Elemente sowie deren Lage (Anordnung) beschrieben. [Ehr09, S. 692], [PL11, S. 34]. Im Verlauf der Produktentwicklung wird sie konkretisiert und detailliert (Bild 2-3).

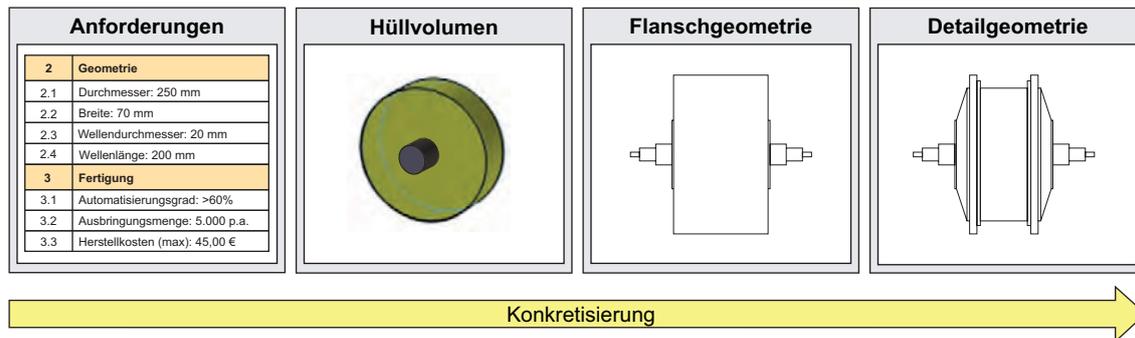


Bild 2-3: Konkretisierung der Gestalt im Entwicklungsprozess nach [Gru02, S. 88]

Erste Gestaltinformationen werden in den Anforderungen beschrieben und die Geometrie wird in Form von Hüllvolumen festgelegt. Anschließend werden die Schnittstellen des Produkts gestaltet, bspw. die Geometrie des Flansches. Abschließend erfolgt die Festlegung der Detailgeometrie [Cui00, S. 16], [Gru02, S. 88]. Die Beschreibung des Gestaltmodells kann mittels Prinzipskizzen², Zeichnungen, 2D- oder 3D-CAD-Modellen erfolgen [VWB+09, S. 148f.].

Als **Baustruktur** wird eine spezifische Sicht auf die Produktstruktur bezeichnet (vgl. Kap. 2.1.5). Sie beschreibt die physischen Bestandteile des Systems (Bauteile) und deren Aggregation (Baugruppen). Weiterhin bildet sie die Beziehungen zwischen den Elementen ab. Ihre Strukturierung kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen, z. B. funktional oder montageorientiert. Üblich ist hierbei die Orientierung an der Montage und die Bildung von Montagegruppen [Lin07, S. 327], [Ehr09, S. 396].

Den Ausgangspunkt für die Gestaltung des Produktionssystems bilden die Produktgestalt und die Baustruktur [Fuc05, S. 27], [Ald09, S. 23]. Bild 2-4 verdeutlicht die zentrale Stellung der Produktgestalt im Produktentstehungsprozess. Sie bildet die Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung und ergibt sich im Verlauf des Entwicklungsprozesses aus den eingesetzten Wirkprinzipien, den gestellten Produktanforderungen sowie dem Produktdesign. In der Produktionssystementwicklung bildet die Produktgestalt den Ausgangspunkt für die Fertigungs-, Montage- und Prüfplanung.

² Grafisches Gestaltmodell mit geringem Detaillierungsgrad [Sed10, S. 74].

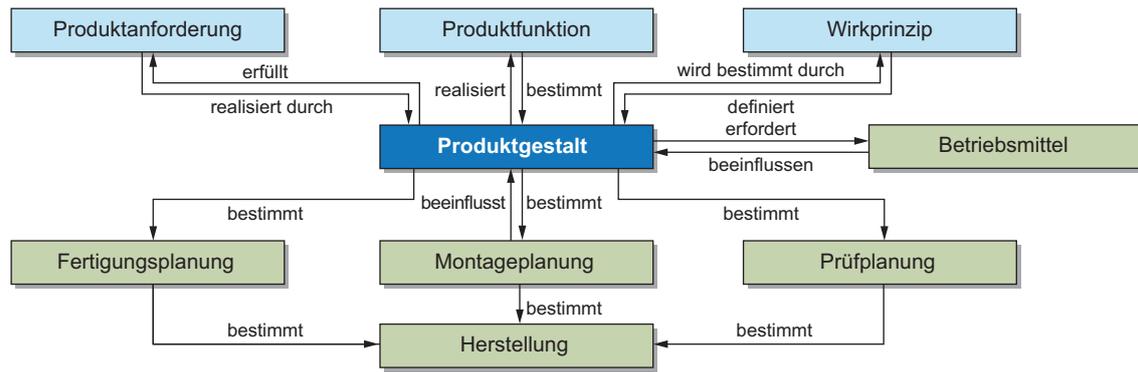


Bild 2-4: Produktgestalt in der Produktentstehung nach [Sch93, S. 100]

2.1.7 Produktion – Fertigungstechnik – Fertigung

Die **Produktion** wird in der Betriebswirtschaftslehre als „Prozess der zielgerichteten Kombination von Produktionsfaktoren (Input) und deren Transformation in Produkte (Erzeugnisse, Output)“ [Gab13-ol] definiert. In der Ingenieurwissenschaft wird die Produktion als „ein vom Menschen organisierter Prozess der Wertschöpfung“ [Spu79, S. 25] bezeichnet. Je nach Art des Transformationsprozesses und des Erzeugnisses wird die Produktion in Energie-, Verfahrens- und Fertigungstechnik unterteilt [Spu79, S. 25].

In der **Fertigungstechnik** bzw. **Fertigung** werden geometrisch bestimmte materielle Güter in einem diskreten Prozess hergestellt [Dan03, S. 49], [DIN8580, S. 4], [Wes05, S. 24]. Hierbei wird zwischen der (Teile-)Fertigung und der Montage unterschieden [War93b, S. 1ff.]. Als **Teilefertigung** wird die Herstellung von Einzelteilen bezeichnet [TD11, S. S1]. In der **Montage** werden die Einzelteile zu Baugruppen und schließlich zum Enderzeugnis zusammengefügt [MR96, S. 10-17]. Für eine bessere Abgrenzung der Fertigungstechnik bzw. Fertigung gegenüber der Teilefertigung wird in dieser Arbeit der Oberbegriff Produktion verwendet. Demnach subsumiert die Produktion die Teilefertigung und die Montage (vgl. [Nor12, S. 11]).

2.1.8 Montage – Fügen

Unter **Montage** werden alle Vorgänge zusammengefasst, die für den Zusammenbau geometrisch bestimmter Körper zu funktionsfähigen Produkten erforderlich sind [PBF+07, S. 468], [WRN09, S. 162]. Kernfunktion der Montage ist das Fügen [Sel11, S. S97]. Handhaben [VDI2860], Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen stellen weitere Funktionen dar [Lot06a, S. 2], [WRN09, S. 164].

Fügen bezeichnet ein *auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken* [DIN8580, S. 5]. Es wird nach DIN 8593 in neun Teilgruppen unterteilt [DIN8593-0, S. 4]: Zusammensetzen [DIN8593-1], Füllen [DIN8593-2], Anpressen/Einpressen [DIN8593-3], Urformen [DIN8593-4], Umformen [DIN8593-5], Schweißen [DIN8593-6], Löten [DIN8593-7], Kleben [DIN8593-8] und

Textiles Fügen. Weiterhin lassen sich Fügeverfahren nach der Art der Verbindung klassifizieren [HB11, S. 67]:

- Der **Stoffschluss** verbindet die Teile durch atomare- oder molekulare Kräfte zu einer unlösbaren Einheit. Dies kann mit oder ohne Zusatzwerkstoff erfolgen. Beispiele sind Schweißen, Löten und Kleben.
- Beim **Kraftschluss**³ werden durch eine Verspannung in der Kontaktfläche Reibkräfte erzeugt. Beispiele sind Keil-, Press- und Schraubverbindungen.
- Der **Formschluss** stellt die Kraftübertragungen mit Hilfe von Formelementen her. Dies kann mit oder ohne Zusatzelemente erfolgen. Beispiele sind Passfeder-, Profilwellen- und Stiftverbindungen.

2.1.9 Produktionssystem

Allgemein wird unter einem Produktionssystem ein sozio-technisches System verstanden, dessen Aufgabe die Herstellung eines End- oder Zwischenprodukts ist. Hierfür wird aus einem Input (z. B. Material, Energie) unter Einsatz wertschöpfender Prozesse (z. B. Fertigung, Montage) und assoziierter Prozesse (z. B. Transport, Lagerung) ein Output (z. B. Produkt, Reststoffe) erzeugt [NHR+08, S. 85].

Der VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. – REFA definiert komplexe Produktionssysteme als Produktionseinrichtungen, die mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen selbständig durchführt. Dies umfasst Funktionen aus den Bereichen Teilefertigung und Montage sowie Material- und Informationsfluss [Ref90, S. 15]. Es kann sich um einzelne Arbeitsplätze (z. B. Montagezellen), Mehrmaschinensysteme (z. B. Produktionslinien) oder ganze Produktionsbetriebe handeln [Eve96, S. 4]. Die Bestandteile eines Produktionssystems lassen sich in die Teilsysteme Informations-, Materialfluss- und Bearbeitungs-/Montagesystem unterteilen (Bild 2-5) [Ref90, S. 41f.].

Als **Informationssystem** (Steuerungs- und Überwachungssystem) werden die Einrichtungen zur Speicherung, Verarbeitung, Verwaltung und zum Austausch von Informationen bezeichnet. Das Ziel ist die Abwicklung des Fertigungsablaufs. Beispiele sind Standard-Rechner, Industrie-PCs sowie Software-Programme, z. B. für die Bereitstellung von Steuerungsprogrammen [Ref90, S. 42].

Das **Materialflusssystem** besteht aus Fördermitteln und Förderhilfsmitteln, dessen Aufgaben sind Transport, Lagerung, Bereitstellung und Handhabung der benötigten Werkstücke, Werkzeuge, Vorrichtungs- und Spannsysteme, Werkstückmess- und Prüfsysteme. Weiterhin versorgt es die Bearbeitungs- und Montagesysteme mit Hilfsstoffen und entsorgt die Abfälle [Ref90, S. 42].

³ Der Kraftschluss wird auch als Reibschluss bezeichnet [HB11, S. 67].

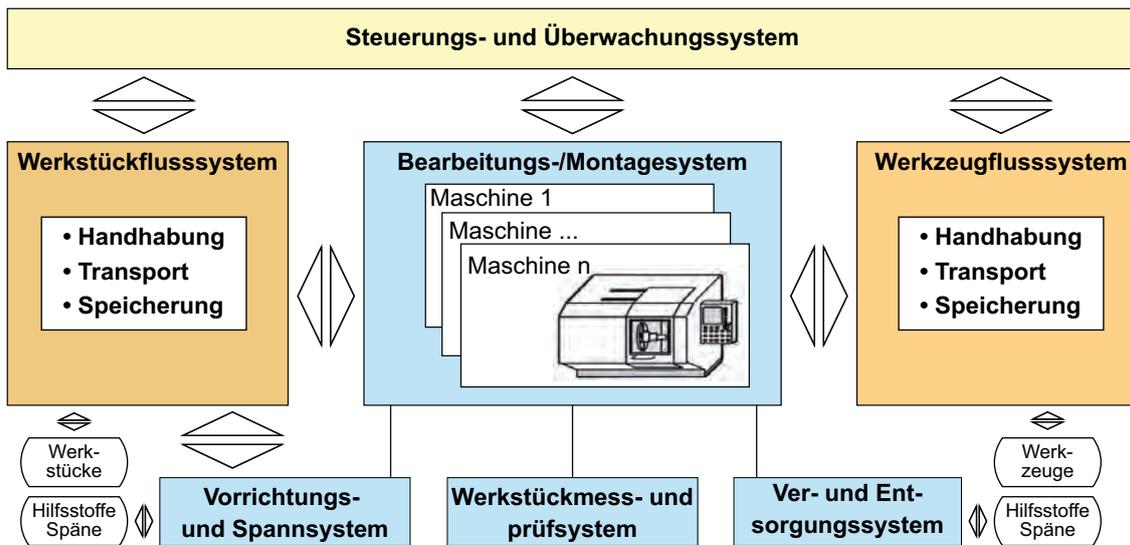


Bild 2-5: Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach [Eve89, S. 55]

Das **Bearbeitungs-/Montagesystem** umfasst alle Betriebsmittel zur Erfüllung der Produktionsfunktion. Dies sind z. B. Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen und Prüfmittel [Ref90, S. 42]. Im Rahmen dieser Arbeit werden unter Bearbeitungssystemen Betriebsmittel zur Teilefertigung und unter Montagesystemen Betriebsmittel zur Montage verstanden. Die Begriffe Montagesystem und Montageanlage werden synonym verwendet.

2.1.10 Montageablaufstruktur – Montagevorranggraph

Die **Montageablaufstruktur** beschreibt die logische und zeitliche Reihenfolge der benötigten Teilfunktionen zur Montage eines Produkts. Die am häufigsten eingesetzte Darstellungsform der Montageablaufstruktur ist der netzplanähnliche **Montagevorranggraph**⁴ [BAD+86, S. 94f.], [Fri89, S. 81ff.], [Bul95, S. 95], [Fra03, S. 32], [Muc05, S. 25f.]. Der Montagevorranggraph unterstützt die Strukturierung der Teilfunktionen und die Zuordnung zu Betriebsmitteln und Arbeitsplätzen [Wes05, S. 162].

Ein Beispiel ist in Bild 2-6 dargestellt. Die Knoten stellen Teilfunktionen der Montage dar, sogenannte Teilverrichtungen, die nicht mehr sinnvoll weiter unterteilt werden können [Ref90, S. 157f.]. Über Kanten werden die logischen und zeitlichen Abhängigkeitsbeziehungen beschrieben. Teilverrichtungen werden immer zum zeitlich frühesten Ausführungszeitpunkt eingetragen [BAD+86, S. 94f.], [Bul95, S. 95], [Wes05, S. 163]. Zeitgrößen (z. B. Vorgangsdauer, frühester/spätester Anfangs- oder Endtermin) sowie Stückzahlen finden im Montagevorranggraph keine Berücksichtigung [Bul95, S. 103], [Fra03, S. 33f.].

⁴ Für eine Übersicht graphenbasierter Ansätze zur Beschreibung der Montageablaufstruktur siehe [Sei98, S. 38].

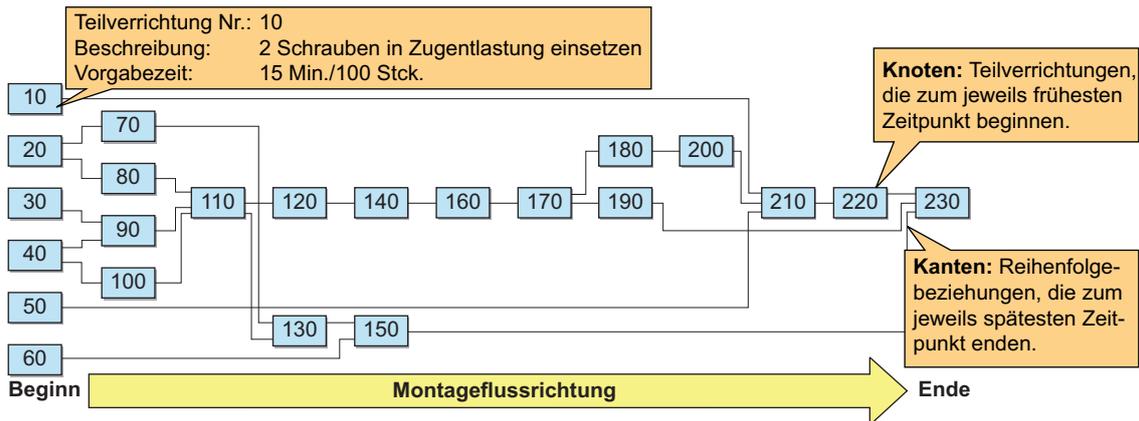


Bild 2-6: Montagevorranggraph nach [BAD+86, S. 95]

2.2 Der Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess bezeichnet im Produktlebenszyklus den Zeitraum bis zum Serienanlauf (vgl. Kap. 2.1.1) und umfasst die Phasen strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14]. Bei der Betrachtung dieser Phasen sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- **Keine sequenzielle Reihenfolge:** Die Phasen lassen sich in der Praxis nicht streng sequenziell abarbeiten. Sie unterliegen Iterationsschleifen und gegenseitigen Abhängigkeiten. Eine Beschreibung als Folge von Aufgaben in einem Phasen-Meilenstein-Diagramm ist nur unter idealisierten Annahmen möglich.
- **Keine klare Abgrenzung der Phasen:** Die einzelnen Phasen sind z. T. nicht trennscharf und eine eindeutige Abgrenzung fällt schwer. Beispielsweise ist der Übergang von der strategischen Produktplanung in die Produktentwicklung im Bereich der Konzipierung nicht eindeutig festgelegt. Ein weiteres Beispiel ist die Abschätzung der Herstellkosten, die in der strategischen Produktplanung im Rahmen der Geschäftsplanung erfolgt. Diese kann nur durchgeführt werden, wenn die ersten Fertigungskonzepte in der Produktionssystementwicklung bereits festgelegt wurden.

Nach GAUSEMEIER ist der Produktentstehungsprozess daher als ein Wechselspiel von Aufgaben zu betrachten. Diese lassen sich in drei Zyklen gliedern (Bild 2-7) [GPW09, S. 38ff.].

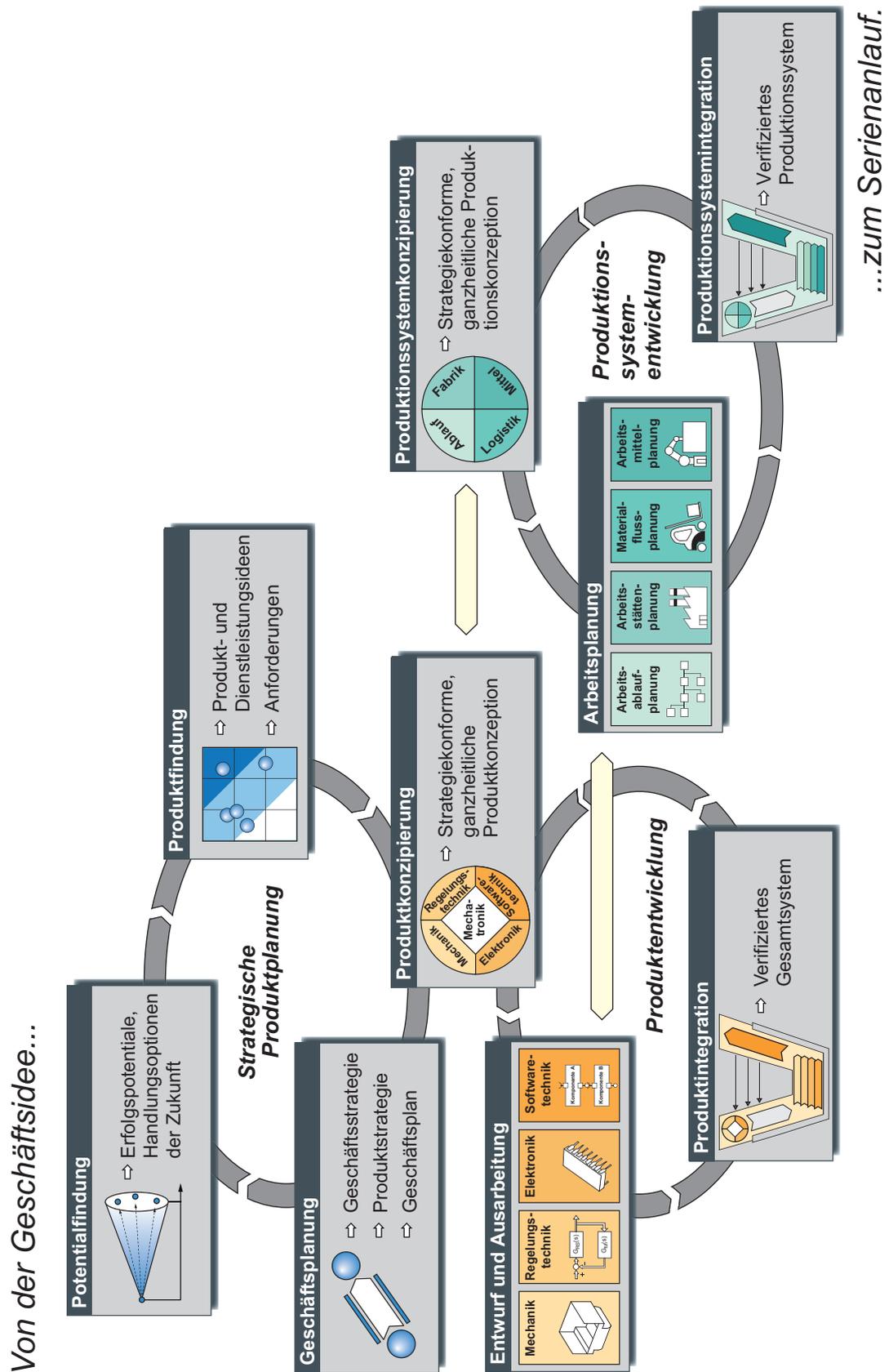


Bild 2-7: 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung [NBG13, S. 619]

In der **strategischen Produktplanung** wird ein erfolgversprechendes Produktkonzept erarbeitet. Die Phase umfasst die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Produktkonzipierung sowie Geschäftsplanung. Zunächst werden im Rahmen der Potentialfindung die zukünftigen Erfolgspotentiale identifiziert und entsprechende Handlungsoptionen entwickelt. Zur Erschließung der Erfolgspotentiale werden im Rahmen der Produktfindung neue Produkt- und Dienstleistungsideen gesucht und ausgewählt. Des Weiteren werden Anforderungen an diese definiert. Darauf aufbauend wird in der Produktkonzipierung ein erstes technisches Konzept erarbeitet. Abschließend entsteht im Rahmen der Geschäftsplanung die Geschäfts- und Produktstrategie sowie der Geschäftsplan [GLS04, S. 8f.], [GPW09, S. 39].

Die **Produktentwicklung** umfasst die Produktkonzipierung, den domänenspezifischen Entwurf und die Ausarbeitung sowie die abschließende Integration. Die Konzipierung bildet die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung. Auf Basis des ersten technischen Konzepts wird eine fundierte Konzeption des Produkts erarbeitet. In der Phase Entwurf und Ausarbeitung wird die Konzeption innerhalb der Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik konkretisiert. Die fachdisziplinspezifischen Ergebnisse werden im Rahmen der Produktintegration zur Gesamtlösung zusammengeführt [GPW09, S. 40].

Die Aufgabenbereiche der **Produktionssystementwicklung** sind die Produktionssystemkonzipierung, die Arbeitsplanung sowie die Produktionssystemintegration. Auf Basis des Produktkonzepts wird in der Produktionssystemkonzipierung eine strategiekonforme, ganzheitliche Produktionssystemkonzeption erstellt. Diese bildet den Ausgangspunkt für die Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsplanung. Hierbei werden die vier Aspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Materialflussplanung und Arbeitsmittelplanung von den entsprechenden Abteilungen bearbeitet. Analog zu der Produktentwicklung werden die Teilergebnisse abschließend zu einer Gesamtlösung integriert. Das Resultat ist ein verifiziertes Produktionssystem [GPW09, S. 40].

In dem Modell ist die Produktionssystementwicklung parallel zur Produktentwicklung angeordnet. Die beiden Phasen sind im Wechselspiel und eng aufeinander abgestimmt voranzutreiben. Nur durch diese integrative Entwicklung kann sichergestellt werden, dass alle Potentiale ausgenutzt werden, um ein leistungsfähiges und kostengünstiges Erzeugnis zu entwickeln. Dies gilt insb. bei Produkten der Mechatronik (z. B. enge räumliche Integration von Mechanik und Elektronik) und für den Einsatz neuer Hochleistungswerkstoffe (z. B. Hybridsysteme aus unterschiedlichen Materialien). In beiden Fällen sind wechselseitige Abhängigkeiten zwischen dem Produktkonzept und potentiellen Produktionstechnologien zu berücksichtigen [GPW09, S. 40], [GN12, S. 15ff.]:

- Bereits die Prinziplösung wird durch die in Betracht gezogenen Fertigungs- und Montagetechnologien determiniert [DGJ+12, S. 1421]. Beispielsweise bestimmt bei MID-Bauteilen die eingesetzte Bestückungstechnologie die minimalen Randabstände der elektronischen Bauteile.

- Neue Produktkonzepte können die Entwicklung neuer Fertigungs- bzw. Montagetechnologien erforderlich machen. Ein Beispiel ist die Integration von Sensoren in Hybridbauteile aus neuartigen Materialkombinationen.

Aus den genannten Gründen besteht ein hoher Abstimmungsbedarf zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung. Dies gilt bereits für die Konzipierung, deren Resultat die Konzepte von Produkt und Produktionssystem sind. Sie bilden die Grundlage für frühzeitige Analysen (z. B. der Herstellkosten oder der Robustheit gegenüber Störungen) und sind der Ausgangspunkt für die weitere wechselseitige Konkretisierung. Die beiden horizontalen Pfeile in Bild 2-7 visualisieren diese Abhängigkeiten [GPW09, S. 40], [GN12, S. 17].

Einordnung der zu entwickelnden Systematik: Im Rahmen dieser Arbeit wird das 3-Zyklen Modell als Basismodell des Produktentstehungsprozesses verwendet. Produkt und Produktionssystem werden demnach von Beginn an integrativ entwickelt. Die zu erarbeitende Systematik ordnet sich in diesem Modell in den beiden Konzipierungsphasen ein. Sie konkretisiert die montageorientierte Produktkonzipierung sowie den Übergang zu einem ersten Konzept des Produktionssystems mit dem Fokus auf Montageprozesse. Hierzu stellt sie das Vorgehen sowie dedizierte Methoden bereit.

2.3 Mechatronische Systeme

Bei heutigen technischen Erzeugnissen, z. B. des Maschinenbaus, der Automobilindustrie oder der Medizintechnik, handelt es sich in der Regel um mechatronische Systeme. Sie beruhen auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik/Elektrik, Regelungs- und Softwaretechnik. Der Begriff **Mechatronik** bzw. das **mechatronische System** ist ein Kunstwort aus Mechanik (mechanics) und Elektronik (electronics). Dieses wurde erstmals Ende der 60er Jahre von KIKUCHI für die Erweiterung mechanischer Systeme durch elektronische Komponenten verwendet [VDI2206, S. 13f.], [VWB+09, S. 103f.]. Das heutige Mechatronik-Verständnis beruht auf der Erweiterung und Definition von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA [HTF96, S. 1]. Die VDI-Richtlinie 2206 übersetzt diese folgendermaßen:

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung“ [VDI2206, S. 14].

Ein mechatronisches System setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen. Das **Grundsystem** ist in der Regel ein mechanisches, elektromechanisches, elektrisches, fluidtechnisches oder thermodynamisches System bzw. eine Kombination. Die **Sensoren** nimmt aktuelle Größen (Messwerte) des Grundsystems und der Umgebung auf und stellt diese zur Verfügung. Auf Basis der Messwerte ermittelt die **Informationsverarbeitung** die Stellwerte für die Aktoren des Systems. Die **Aktoren** setzen die Stellwerte

um und greifen dazu direkt in das Grundsystem ein. [VDI2206, S. 14f.], [VWB+09, S. 104f.]. Über Flüsse sind die Elemente des mechatronischen Systems miteinander verbunden. Hierbei werden drei Flussarten unterschieden. **Stoffflüsse** kennzeichnen den Austausch von festen Körpern sowie flüssigen oder gasförmigen Medien. **Energieflüsse** beschreiben die Übertragung von Energien (z. B. mechanische, elektrische oder thermische Energie) sowie entsprechende Größen (z. B. Kraft, Strom). **Informationsflüsse** bilden den Austausch von Messgrößen, Steuerinformationen oder Daten ab [PBF+07, S. 43]. Die beschriebene Grundstruktur stellt den Grundbaustein mechatronischer Systeme dar. Komplexe mechatronische Systeme setzen sich in der Regel aus verschiedenen mechatronischen **Modulen** zusammen. Diese bestehen aus Elementen, die spezifische Funktionalitäten erfüllen. Hierdurch ergibt sich eine **Hierarchisierung** des Systems [LKS00, S. 1ff.], [VDI2206, S. 16].

Die Entwicklung mechatronischer Systeme ist durch starke Wechselwirkungen und Abhängigkeiten geprägt. Diese bestehen einerseits zwischen den Bauteilen und Baugruppen aufgrund der räumlichen Integration, andererseits existieren Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und dem zugehörigen Produktionssystem. Beispielsweise bestehen zwischen der Aufbau- und Verbindungstechnik, den gewählten Werkstoffen und den Fertigungstechnologien Abhängigkeiten, die bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung Berücksichtigung finden müssen [Gau06, S. 18f.].

2.4 Entwicklung mechatronischer Produkte

Die integrative Montagekonzipierung ist die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung. Im Folgenden wird die Produktentwicklung vorgestellt, da diese den Ausgangspunkt bildet. Inhalt von Kapitel 2.4.1 ist der grundsätzliche Ablauf der Produktentwicklung. Dieser wird in den Entwurfsraum eingeordnet und die Hauptphasen werden beschrieben. In Kapitel 2.4.2 wird die Entwicklungsmethodik der VDI-Richtlinie 2221 für technische Systeme und Produkte vorgestellt. Sie umfasst das Vorgehen von der Entwicklungsaufgabe bis zur fertigen Produktdokumentation, inkl. Fertigungsunterlagen. Abschließend wird in Kapitel 2.4.3 die Entwicklungsmethodik der VDI-Richtlinie 2206 erläutert. Diese ist auf die Besonderheiten bei der Entwicklung mechatronischer Systeme ausgerichtet.

2.4.1 Entwicklung als Problemlösungsprozess

Wie der Produktentstehungsprozess ist auch der Produktentwicklungsprozess keine sequentielle Abfolge von Arbeitsschritten [GPW09, S. 40]. Nach der Denkpsychologie entsprechen streng linear ablaufende Vorgehensweisen nicht dem menschlichen Vorgehen beim Problemlösen [Dyl90, S. 104f.], [VDI2221, S. 5]. Der Mensch geht beim Entwickeln und Konstruieren weder arbeitsschrittrein noch teilaufgabenrein vor [Hac02, S. 15]. Die Abläufe in der Produktentwicklung folgen dem Vorgehen des Problemlösens und bestehen aus einer Folge von Synthese- und Analyseschritten [Lin07, S. 38].

Zur Strukturierung des Entwicklungsgeschehens führt GAUSEMEIER das Modell des Entwurfsraums ein (Bild 2-8). Dieser wird durch die drei Dimensionen *Abstraktion – Konkretisierung*, *Detaillierung – Generalisierung* sowie *Systemsicht* aufgespannt. Die Systemsicht orientiert sich am Y-Modell der Mikroelektronik [BGH+96, S. 53] und gliedert sich in *Struktur*, *Verhalten* und *Gestalt*. In den Entwurfsraum werden die Synthese- und Analyseschritte bei der Entwicklung mechatronischer Produkte eingeordnet.

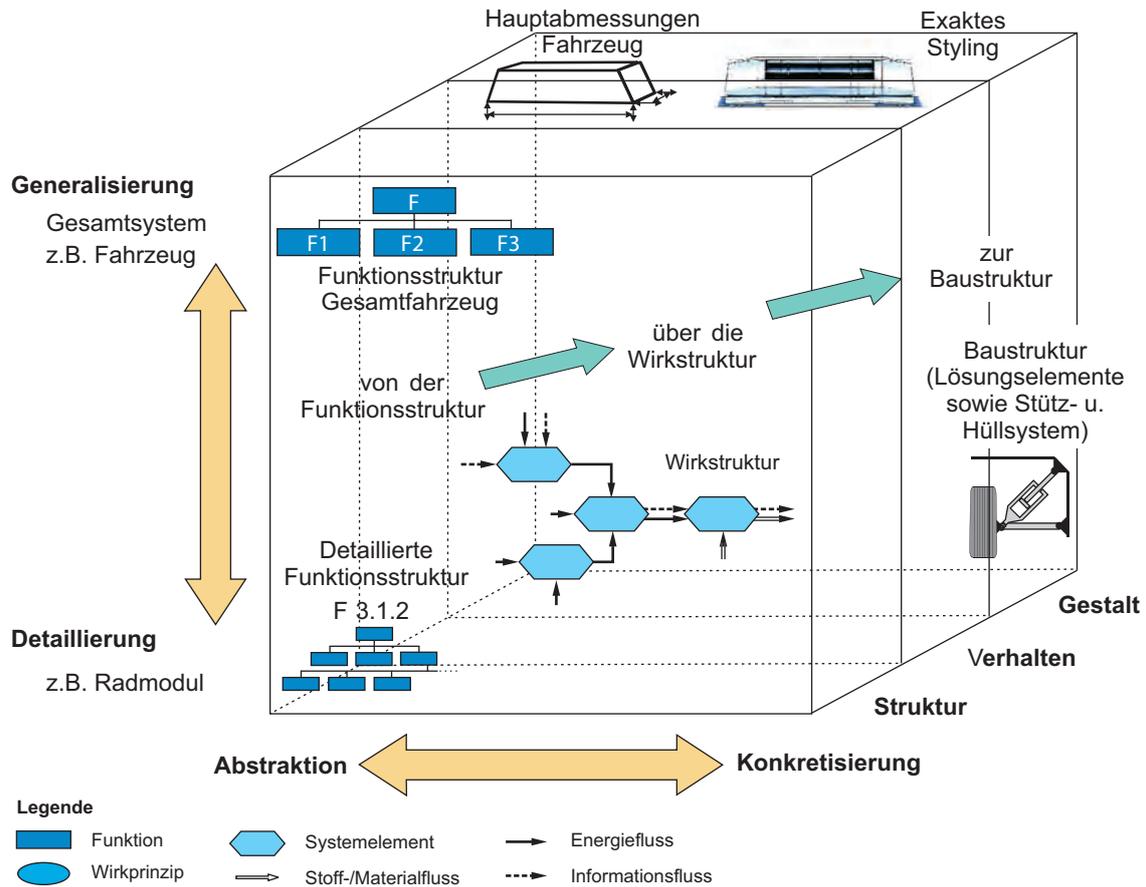


Bild 2-8: Entwurfsraum der Produktentwicklung [GPW09, S. 41]

Das generelle Vorgehen der Produktentwicklung im Entwurfsraum folgt den Grundsätzen vom *Abstrakten zum Konkreten*, vom *Generellen zum Detail* und von der *Funktions- zur Baustuktur*. Der Entwickler bearbeitet in einem Wechselspiel aus Synthese- und Analyseschritten die einzelnen Aspekte der Systemsicht (Struktur, Verhalten, Gestalt). Hierbei wechselt er je nach Bedarf die Detaillierungs- und Konkretisierungsebenen und springt zwischen diesen hin und her. In Abhängigkeit von Entwicklungsaufgabe, Randbedingungen und Zielen ergeben sich somit spezifische Verläufe des Entwicklungsprozesses im Entwurfsraum [GPW09, S. 40f.]. Die Dimension der Konkretisierung wird in die vier Hauptphasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* gegliedert [Hub76, S. 10], [Dyl90, S. 51], [PBF+07, S. 194]:

Planen und Klären der Aufgabe: Den Ausgangspunkt der Produktentwicklung bildet die Aufgabenstellung. Diese wird vom Vertrieb oder anderen verantwortlichen Berei-

chen festgelegt. Ziel der Phase sind Informationen über die Anforderungen, die an das zu entwickelnde Produkt gestellt werden. Hierzu sind die entsprechenden Informationen zu beschaffen und deren genaue Bedeutung festzulegen (z. B. Fest- oder Wunschforderung, Wertebereiche). Das Resultat der Phase ist die Anforderungsliste, die im Entwicklungsverlauf kontinuierlich aktualisiert werden muss [PBF+07, S. 195].

Konzipieren: In dieser Phase erfolgt eine Abstraktion der Aufgabenstellung auf die wesentlichen Probleme. Die Gesamtfunktion des Systems wird in Teilfunktionen untergliedert. Für die Umsetzung dieser Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien gesucht und in einer Wirkstruktur zusammengeführt. Hierbei wird auch das Zusammenwirken der Wirkprinzipien festgelegt. Weiterhin sind erste Festlegungen zur Gestalt (z. B. Grundabmessungen, Werkstoff), zur Anordnung sowie zur Verbindung der Systemelemente zu treffen. Das Ergebnis ist die Prinziplösung. Aufgrund der meist unvollständigen Informationen in dieser frühen Entwicklungsphase sind grobe bzw. überschlägige Modelle ausreichend [PBF+07, S. 195f.], [VWB+09, S. 129], [PL11, S. 132].

Entwerfen: Auf Basis der Prinziplösung erfolgt die Festlegung der Lösung. Hierbei wird die Gestalt des Systems unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen erarbeitet. Nach Abschluss dieser Phase liegt ein maßstäblicher Entwurf vor [PBF+07, S. 196f.].

Ausarbeiten: In dieser Phase wird der Entwurf weiter konkretisiert (z. B. Form, Oberfläche, Werkstoff, Herstellbarkeit) und verbindlich finalisiert. Das Resultat sind die Fertigungsunterlagen für die Herstellung des Systems. Dies umfasst Fertigungszeichnungen, Stücklisten, Fertigungs- und Montagevorschriften etc. [PBF+07, S. 197f.].

2.4.2 Entwicklungsmethodik für technische Systeme und Produkte

Ziel der Konstruktionswissenschaft sind Regeln und Vorgehensweisen zur Entwicklung technischer Systeme. Hierzu werden mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden der Systemaufbau sowie die Beziehungen zur Systemumwelt analysiert [PBF+07, S. 10]. Einen umfangreichen Überblick der Konstruktionsforschung liefern MÜLLER [Mül90, S. 77ff.] und PAHL/BEITZ [PBF+07, S. 11ff.].

Als Konstruktionsmethodik wird ein „geplantes Vorgehen mit konkreten Handlungsanweisungen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme“ bezeichnet [PBF+07, S. 10]. Die Grundlage bilden Erkenntnisse aus der Konstruktionswissenschaft sowie der Denkpsychologie. Sie umfasst Handlungsstrategien (Regeln und Prinzipien), Methoden und Vorgehensmodelle und schafft ein einheitliches Begriffsverständnis. Die Vorteile des methodischen Konstruierens liegen in einer Zeit- und Kostenersparnis durch die Vermeidung unnötiger Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess, der Wiederverwendung von Lösungen und dem Erkennen von Anwendungsmöglichkeiten für bewährte Lösungen [PBF+07, S. 10f.].

Als allgemeingültiger und branchenunabhängiger Leitfaden für das methodische Entwickeln und Konstruieren findet die VDI-Richtlinie 2221 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* [VDI2221] breite Anwendung [PBF+07, S. 21], [Ehr09, S. 252], [Lem09, S. 34]. Die Richtlinie wird durch die VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1 *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien* [VDI2222-1] und Blatt 2 *Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen* [VDI2222-2] sowie der VDI-Richtlinie 2223 *Methodisches Entwerfen technischer Produkte* [VDI2223] detailliert und ergänzt.

Aufgrund der angestrebten allgemeinen Anwendbarkeit des Vorgehens handelt es sich bei der VDI-Richtlinie 2221 um einen groben Ablauf, bestehend aus sieben Schritten (Bild 2-9). In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung sind die Schritte vollständig oder ggf. nur teilweise zu durchlaufen. Neu gewonnene Erkenntnisse können Rücksprünge auf vorangegangene Arbeitsschritte erforderlich machen. Bei der Entwicklung von Serienprodukten werden die Schritte mehrmals iterativ durchlaufen (Labormuster, Prototyp, Serienprodukt) [VDI2221, S. 8f.]. Die sieben Schritte können den in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Hauptphasen zugeordnet werden.

Klären und präzisieren der Aufgabe: Die Aufgabenstellung wird aus Sicht des Konstrukteurs formuliert und ggf. strukturiert. Die vom Kunden oder der Produktplanung vorgegebenen Anforderungen werden präzisiert und ergänzt, bspw. um unternehmensinterne Anforderungen. Informationslücken müssen identifiziert und geschlossen werden. Als Resultat liegt die Anforderungsliste vor. Sie bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung und ist stets aktuell zu halten [VDI2221, S. 9f.].

Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen: Zunächst wird die Gesamtfunktion des Systems identifiziert und diese in die wesentlichen Teilfunktionen untergliedert. Die Strukturierung und Dokumentation der Teilfunktion erfolgt bspw. in Form einer Funktionshierarchie oder Funktionsstruktur [VDI2221, S. 10].

Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen: Für die Erfüllung der Teilfunktionen werden geeignete Lösungsprinzipien gesucht. Kataloge bekannter Lösungsprinzipien für häufig wiederkehrende Funktionen unterstützen diese Suche⁵. Die Lösungsprinzipien werden über den zugrunde liegenden Effekt sowie Wirkgeometrie, Wirkort und Werkstoff charakterisiert. Analog zur Funktionsstruktur werden die identifizierten Lösungsprinzipien in der Wirkstruktur verknüpft. Das Ergebnis dieser Phase ist die Prinziplösung [VDI2221, S. 10], [VDI2222-1, S. 6f.].

Gliederung in realisierbare Module: Im Rahmen dieser Phase wird das zu entwickelnde System in Teilsysteme und Module gegliedert. Insbesondere bei komplexen Produkten ermöglicht eine Modularisierung vor den arbeitsintensiven Gestaltungsschritten eine effiziente Aufteilung der Arbeitsinhalte und die Identifikation relevanter Ent-

⁵ Vgl. das Konstruieren mit Konstruktionskatalogen nach ROTH [Rot82], [Rot96], [Rot00], [Rot01].

wicklungsschwerpunkte. Die Modularisierung kann z. B. konstruktions-, montage- oder instandhaltungsorientiert erfolgen, wobei die Art der Gliederung von der spezifischen Zielstellung abhängig ist. Das Resultat der Phase ist eine modulare Struktur des Systems [VDI2221, S. 10], [VDI2223, S. 19f.].

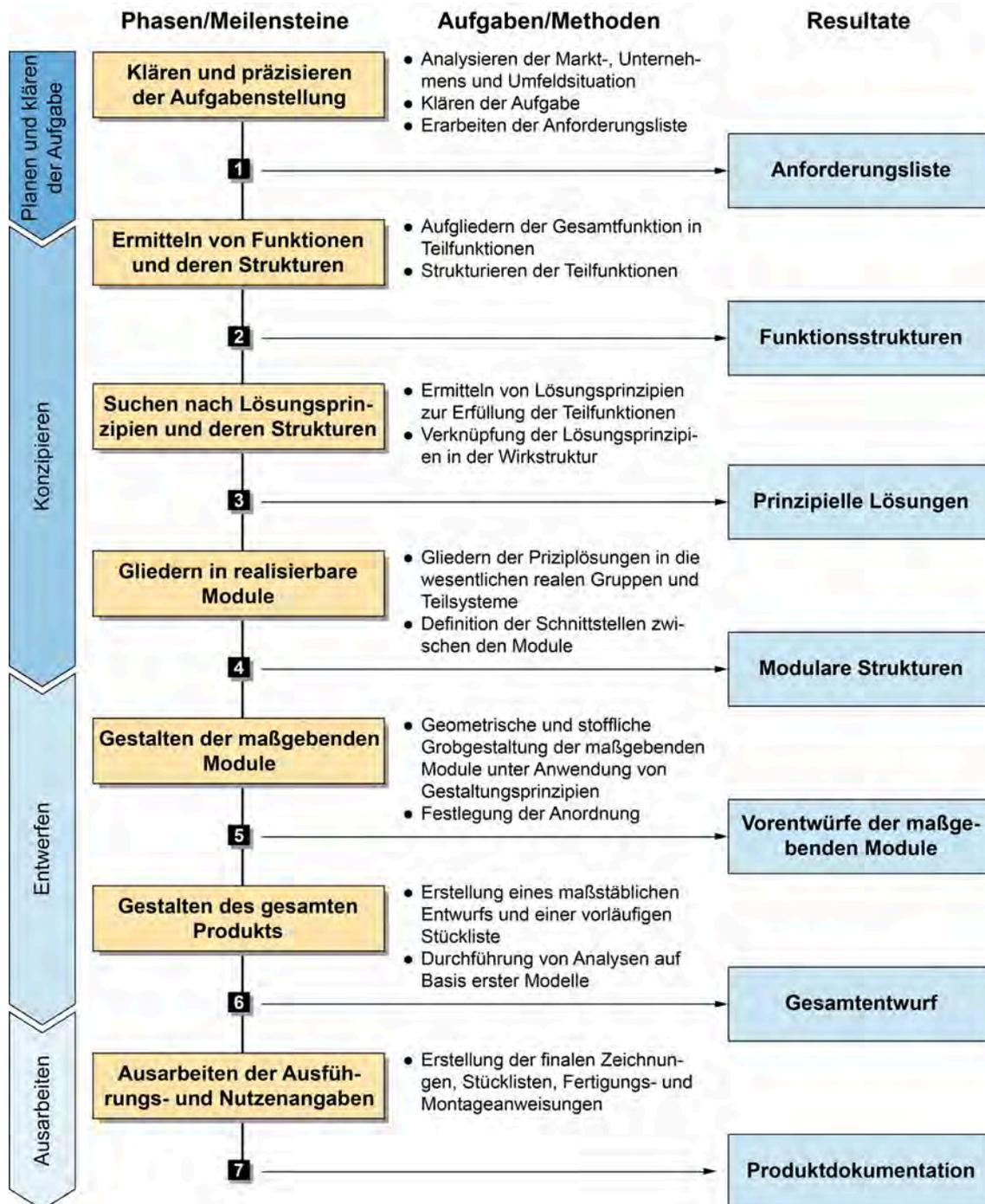


Bild 2-9: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [VDI2221, S. 9], [PBF+07, S. 198]

Gestaltung der maßgeblichen Module: Die für die Systemoptimierung maßgeblichen Module werden unter geometrischen, stofflichen und/oder programmtechnischen Ge-

sichtspunkten gestaltet. Dies erfolgt so weit, bis das Gestaltungsoptimum erkannt und ausgewählt werden kann. Bei der Modulgestaltung sind grundlegende Gestaltungsprinzipien⁶ einzuhalten. Das Arbeitsergebnis sind Vorentwürfe der maßgeblichen Module, z. B. grobe maßstäbliche Zeichnungen [VDI2221, S. 11], [VDI2223, S. 21ff.].

Gestalten des gesamten Produkts: Ausgehend von den Vorentwürfen werden die noch nicht betrachteten Elemente ergänzt bzw. bestehende Elemente konkretisiert und detailliert. Weiterhin werden die Zusammenhänge zwischen den Systembestandteilen und Modulen festgelegt. Das Produkt erhält somit seine endgültige Gestalt. Als Resultat dieser Phase liegt ein Gesamtentwurf vor, welcher die Gestaltfestlegungen in Form von Zeichnungen und vorläufigen Stücklisten umfasst [VDI2221, S. 11], [VDI2223, S. 24ff.].

Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben: Inhalt dieses Arbeitsschrittes ist die Erstellung der endgültigen Produktdokumentation, z. B. Fertigungszeichnungen, Stücklisten, Fertigungs- und Montagevorschriften sowie Betriebsanleitungen. Die Arbeitsinhalte dieses Schrittes überschneiden sich z. T. mit denen der vorangegangenen Phase [VDI2221, S. 11].

2.4.3 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Mit dem Wandel von klassisch mechanischen hin zu mechatronischen Produkten änderte sich auch die Arbeitsweise im Entwicklungsprozess. Die Besonderheiten bei der Entwicklung mechatronischer Systeme liegen in der Interdisziplinarität, der hohen Produktkomplexität sowie der Notwendigkeit des Virtual Prototyping [Ehr09, S. 269]. Es fehlte jedoch eine eigenständige, auf mechatronische Produkte ausgerichtete Entwicklungsmethodik. Die Entwicklung erfolgte meist fachdisziplinspezifisch mit den jeweils etablierten Vorgehensweisen und Methoden. Hierdurch kam es zu einem sequenziellen Vorgehen bei der Entwicklung. Zunächst wurde die mechanische Grundstruktur entwickelt, welche anschließend um Elektrotechnik und Informationsverarbeitung ergänzt wurde [Ise99, S. 10]. Die Folge waren teiloptimierte Produkte sowie zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess [VDI2206, S. 22], [Möh05, S. 231].

Um diese Lücke zu schließen, entstand eine Vielzahl von Vorgehensweisen und Methoden für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Eine Übersicht und Klassifikation gibt MÖHRINGER [Möh04, S. 14ff.]. Als übergeordnete Methodik zur Entwicklung mechatronischer Systeme hat sich die VDI-Richtlinie 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* durchgesetzt [Ehr09, S. 270f.]. Sie beschreibt ein flexibles Vorgehensmodell, das sich aus drei Elementen zusammensetzt [VDI2206, S. 26]:

- Auf **Mikroebene der allgemeine Problemlösungszyklus** entsprechend des „Systems Engineering“ (vgl. [DH02, S. 190f.]).

⁶ Beispiele für Gestaltungsrichtlinien finden sich bei Pahl/Beitz [PBF+07], SPUR/STÖFERLE [SS86] und den Ansätzen des Design-for-X nach ANDREASEN ET AL. [AKL83] und BOOTHROYD ET AL. [BDK11].

- Auf **Makroebene das V-Modell** aus der Softwareentwicklung, das auf die Anforderungen der Mechatronik angepasst ist (vgl. [BD93, S. 15ff.], [FKM00, S. 41f.]).
- **Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte** in den Bereichen Systementwurf, Modellbildung und -analyse, domänenspezifischer Entwurf, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung.

2.4.3.1 Problemlösungszyklus als Mikrozyklus

Der Problemlösungszyklus beschreibt das allgemeine Vorgehen bei der Lösung vorhersehbarer Teilaufgaben sowie plötzlich auftretender Probleme. Der Zyklus umfasst die folgenden fünf Schritte, die zyklisch immer wieder durchlaufen werden. Ausgangssituation, Ziele und Randbedingungen ändern sich im Verlauf der Entwicklung kontinuierlich [VDI2206, S. 27ff.].

Situationsanalyse bzw. Zielübernahme: Externe Ziele werden übernommen und anschließend eine Situationsanalyse durchgeführt. Ist die Ausgangssituation unklar, erfolgt eine Situationsanalyse gefolgt von einer Zielformulierung [VDI2206, S. 27].

Analyse und Synthese: In einem Wechsel von Synthese- und Analyseschritten erfolgt die Lösungssuche. Das Resultat sind Lösungsalternativen [VDI2206, S. 27f.].

Analyse und Bewertung: Es erfolgt die Evaluation der erarbeiteten Lösungsalternativen mittels Berechnungen, Simulationen, Versuchen etc. [VDI2206, S. 28].

Entscheidung: In diesem Schritt wird entschieden, ob die gefundenen Lösungen im Sinne der gestellten Ziele befriedigend sind. Ist dies nicht der Fall, erfolgt ein Rücksprung auf die Situationsanalyse bzw. Zielübernahme. Andernfalls wird eine bzw. werden mehrere alternative Lösungen ausgewählt [VDI2206, S. 28].

Planung des weiteren Vorgehens: Meist schließt sich quasi fließend ein weiterer Problemlösungszyklus an. Die Grundlage bildet die gewählte Lösung [VDI2206, S. 28f.].

2.4.3.2 V-Modell auf der Makroebene

Das generelle Vorgehen für den Entwurf mechatronischer Systeme ist im V-Modell allgemein beschrieben. Die Tätigkeitsfolge ist je nach Aufgabenstellung, Entwurfsfortschritt, Art und Komplexität des zu entwickelnden Produkts fallweise auszuprägen und ggf. mehrfach iterativ zu durchlaufen. Vordefinierte **Prozessbausteine** unterstützen wiederkehrende Teilschritte. Das V-Modell als einfacher Makrozyklus sowie einen Prozessbaustein am Beispiel des Systementwurfs zeigt Bild 2-10 [VDI2206, S. 29ff.].

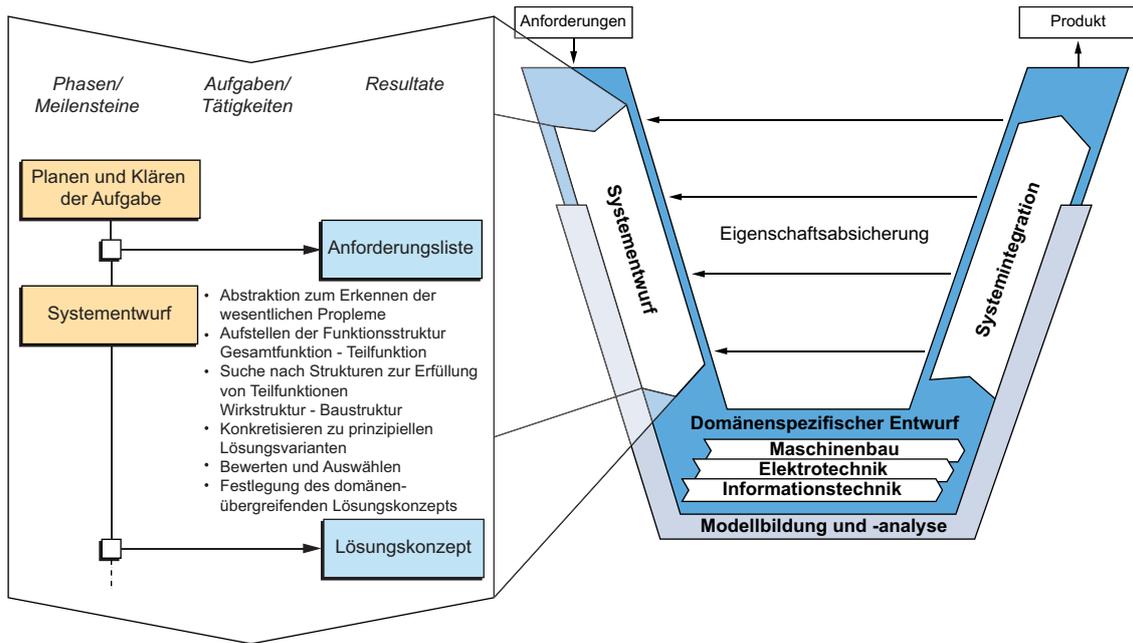


Bild 2-10: V-Modell als Makrozyklus und ein Prozessbaustein [VDI2206, S. 32]

Anforderungen: Die Aufgabenstellung eines konkreten Entwicklungsauftrags wird präzisiert und in Form von Anforderungen beschrieben. Diese bildet den Bewertungsmaßstab für das zu entwickelnde Produkt [VDI2206, S. 29].

Systementwurf: Der Systementwurf entspricht der Hauptphase Konzipieren (vgl. Kap. 2.4.1). Zunächst wird die übergeordnete Gesamtfunktion des Systems identifiziert und in Teilfunktionen untergliedert. Dies erfolgt solange bis den Teilfunktionen geeignete Wirkprinzipien⁷ bzw. Lösungselemente⁸ zugeordnet werden können. Als Resultat liegt ein fachdisziplinübergreifendes Lösungskonzept vor. Dieses beschreibt die physikalische und logische Wirkungsweise des Systems [VDI2206, S. 29f.].

Domänenspezifischer Entwurf: Ausgehend vom Lösungskonzept erfolgt die weitere Konkretisierung innerhalb der Fachdisziplinen. Hierbei kommen die disziplinspezifischen Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge zum Einsatz [VDI2206, S. 30].

Systemintegration: Die Ergebnisse der Fachdisziplinen werden in ein Gesamtmodell integriert. Auf dieser Basis wird das Zusammenwirken untersucht [VDI2206, S. 30].

Eigenschaftsabsicherung: Durch einen kontinuierlichen Abgleich der Entwicklungsergebnisse wird sichergestellt, dass die realen mit den geforderten Systemeigenschaften

⁷ Ein Wirkprinzip charakterisiert abstrakt die prinzipielle Lösung zur Erfüllung einer Funktion. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen einem physikalischen Effekt sowie den geometrischen/stofflichen Merkmalen [PBF+07, S. 54].

⁸ Bereits realisierte und bewährte Lösungen zur Funktionserfüllung werden als Lösungselemente bezeichnet. In der Regel handelt es sich um Module oder Baugruppen (z. B. Zukauf-, Katalog- oder Normteile) [GEK01, S. 36], [FGK+04, S. 57].

übereinstimmen. Die Bewertungsgrundlage bilden die Anforderungen sowie das spezifizierte Lösungskonzept [VDI2206, S. 30].

Modellbildung und -analyse: Parallel zu den Entwicklungsphasen werden rechnerinterne Modelle erstellt. Diese ermöglichen Untersuchungen der Systemeigenschaften mit Hilfe von Analyse- und Simulationswerkzeugen [VDI2206, S. 30].

Produkt: Nach dem Durchlaufen des Makrozyklus liegt als Ergebnis das Produkt vor. Hierunter ist nicht ausschließlich ein fertiges, reales Produkt zu verstehen. Vielmehr handelt es sich um unterschiedliche Konkretisierungsstufen des zu entwickelnden Systems. Mit jedem weiteren Durchlauf des Zyklus nimmt der Reifegrad zu (z. B. Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt, Serienprodukt) [VDI2206, S. 30].

Weiterhin liefert die VDI-Richtlinie Ansätze für den integrativen Entwurf von Produkt und Produktionssystem und den modellbasierten Systementwurf. Sie gibt einen Überblick der benötigten Werkzeuge und liefert Hinweise zur Organisation der Produktentwicklung [VDI2206, S. 41ff.].

2.4.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Aufgrund der Produktkomplexität und der Interdisziplinarität der Entwicklungsteams spielt die Konzipierung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme eine Schlüsselrolle. Die fachdisziplinübergreifende Beschreibung des Aufbaus und der Wirkungsweise in der Prinzipiellösung schafft ein einheitliches Verständnis und dient als Kommunikationsgrundlage der beteiligten Fachleute. Weiterhin bildet sie den Ausgangspunkt für die Konkretisierung innerhalb der einzelnen Fachdisziplinen.

Im Rahmen der Konzipierung werden u. a. erste Festlegungen getroffen, die sich auf die Entwicklung des Produktionssystems und insb. auf die Planung der Montage auswirken. Dies sind Aspekte der Produktstrukturierung, der Bauweise (integral/differential), der Gestalt oder des Werkstoffs. Wurden Lösungselemente ausgewählt, sind konkrete Bauteile oder Baugruppen bereits bekannt. Die Prinzipiellösung bildet somit den geeigneten Ausgangspunkt für eine möglichst frühzeitige Konzipierung der Montage.

2.5 Entwicklung von Produktionssystemen

In produzierenden Industrieunternehmen ist die **Arbeitsvorbereitung** das Bindeglied zwischen der Produktentwicklung (Entwicklung/Konstruktion) und dem Produktionsbereich. Nach AWF/REFA⁹ sind die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung die Planung, Steuerung und Überwachung der wirtschaftlichen Herstellung von Erzeugnissen [AR68,

⁹ AWF: Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung e.V. (heute: Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung) / REFA: Verband für Arbeitsstudien e.V. (heute: Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung)

S. 5f.]. Die Arbeitssteuerung umfasst die Bereiche Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung.

Nach AWF/REFA und DANGELMAIER umfasst die **Arbeitsplanung** „*alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Produktionssystems und der darin stattfindenden Produktionsprozesse*“ [AR68, S. 6], [Dan03, S. 56]. Das übergeordnete Ziel ist eine wirtschaftliche Herstellung der Produkte [Ref93a, S. 26]. Hierfür ist festzulegen, welche Werkstoffe genutzt werden und welche Fertigungsverfahren und Fertigungsmittel zum Einsatz kommen. Im Rahmen der Arbeitsplanung erfolgt die Festlegung *Was, Wie* und *Womit* gefertigt wird [Eve97, S. 3], [GPW09, S. 29f.].

Die **Arbeitssteuerung** plant, steuert und überwacht die Produktionsabläufe im Unternehmen. Dies umfasst den gesamten Auftragsabwicklungsprozess von der Bearbeitung des Angebots bzw. des Kundenauftrags bis zum Versand der fertigen Ware. Im Fokus stehen Mengen-, Termin- und Kapazitätsaspekte. Somit legt die Arbeitssteuerung fest, *Wie viel, Wann, Wo* und *durch Wen* hergestellt wird [Eve97, S. 3], [GPW09, S. 29f.].

Nach GAUSEMEIER entspricht die Produktionssystementwicklung im wesentlichen der Arbeitsplanung (vgl. Kap. 2.2) [GPW09, S. 39]. Sie bildet die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktion. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf die frühzeitige Konzipierung der Montage. Das auf Basis der Prinziplösung eines Produkts erstellte Montagekonzept soll den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung des Produktionssystems bilden. Zur Identifikation der relevanten Inhalte eines Montagekonzepts wird im Folgenden die Arbeitsplanung vorgestellt und analysiert. In Kapitel 2.5.1 werden die Grundlagen der Arbeitsplanung erläutert. Anschließend werden klassische Systematiken der Arbeitsplanung und der Montageplanung in Kapitel 2.5.2 vorgestellt.

2.5.1 Aufgaben der Arbeitsplanung

Das Modell des Entwurfsraums (vgl. Kap. 2.4.1) lässt sich auch auf die Entwicklung von Produktionssystemen übertragen (Bild 2-11). Die Dimension der Detaillierung und Generalisierung wird hierbei durch Planungsebenen ersetzt [GPW09, S. 41f.], [MEL+09, S. 41f.].

Die Aufgaben der Arbeitsplanung werden nicht in einer streng sequentiellen Folge bearbeitet. Wie bei der Entwicklung mechatronischer Systeme handelt es sich um eine Reihe von Entwurfsschritten. Hierbei werden über die verschiedenen Planungsebenen die Sichten Struktur, Verhalten und Gestalt bearbeitet. Allgemein lassen sich die Aufgaben der Arbeitsplanung in die vier Hauptaspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung und Materialflussplanung unterteilen [GPW09, S. 41ff.].

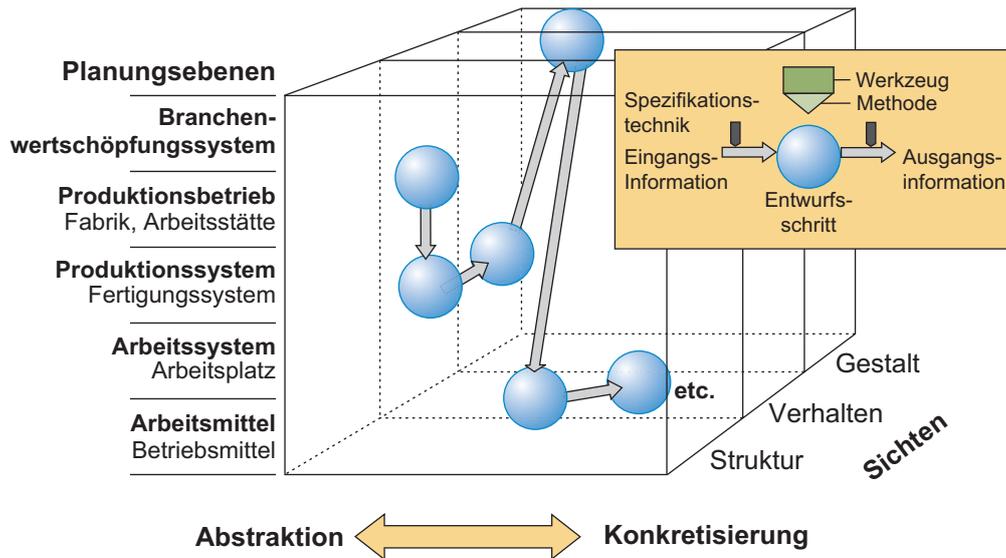


Bild 2-11: Planungsraum der Arbeitsplanung [GPW09, S. 42]

2.5.1.1 Arbeitsablaufplanung

Der Arbeitsablauf beschreibt die Reihenfolge bzw. die zeitliche Abfolge der Arbeitsaufgaben. Weiterhin wird angegeben, auf welcher Arbeitsstation und mit welchen Betriebsmitteln die Arbeitsaufgabe durchgeführt wird [GPW09, S. 42]. Im Rahmen der Arbeitsablaufplanung sind dafür die Produktionstechnologien, der Werkstoff bzw. das Rohteil sowie der eigentliche Arbeitsablauf festzulegen und die benötigten Ressourcen (Arbeitsstation und Betriebsmittel) auszuwählen. Weiterhin werden die Vorgabezeiten ermittelt [Eve97, S. 7ff.].

Konstruktionszeichnungen und Stücklisten bilden den Ausgangspunkt der Arbeitsplanung [Ref91, S. 369ff.], [PBF+07, S. 553ff.]. Als Resultat liegt der Arbeitsplan vor, welcher die Arbeitsvorgangsfolge zur Herstellung des Produkts beschreibt. Der Arbeitsplan enthält Informationen zum eingesetzten Material und den einzelnen Arbeitsvorgängen (Arbeitsplatz, Betriebsmittel, Vorgabezeit, Lohngruppe) [Ref93b, S. 22]. Im Fall von maschinellen Operationen (z. B. Bearbeitung mit einer Werkzeugmaschine) kann der Arbeitsplan auch als Steuerungsprogramm umgesetzt sein.

2.5.1.2 Arbeitsmittelplanung

Die Arbeitsmittelplanung umfasst die Planung sämtlicher Betriebsmittel, welche für die wirtschaftliche Ausführung der Arbeitsvorgänge erforderlich sind. Betriebsmittel sind Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge etc. Nach EVERSHEIM lassen sich zwei Arten der Arbeitsmittelplanung unterscheiden [Eve97, S. 70f.]:

Das Ziel der **produktionsprogrammbezogenen Arbeitsmittelplanung** ist die Bestimmung, Entwicklung und Beschaffung der Betriebsmittel. Die Grundlage der Planung bildet das herzustellende bzw. zu montierende Teilespektrum (Produktionsprogramm).

Weitere Randbedingungen sind die verfolgte Fertigungstiefe, Stückzahlen und Variantenvielfalt [Eve97, S. 100].

Die **auftrags- bzw. produktbezogene Arbeitsmittelplanung** wird für jedes herzustellende Produkt durchgeführt. Den einzelnen Arbeitsvorgängen werden bestehende Betriebsmittel zugeordnet. Hierbei bestehen starke Abhängigkeiten mit der Arbeitsablaufplanung, z. B. zwischen der Wahl des Werkzeugs und der Wahl der Fertigungstechnologie. Die produktbezogene Arbeitsmittelplanung hat Schnittstellen zur Arbeitsablaufplanung sowie dem Betriebsmittelbau [Eve97, S. 69ff.].

2.5.1.3 Arbeitsstättenplanung

Im Rahmen der Arbeitsstättenplanung wird der räumliche Aufbau des Produktionsbetriebs sowie der Produktions- und Arbeitssysteme festgelegt. Produktionssystem, Arbeitsplätze und Materialflusskomponenten sind auf die bauliche Struktur der Fabrik abzustimmen, um einen effizienten Arbeitsablauf zu ermöglichen. Der Fertigungsplaner wird bei dieser interdisziplinären Aufgabe u. a. von Architekten, Arbeitspsychologen und Sicherheitstechnikern unterstützt. Auf Grundlage der Planungsebenen (Bild 2-11) lässt sich die Arbeitsstättenplanung folgendermaßen unterteilen [GPW09, S. 45]:

Wesentlicher Inhalt der **Bebauungsplanung** ist die Ermittlung der Flächenbedarfe, der Funktionszusammenhänge und des benötigten Gebäudetyps. Die Gebäude werden auf dem Grundstück angeordnet (Bebauungsplan) und die funktionalen und baulichen Organisationsprinzipien festgelegt. Hierbei sind Restriktionen wie bspw. Bauvorschriften und Geländeeigenschaften zu berücksichtigen. Eine weitere Aufgabe der Bebauungsplanung ist die Gestaltung der benötigten Gebäude (z. B. Produktions-, Lager- oder Bürogebäude) [Dan99, S. 245ff.], [GPW09, S. 45], [WRN09, S. 317ff.].

Die Aufgabe der **Planung der Produktionsbereiche und -linien** ist die Festlegung einer geeigneten Anordnungsstruktur¹⁰ im Rahmen der Fabrikplanung. Beispiele für Anordnungsstrukturen sind Werkbankfertigung, Verrichtungsprinzip, Fließprinzip, Sternprinzip, Fertigungsinsel und Baustellenfertigung. Bei der Planung der Produktionsbereiche (Anordnungsplanung) wird die räumliche Anordnung und Verbindung der Produktionsbereiche festgelegt. Inhalt der Planung der Produktionslinien ist die Auswahl, Dimensionierung und Integration der benötigten Komponenten. Hierbei handelt es sich bspw. um Werkzeugmaschinen, Industrieroboter, Handarbeitsplätze, Materialflusssysteme oder Pufferlager. Die Zielvorgaben stammen aus der Arbeitsablaufplanung. Restriktionen ergeben sich durch die Gebäude [Ref93a, S. 66f.], [Eve97, S. 104f.], [Gru06, S. 65ff.], [GPW09, S. 45], [Wie10, S. 30].

Die **Gestaltung der Arbeitsplätze** erfolgt nach den Vorgaben der Arbeitsablauf- und Anordnungsplanung. Für die einzelnen Arbeitsplätze werden Flächenbedarfe bestimmt,

¹⁰ Die Anordnungsstruktur entspricht dem Ablaufprinzip nach REFA [Ref93a, S. 66f.].

sowie die Anordnung der Betriebsmittel, Transport- und Lagereinrichtungen festgelegt. Weitere Planungsaspekte sind die Sicherstellung der Energie- Material- und Werkzeugversorgung, die Arbeitssicherheit (z. B. Schutz vor gesundheitsschädlichen Emissionen, Trittsicherheit, Kennzeichnung), die Ergonomie (z. B. Sichtfelder, Greifräume, Beleuchtung) sowie die Klimatisierung [GPW09, S. 45], [WRN09, S. 237].

2.5.1.4 Materialflussplanung (Produktionslogistik)

Als Materialfluss wird die Verkettung aller Vorgänge bei der Gewinnung und Verteilung sowie der Be- und Verarbeitung stofflicher Güter bezeichnet. Teilaufgaben sind Fördern, Handhaben und Lagern [Dan99, S. 47]. Im Rahmen der Materialflussplanung wird der gesamte Materialfluss vom Wareneingang bis zum Versand innerhalb eines Produktionsbetriebs festgelegt. Dies umfasst weiterhin die mit dem Materialfluss verbundene Ausrüstung (Handhabungs- und Lagersysteme) und die Steuerungssoftware. Die Planung kann in vier Hauptaufgaben unterteilt werden [GPW09, S. 44].

Auf Basis der Unternehmensstrategie erfolgt die **Erstellung der Logistikkonzeption**. Sie legt die an den Materialfluss gesetzten Ziele fest. Dies sind bspw. Lieferzeiten und Verfügbarkeiten. Weiterhin umfasst sie Aussagen zur Logistikstrategie, den Logistikprozessen und den logistischen Gestaltungsmitteln [GPW09, S. 44].

Im Rahmen der Arbeitsplanung erfolgt die innerbetriebliche **Projektierung des Materialflusses**. Je nach Planungsebene werden die Materialflüsse zwischen Bereichen und Abteilungen (z. B. Wareneingang, Fertigung, Montage), zwischen einzelnen Produktionssystemen oder innerhalb von Produktionssystemen zwischen den Arbeitssystemen geplant. Aufgaben sind hierbei die Planung der Förderstrecken, der benötigten Ausrüstung und die Erstellung der Steuerungssoftware [Dan99, S. 47], [GPW09, S. 44].

Die Aufgaben der **Projektierung des Handhabungssystems** sind die Klassifikation der Handhabungsaufgabe (z. B. Ordnen, Spannen, Übergeben) und die Auswahl geeigneter Handhabungsmittel (z. B. Greifsystem, Handhabungsroboter). Handhabungsvorgänge sind meist Vorgänger- oder Nachfolgerprozesse von Bearbeitungs-, Transport- oder Lagervorgängen [Ref93b, S. 90], [GPW09, S. 44].

Die **Projektierung der Lagersysteme** umfasst die Festlegung des Lagerprinzips und die Auswahl geeigneter Lagersysteme. Dabei sind die Lageraufgabe und die Art des Lagerguts (z. B. Stückgut, Schüttgut) zur berücksichtigen. Lagersysteme ermöglichen die Stabilisierung der Materialflüsse zwischen Fertigungssystemen, wenn Ausstoß und Bedarf nicht aufeinander abgestimmt sind [Dan99, S. 698], [GPW09, S. 44f.].

2.5.2 Entwicklungssystematik für Produktionssysteme

Im klassischen, sequentiellen Produktentstehungsprozess erfolgt die Entwicklung des Produktionssystems bzw. die Arbeitsplanung auf Grundlage der Produktdokumentation

und somit nach der Ausarbeitung des Produkts (vgl. Kap 2.4.2). Die einzelnen Aspekte der Produktionssystementwicklung werden iterativ und im Wechselspiel bearbeitet. Anhand der *Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme* nach REFA wird im Folgenden die grundsätzliche Reihenfolge vorgestellt (Kap. 2.5.2.1). Anschließend werden Vorgehensweisen für die Arbeitsablaufplanung (Kap. 2.5.2.2) und die Montageplanung (Kap. 2.5.2.3) beschrieben. Auf die Arbeitsmittel-, Arbeitsstätten- und Materialflussplanung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen. Sie bauen auf den Ergebnissen der Arbeitsablaufplanung auf und sind für die integrative Konzipierung der Montage nur bedingt relevant.

2.5.2.1 Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme

Die *Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme* nach REFA ist ein verfahrens- und anlagenneutraler Leitfaden, der unabhängig von der Planungsebene anwendbar ist. Technik, Organisation und Personal werden dabei ganzheitlich betrachtet. Der Planungsprozess ist transparent und die Planungsergebnisse sind reproduzierbar. Trotz der Darstellung als Phasen-Meilenstein-Diagramm (Bild 2-12) ist das Vorgehen nicht streng sequentiell. Ergebnisse werden in vorangegangene Phasen zurückgeführt und Iterationsschleifen durchlaufen [Ref90, S. 87ff.].

Analyse der Ausgangssituation: Nach der Bildung eines Projektteams erfolgt die Analyse des zu produzierenden Produktspektrums und der bestehenden Fertigungseinrichtungen. Als Resultat liegt eine Beschreibung der Ist-Situation vor [Ref90, S. 91ff.].

Konkretisierung der Planungsaufgabe: Die Aufgabe dieser Phase ist die Konkretisierung des Gesamtziels auf Basis des Planungsauftrags und der Situationsbeschreibung. Das Gesamtziel wird in Teilziele unterteilt und diese werden nach Möglichkeit quantifiziert. Es werden die Aspekte Technik, Organisation, Personal und Kosten berücksichtigt. Abschließend wird der Projektumfang festgelegt, wobei die Betrachtungsgrenzen und Schnittstellen des Produktionssystems definiert werden [Ref90, S. 98ff.].

Grobplanung des Produktionssystems: Zunächst wird der Produktionsablauf erarbeitet und in Form einer Arbeitsvorgangsfolge beschrieben. Für die Umsetzung der Arbeitsvorgänge werden Betriebsmittel ausgewählt und die benötigte Anzahl der Arbeitsstationen auf Grundlage der zu erwartenden Stückzahlen bestimmt. In der Regel liegen mehrere alternative Lösungsvarianten vor, die abschließend auf Grundlage von technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet werden [Ref90, S. 104ff.].

Feinplanung des Produktionssystems: Diese Phase umfasst die Detaillierung und Konkretisierung des Grobkonzepts. Hierbei werden die Arbeitsvorgänge in ihre elementaren Arbeitsschritte unterteilt und auf dieser Grundlage wird eine detaillierte Zeitplanung durchgeführt. Es folgt die Planung der Betriebsmittel sowie der Materialfluss- und Informationssysteme für die Arbeitsstationen. Die Planungsergebnisse werden in Form

eines Lastenheftes dokumentiert. Abschließend erfolgen die Personalplanung und die Planung der Inbetriebnahme (Systemeinführung) [Ref90, S. 109ff.].

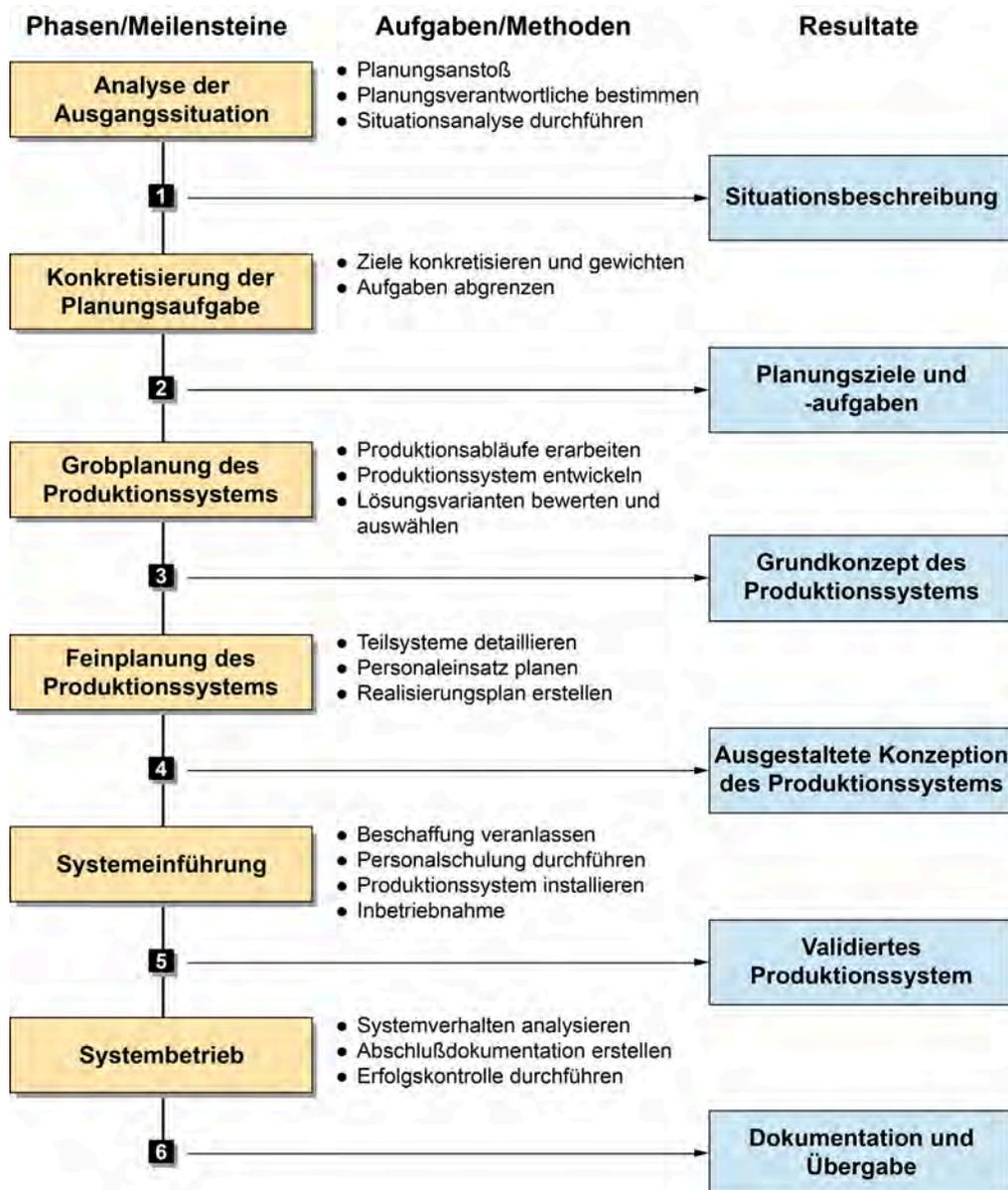


Bild 2-12: Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme nach [Ref90, S. 89]

Systemeinführung: Die Systemeinführung umfasst die Beschaffung und die Installation der neuen Betriebsmittel sowie die notwendigen Personalschulungen. Anschließend erfolgt die Anlaufphase, in der die Produktionsmenge kontinuierlich gesteigert und das Produktionssystem optimiert wird [Ref90, S. 111ff.].

Systembetrieb: Nach erfolgreichem Anlauf der Produktion wird das Produktionssystem übergeben. Die Phase endet mit der Abschlussdokumentation [Ref90, S. 114ff.].

2.5.2.2 Vorgehen bei der Arbeitsablaufplanung

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Vorgehensweisen für die Arbeitsablaufplanung, bspw. die Vorgehen nach EVERSHEIM [Eve97, S. 18ff.], nach WARNECKE [War93a, S. 279] oder nach WIENDAHL [Wie10, S. 198ff.]. Die durchzuführenden Arbeitsschritte sind sehr ähnlich. Im Folgenden wird daher stellvertretend das Verfahren nach EVERSHEIM beschrieben (Bild 2-13).

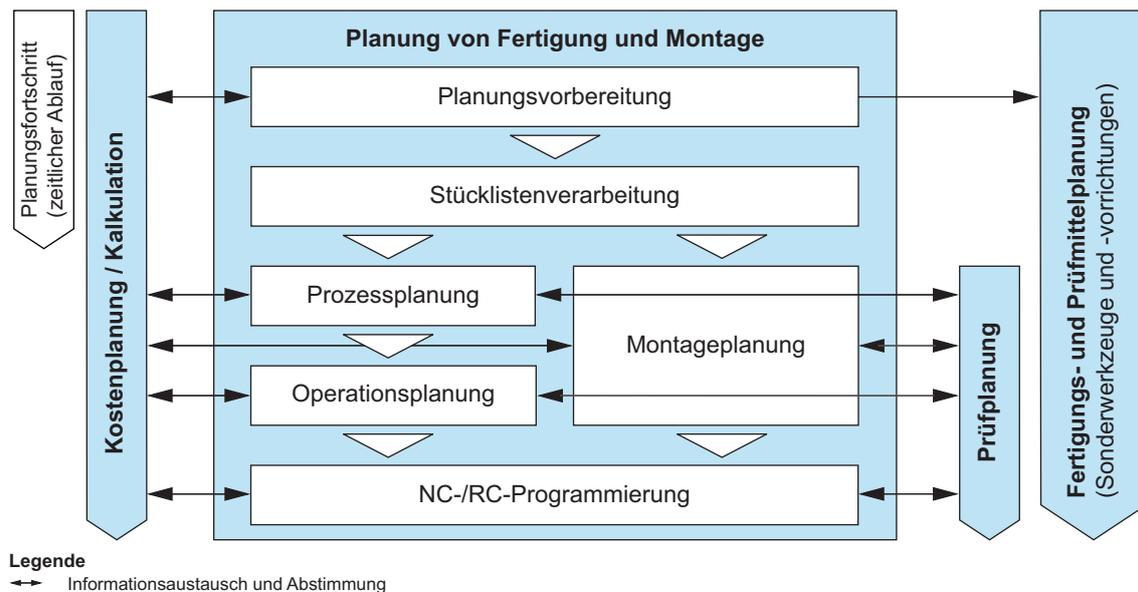


Bild 2-13: Vorgehen und zeitlicher Ablauf der Arbeitsablaufplanung nach [Eve97, S. 18]

Planungsvorbereitung: Zunächst erfolgt die Beschaffung und Kontrolle der Eingangsinformationen. Diese stammen zumeist aus der Konstruktion (z. B. Konstruktionszeichnungen, Stücklisten). Handelt es sich um eine Anpassungs-, Änderungs- oder Variantenkonstruktion wird auf bestehende Unterlagen von ähnlichen Teilen oder Wiederholteilen zurückgegriffen. Weiterhin wird die Fertigungs- und Montagegerechtheit überprüft und ggf. werden Änderungsbedarfe mit der Konstruktion abgestimmt. Falls erforderlich erfolgt die Beauftragung neuer Fertigungs- und Prüfmittel [Eve97, S. 20].

Stücklistenverarbeitung: Ausgehend von der Konstruktionsstückliste werden Fertigungsdaten ergänzt und je nach Bedarf Fertigungs-, Mengenübersichts- oder Strukturstücklisten erzeugt. Sie bilden die Grundlage für die Planung der Fertigungs- und Montagevorgänge und der Bedarfsbestimmung von Materialien (Rohstoffe, Halbzeuge) und Zukaufteilen [Eve97, S. 21f.], [DIN199-1], [PBF+07, S. 560f.].

Prozess- und Operationsplanung: Die übergeordnete Aufgabe ist die Planung einer wirtschaftlichen Fertigung der konstruierten Bauteilumfänge. Hierfür werden in der Prozessplanung zunächst geeignete Rohteile bestimmt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung technologischer, wirtschaftlicher und zeitlicher Aspekte. Anschließend werden geeignete Arbeitsvorgänge ermittelt, um aus den Rohteilen die Werkstücke herzustellen.

Im Rahmen der Operationsplanung werden die Arbeitsvorgänge detailliert und konkretisiert. Als Resultat liegen die elementaren Operationen vor, die als Eingangsinformationen für die NC- und RC-Programmierung¹¹ dienen [Eve97, S. 23ff.].

Montageplanung: Die Planung der Montageprozesse erfolgt parallel zur Planung der Fertigungsprozesse. Auf Basis der Stücklisten und Konstruktionszeichnungen wird ein Montageplan erstellt. Dieser beschreibt die Reihenfolge der Montageoperationen. Hierbei wird das Erzeugnis in Baugruppen und Unterbaugruppen strukturiert. Im Fall einer Serienmontage erfolgt weiterhin die Planung der Montageanlagen [Eve97, S. 57ff.]. Das detaillierte Vorgehen der Montageplanung ist in Kapitel 2.5.2.3 dargestellt.

NC-/RC-Programmierung: Es werden die Steuerungsprogramme für die eingesetzten Werkzeugmaschinen und Industrieroboter erstellt¹². Die Grundlage bilden die Ergebnisse aus der Prozess-, Operations- und Montageplanung [Eve97, S. 78ff.].

Parallele Planungsaktivitäten: Die Planung der Fertigungs- und Montagevorgänge wird von parallelen Aktivitäten begleitet. Ziel der **Kostenplanung und Kalkulation** ist die wirtschaftliche Herstellung der Erzeugnisse. Hierzu werden Produktionstechnologien und alternative Fertigungsfolgen unter wirtschaftlichen Kriterien verglichen. Weiterhin werden Entscheidungen bzgl. Eigenfertigung und Fremdvergabe getroffen [Eve97, S. 89ff.]. Die Aufgabe der **Prüfplanung** ist die Festlegung der Prüfprozesse und der hierzu benötigten Prüfmittel mit dem Ziel, die geforderte Qualität sicherzustellen. Dies umfasst die Identifikation geeigneter Prüfmerkmale, die Bestimmung der Prüfintervalle und -methoden sowie die Dokumentation. Das Ergebnis ist der Prüfplan [VVD2619, S. 4f.], [Eve97, S. 61ff.]. Wenn auftrags- oder produktspezifische Betriebsmittel nicht verfügbar sind, wird die **Fertigungs- und Prüfmittelplanung** aktiv. Sie bildet die Schnittstelle zum Betriebsmittelbau und koordiniert die Entwicklung und den Bau neuer Betriebsmittel [Eve97, S. 69ff.].

2.5.2.3 Vorgehen bei der Montageplanung

Die Montageplanung umfasst die Ablaufplanung, die Mittelplanung und die Dokumentation. Den Ausgangspunkt bilden hierfür die Ergebnisse der Konstruktion (z. B. Zeichnungen, Stücklisten) [BB05, S. 627]. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Vorgehensweisen für die Montageplanung. Beispiele sind die Montageplanungsmethodik nach BULLINGER ET AL. [BAD+86, S. 51], die Planungsrichtlinie für automatische Montageanlagen nach LOTTER [Lot86, S. 328ff.], das Vorgehen zur integrierten, rechnerunterstützten Montageplanung nach DEUTSCHLÄNDER [Deu89, S. 67], die Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage nach SCHUSTER [Sch92, S. 48] oder die Metho-

¹¹ NC: Numerical Control / RC: Robot Control

¹² Hier sei auf die Fachliteratur zur Programmierung von Werkzeugmaschinen und Industrierobotern verwiesen [KR11], [Web09].

de zur integrierten Montageplanung nach FELDMANN [Fel97, S. 66]. Im Detail gibt es einige Aspekte, die sich in den Vorgehensweisen unterscheiden. Die grundsätzlichen Arbeitsinhalte sind aber weitestgehend deckungsgleich [Bic00, S. 17f.].

Die allgemeine Montageplanungsmethodik nach BULLINGER ET AL. ist weit verbreitet [Rud06, S. 17] und lieferte die Grundlage für viele nachfolgende Vorgehensweisen. Sie wird im Folgenden beispielhaft für die Montageplanung beschrieben (Bild 2-14).

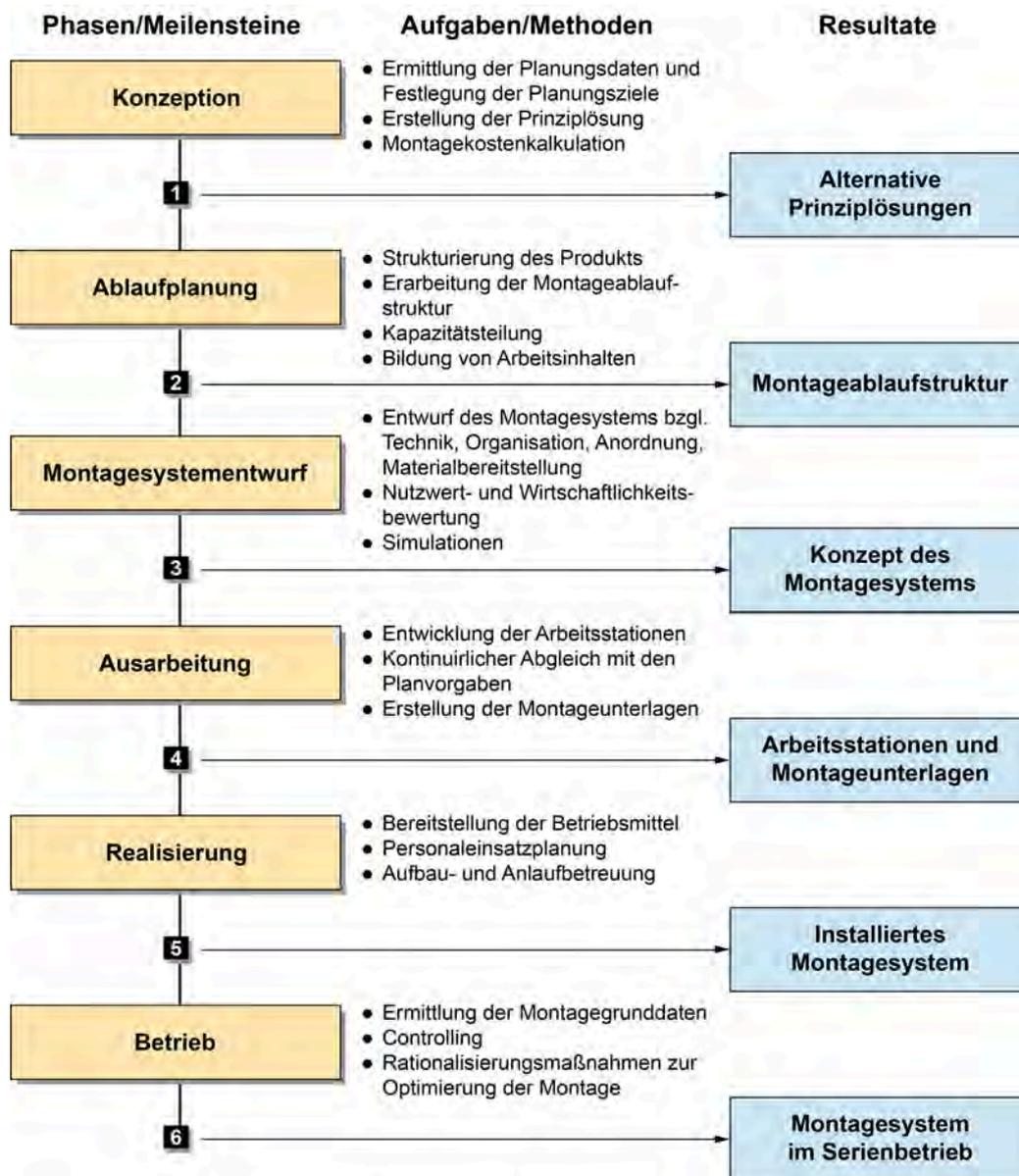


Bild 2-14: Vorgehensweise der Montageplanung nach [BAD+86, S. 51]

Konzeption: Zunächst werden die Planungsdaten ermittelt (z. B. Stückzahlen und Stückkosten, einzusetzende Technologien, Ist-Situation Personal, Investitionsumfang). Auf Grundlage des Planungsauftrags und der Planungsdaten werden Anforderungen an das Montagesystem abgeleitet und Zielkriterien festgelegt. Es folgt die Erstellung der Prinziplösung, welche die Grundmerkmale des Montagesystems beschreibt. Hierfür

werden Planungsmaßnahmen zur Erfüllung der Zielkriterien identifiziert. Beispiele für Maßnahmen sind eine Kapazitätsteilung der Gesamtstruktur bzw. der Teilsysteme, eine Überdimensionierung oder Puffer zur Entkopplung. Anschließend werden die Planungsmaßnahmen und ihre Ausprägungen in einem morphologischen Kasten strukturiert. Durch die Auswahl von Ausprägungen bzw. Teillösungen werden mehrere alternative Prinzipzlösungen spezifiziert (Bild 2-15). Diese bilden die Grundlage für eine erste Montagekostenkalkulation [BAD+86, S. 58ff.].

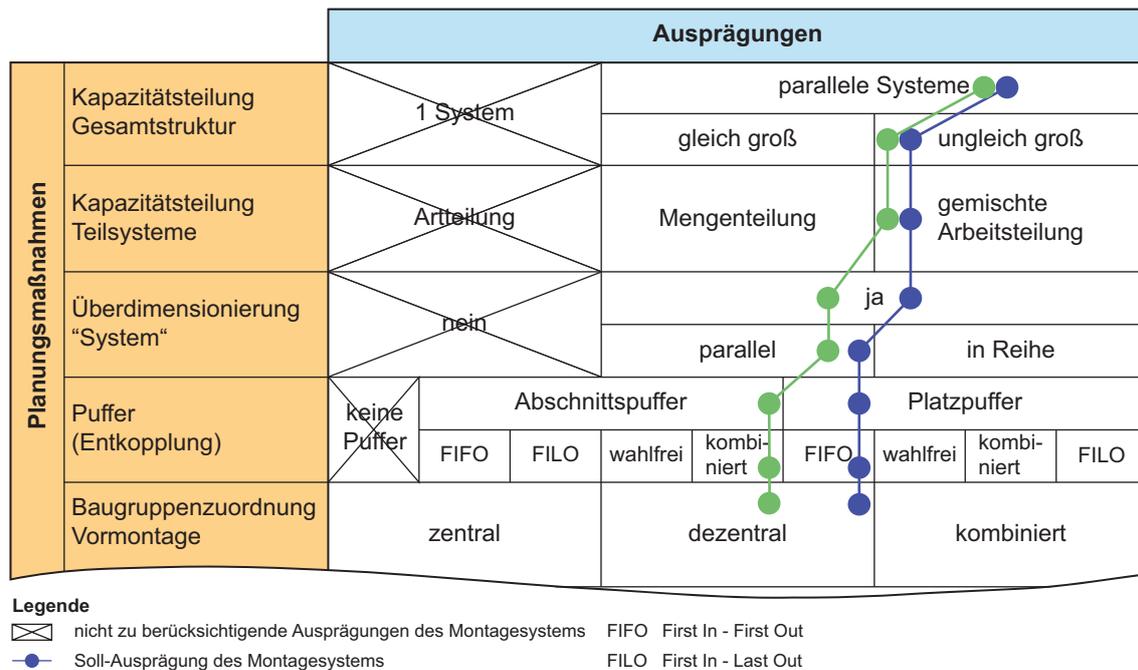


Bild 2-15: Morphologischer Kasten zur Spezifikation der Prinzipzlösung eines Montagesystems nach [BAD+86, S. 70]

Ablaufplanung: Ziel dieser Phase ist die Montageablaufstruktur. Diese beschreibt die Reihenfolge der Montagetätigkeiten und deren Freiheitsgrade (z. B. Zwangsfolgen, parallele Tätigkeiten). Die Konstruktionsunterlagen (Konstruktionszeichnungen, Konstruktionsstücklisten) bilden die Eingangsinformationen. Das Produkt wird zunächst fertigungsorientiert strukturiert. Dies umfasst die Bildung von Unterbaugruppen, Baugruppen und Montagefamilien¹³. Zur Reduzierung der Arbeitsumfänge werden ausgewählte Erzeugnisse betrachtet und nicht das gesamte Produktionsprogramm. Das Ergebnis ist die Erzeugnisgliederung, die meist in Form einer Baukastenstückliste dokumentiert wird. Auf Basis der Erzeugnisgliederung wird die Montageablaufstruktur erarbeitet. Die Hauptaufgaben sind hierbei die Aufgabengliederung, bei der die durchzuführenden Tätigkeiten definiert werden, sowie die Ablaufgliederung, bei der die Reihenfolgebeziehungen der Tätigkeiten festzulegen sind. Die Montageablaufstruktur wird um

¹³ Als Montagefamilien werden Unterbaugruppen, Baugruppen oder ganze Produkte mit einer ähnlichen Montageablaufstruktur bezeichnet [BAD+86, S. 53].

weitere Planungsdaten ergänzt (z. B. Vorgabezeiten). Abschließend erfolgt die Kapazitätsteilung, d. h. der Abgleich des Kapazitätsbedarfs der Montagetätigkeiten mit dem Kapazitätsangebot der Arbeitsplätze und die Bildung der Arbeitsinhalte [Amm85, S. 18ff.], [BAD+86, S. 88ff.].

Montagesystementwurf: Auf Grundlage der Montageablaufstruktur erfolgt die Montagesystementwicklung. In einem iterativen Ablauf werden technische (z. B. Montageoperationen, Materialfluss, Puffer), organisatorische (z. B. Organisationsprinzip) und räumliche Aspekte (z. B. Layout, Materialbereitstellung) bearbeitet. Hierbei entstehen mehrere Alternativen, die hinsichtlich Nutzwert und Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Liegt kein geeigneter Entwurf vor, ist die Phase erneut zu durchlaufen. Die Analyse kann durch Simulationen unterstützt werden. Abschließend wird das gesamte Produktionsprogramm auf das ausgewählte Montagesystem eingeplant, um eine Leistungsabstimmung durchzuführen und Modell-Mix-Verluste zu reduzieren [BAD+86, S. 147ff.].

Ausarbeitung: Ausgehend vom Entwurf des Montagesystems erfolgt die Konkretisierung der Arbeitsstationen. Hierbei wird kontinuierlich überprüft, ob die Eigenschaften der entwickelten Montagesysteme mit den Planvorgaben übereinstimmen, bspw. Vorgabezeiten oder Arbeitswert. Kommt es zu signifikanten Abweichungen, ist ein Abgleich der Montagestationen erforderlich. Abschließend erfolgt die Erstellung der Montageunterlagen (z. B. Montage- und Prüfanweisungen) [BAD+86, S. 249ff.].

Realisierung: Die Phase umfasst die Bereitstellung der Betriebsmittel, die Personaleinsatzplanung sowie den Montagesystemaufbau und -anlauf. Zunächst erfolgt die Konstruktion und Herstellung bzw. Beschaffung der benötigten Betriebsmittel. In der anschließenden Personaleinsatzplanung werden der Personalbedarf und die benötigten Qualifikationsprofile bestimmt. Hierbei sind die betrieblichen Personalstrukturen und Mitarbeiterqualifikationen, Arbeitszeitenregelungen sowie der inner- und außerbetriebliche Arbeitsmarkt zu berücksichtigen. Im Rahmen des Aufbaus werden die Montagesysteme installiert und die Bereitstellung von Material, Medien (z. B. Energie, Druckluft), Informationen (z. B. Arbeitspläne, Montageanweisungen), Werkzeugen und Prüfplänen sichergestellt. Abschließend erfolgen die Inbetriebnahme des Montagesystems und die Einweisung des Personals [BAD+86, S. 309ff.].

Betrieb: Mit dem Übergang in den Serienbetrieb ist eine Ermittlung der Montagegrunddaten (z. B. Vorgabezeit, Arbeitswert) durchzuführen. Dies ist erforderlich, da sich in der Realisierungsphase häufig Änderungen ergeben und somit Leistungswerte vom Planungsstand abweichen können. Weiterhin werden Rationalisierungsmaßnahmen zur Optimierung der Montage durchgeführt. Diese können bspw. durch Verbesserungsvorschläge oder Kostenanalysen angestoßen werden [BAD+86, S. 331].

2.5.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

In der Montageplanung wird das Produkt in Baugruppen strukturiert, die Montageablaufstruktur wird spezifiziert und Montageverfahren werden festgelegt, insb. Fügeverfahren. Die Montagplanung bildet somit eine wesentliche Schnittstelle zwischen der Produkt- und der Produktionssystementwicklung. Sie liefert die Grundlage für die Planung der Montagesysteme im Rahmen der Arbeitsstätten-, Arbeitsmittel- und Materialflussplanung. Die Ergebnisse der Konstruktion (z. B. Zeichnungen, Stücklisten) bilden den Ausgangspunkt der Montageplanung. Bei der klassischen Montageplanung muss daher die Produktentwicklung bereits weitestgehend abgeschlossen sein.

Mit Hilfe der zu entwickelnden Systematik soll die Montageplanung früher im Produktentstehungsprozess beginnen und integrativ mit der Produktentwicklung erfolgen (vgl. Kap. 2.2). In diesem Fall bildet nicht die fertige Produktdokumentation sondern die Prinziplösung des herzustellenden Produkts den Ausgangspunkt. Auf Grundlage der enthaltenen Informationen soll das Produkt montageorientiert strukturiert und eine erste Montageablaufstruktur erarbeitet werden. Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Montagekonzept können so frühzeitig identifiziert und berücksichtigt werden. Das auf das Produkt abgestimmte Montagekonzept ist die Grundlage für die Konzipierung der Fertigung und die weitere Konkretisierung des Produktionssystems.

2.6 Integrative Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme

Die Hauptphase Konzipieren (vgl. Kap. 2.4.1) entspricht dem Systementwurf des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206. In dieser Phase werden die grundsätzlichen Entwicklungsentscheidungen getroffen und in der fachdisziplinübergreifenden Prinziplösung (Produktkonzept) dokumentiert. Die Prinziplösung legt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems fest. Sie bildet die Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der beteiligten Fachleute entlang des Entwicklungsprozesses und trägt somit maßgeblich zu einem einheitlichen Verständnis bei (vgl. [AR11, S. 63]). Weiterhin stellt sie die Datengrundlage für frühzeitige Analysen bereit, bspw. der Herstellkosten oder der Robustheit gegenüber Störungen [GFD+09, S. 209ff.], [GBD+12, S. 88f.].

Aufbauend auf der VDI-Richtlinie 2206 wurde von GAUSEMEIER ET AL. am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn eine Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme entwickelt¹⁴. Diese umfasst als wesentliche Bestandteile:

¹⁴ Vgl. die Arbeiten im Sonderforschungsbereich 614 Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus [GFD+09, S. 205ff.], [GRS09, S. 155ff.] sowie der Verbundprojekte InZuMech [Gau10] und ENTIME [GSA+11]. Erweiterungen um die Konzeption des Produktionssystems finden sich in den Ergebnissen der Verbundprojekte INERELA [GF06] und VireS [GLL12] sowie in [Mic06], [BGN+09], [GBR10], [Rey11] und [Nor12].

- Die **Spezifikationstechnik CONSENS** – „CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems“ für die ganzheitliche und fachdisziplinübergreifende Beschreibung der Prinziplösung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme.
- Ein **Vorgehensmodell**, welches detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten der Konzipierung beschreibt und den Einsatz von Methoden und Werkzeugen steuert.

2.6.1 Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption

Die Spezifikationstechnik CONSENS ermöglicht die fachdisziplinübergreifende und integrative Beschreibung der Prinziplösung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme (Bild 2-16). Die Prinziplösung wird über die Aspekte *Umfeld*, *Anwendungsszenarien*, *Anforderungen*, *Funktionen*, *Wirkstruktur*, *Verhalten* und *Gestalt* beschrieben. *Prozesse*, *Ressourcen* und *Gestalt* beschreiben das zugehörige Produktionssystem. Rechnerintern werden die Aspekte durch Partialmodelle repräsentiert. Sie stehen zueinander in Beziehung und sollen ein konsistentes Ganzes ergeben. Daher bestehen die Prinziplösung und das zugehörige Produktionssystemkonzept aus einem kohärenten System von Partialmodellen [GBD+12, S. 89ff.].

Die Erstellung und Bearbeitung der Aspekte erfolgt im engen Wechselspiel und ist von Iterationen geprägt. Es existiert jedoch eine grundsätzliche Reihenfolge (vgl. Kap. 2.6.2). Auf Basis des Umfelds und der Anwendungsszenarien werden Anforderungen abgeleitet. Anschließend werden die Systemfunktionen erarbeitet und die Wirkstruktur aufgestellt. Abschließend erfolgt die Spezifikation des Verhaltens und der Gestalt [Fra06, S. 79], [GFD+09, S. 209f.], [GD10, S. 56ff.], [GBD+12, S. 89f.]. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte kurz erläutert:

Umfeld: Es wird die Einbettung des zu entwickelnden Systems in sein Umfeld beschrieben, wobei das System als Black Box betrachtet wird. Die Beziehungen zwischen dem System und den Elementen des Umfelds (z. B. Benutzer, Witterung) werden über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse spezifiziert. Beziehungen sind Interaktionen (z. B. Benutzereingaben) oder Einflüsse (z. B. Umgebungstemperaturen, Vibrationen) [GFD+09, S. 210], [GBD+12, S. 91f.].

Anwendungsszenarien: In diesem Partialmodell werden Betriebssituationen beschrieben, für die das System auszulegen ist. Weiterhin wird festgelegt, wie sich das System in diesen Situationen verhalten soll. Somit beschreiben Anwendungsszenarien situationsspezifische Sichten auf das zu entwickelnde System und dessen Verhalten. Sie bilden die Grundlage für die Anforderungsermittlung und die Identifikation von Betriebsmodi [GFD+09, S. 210f.], [GBD+12, S. 92f.].

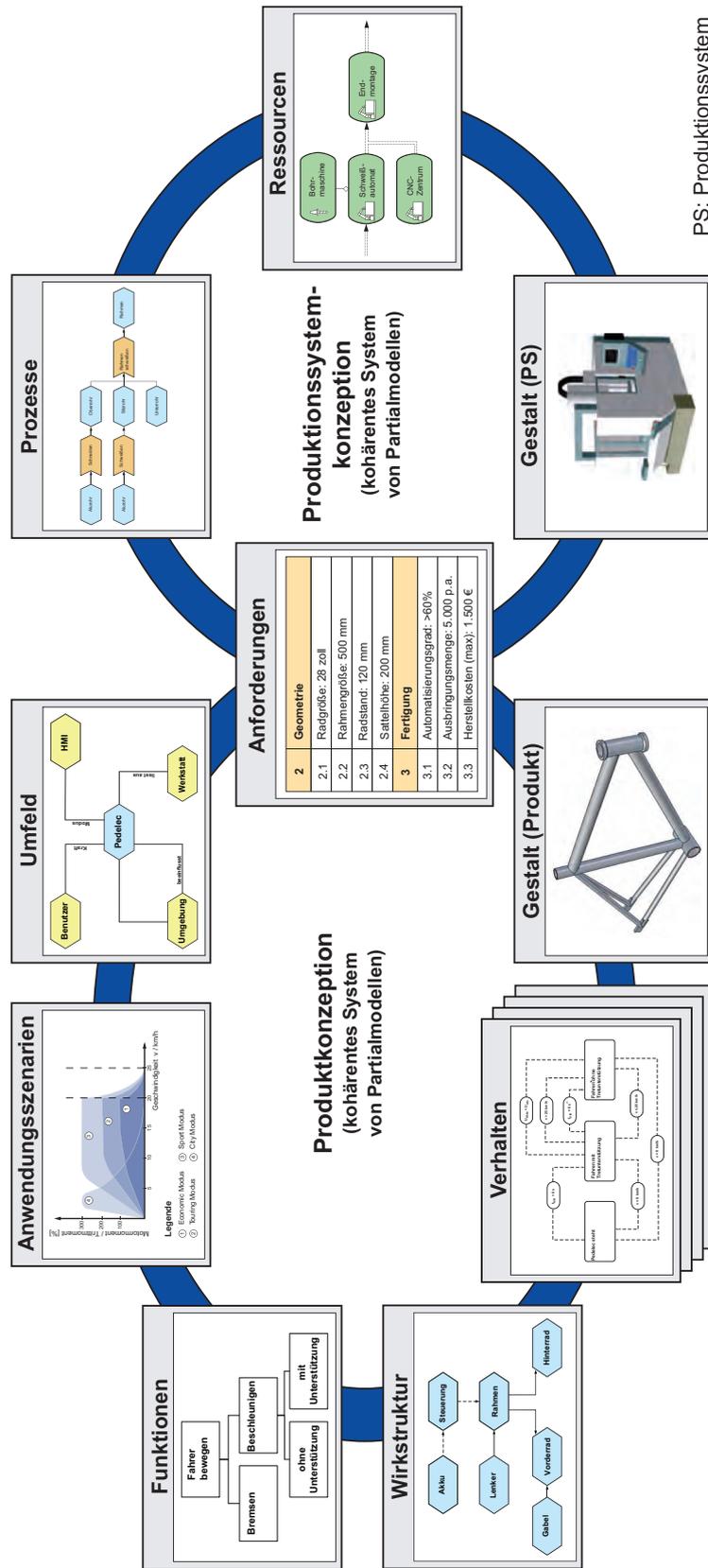


Bild 2-16: Partialmodelle zur fachdisziplinübergreifenden Beschreibung der Prinzipiell- und der zugehörigen Produktionssysteme [KNT09, S. 32], [GBD+12, S. 90]

Anforderungen: Die Anforderungen bilden die „Messlatte“ für das zu entwickelnde System sowie für das zugehörige Produktionssystem im gesamten Produktentstehungsprozess. Sie werden in einer Anforderungsliste strukturiert und rechnerintern im Partialmodell Anforderungen repräsentiert. Anforderungen werden nach Wunsch- und Festforderungen klassifiziert und durch qualitative und quantitative Angaben konkretisiert. Checklisten geben Hilfestellungen bei der Aufstellung der Anforderungen¹⁵ [PBF+07, S. 215], [GFD+09, S. 211f.], [GBD+12, S. 94].

Funktionen: Funktionen beschreiben lösungsneutral den allgemeinen und gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen [PBF+07, S. 215]. Das Ziel ist die Erfüllung einer Aufgabe. Die identifizierten Funktionen werden in einer Funktionshierarchie strukturiert und in Teilfunktionen untergliedert. Hierbei erfolgt die Unterteilung solange, bis sinnvolle Lösungen zur Erfüllung der einzelnen Teilfunktionen gefunden werden können. Die Erstellung der Funktionshierarchie wird durch Funktionskataloge unterstützt¹⁶ [GFD+09, S. 212f.], [GBD+12, S. 94f.].

Wirkstruktur: Die Wirkstruktur bildet den Kern der Prinziplösung eines mechatronischen Systems. Sie beschreibt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise. Die gefundenen Lösungen zur Erfüllung der Teilfunktionen werden in der Wirkstruktur als Systemelemente modelliert und zueinander in Beziehung gesetzt. In Anhängigkeit vom Konkretisierungsgrad kann es sich bei Systemelementen um abstrakte Wirkprinzipien, Module, Bauteile, Baugruppen oder Software-Komponenten handeln. Die Beziehungen der Systemelemente werden mittels Stoff-, Energie- und Informationsflüsse modelliert. Im Entwicklungsverlauf werden die Systemelemente konkretisiert und detailliert. Bild 2-17 zeigt die oberste Abstraktionsebene der Wirkstruktur eines Pedelecs¹⁷ [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 95ff.].

Verhalten: Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme spielt die Modellierung des Verhaltens eine zentrale Rolle. Es bildet den Ausgangspunkt für den Software- und Reglerentwurf. Das Verhalten kann sowohl für das Gesamtsystem als auch für einzelne Systemelemente spezifiziert werden. Hierfür stehen zwei Partialmodelle zur Verfügung. Zustände und Zustandsübergänge werden im Partialmodell Verhalten-Zustände beschrieben. Das Partialmodell Verhalten-Aktivitäten umfasst die Ablaufprozesse innerhalb eines Systemzustands. Nach Bedarf können weitere Aspekte ergänzt werden, bspw. Kinematik oder Dynamik [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 98f.].

¹⁵ Beispiele für Checklisten finden sich in [Rot00], [PBF+07], [Ehr09].

¹⁶ Beispiele für Funktionskataloge finden sich in [Bir80], [Lan00].

¹⁷ Pedelec (Pedal Electric Cycle): Fahrrad mit elektrischer Motorunterstützung (vgl. Kap. 4)

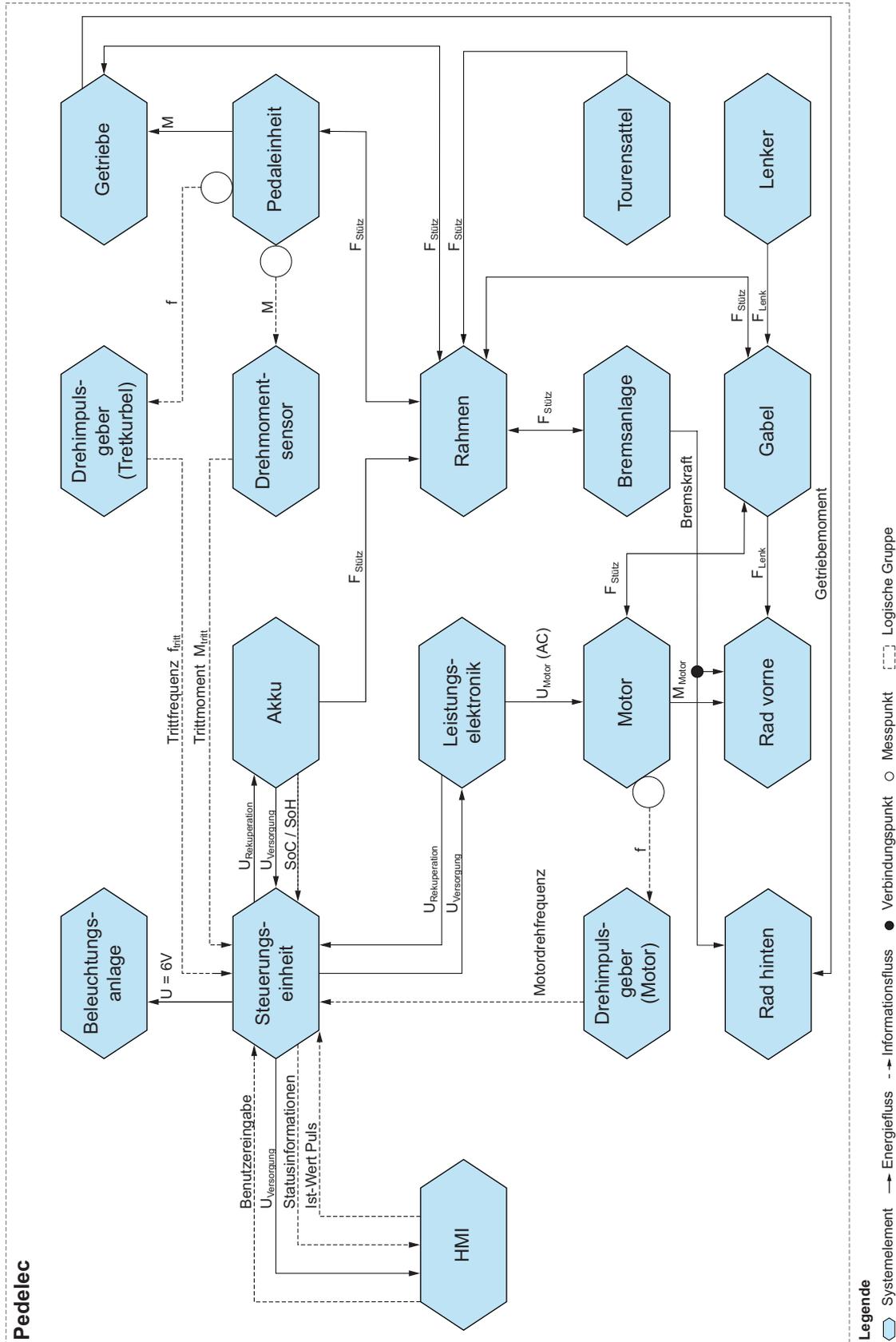


Bild 2-17: Wirkstruktur eines Pedelecs nach [GBD+12, S. 97]

Gestalt des Produkts: Erste Festlegungen zur Produktgestalt sind bereits in der Konzipierung zu treffen. Den Ausgangspunkt bilden die Wirkstruktur sowie Gestaltinformationen bereits existierender Bauteile und Baugruppen (z. B. Zukauf- oder Normteile). Spezifiziert werden Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte. Weiterhin können Hüllflächen und Stützstrukturen ergänzt werden. Für die rechnerinterne Modellierung werden gängige 3D-CAD-Systeme verwendet. Bild 2-18 zeigt die grobe Gestalt eines Pedelecs in einer frühen Entwicklungsphase [GFD+09, S. 213], [GBD+12, S. 96ff.].

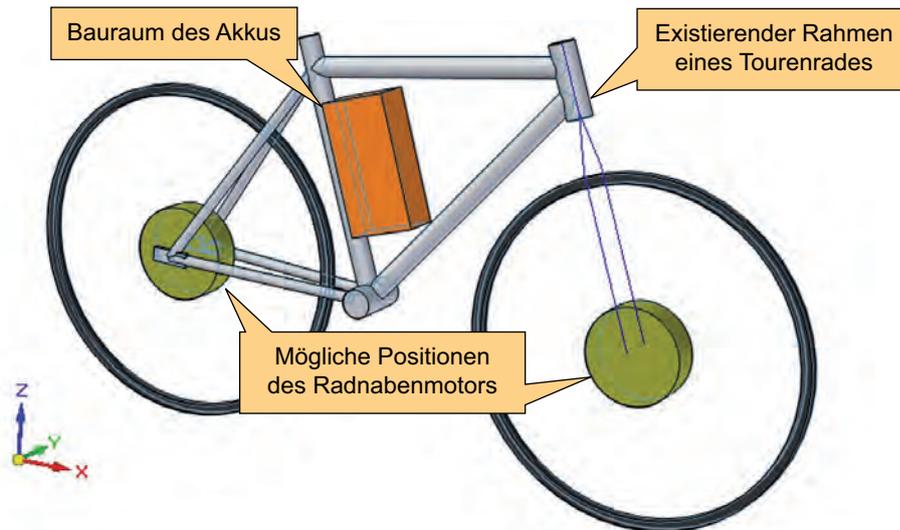


Bild 2-18: Grobe Gestalt eines Pedelecs als 3D-Modell nach [GBD+12, S. 98]

Prozesse: Das Partialmodell beschreibt den Produktionsablauf betriebsmittelunabhängig als eine Folge von Arbeitsvorgängen (Fertigungs-, Montage- und Transportprozesse)¹⁸. Die Prozesse werden im Entwicklungsverlauf detailliert und konkretisiert¹⁹. Ein- und Ausgangsobjekte der Prozesse werden als Materialelemente bezeichnet. Diese umfassen alle Rohstoffe, Zulieferteile, Handelswaren sowie Roh-, Halb- und Fertigteile im Herstellungsprozess [GK06, S. 2]. Ein Teil der Materialelemente entspricht den zu fertigenden Systemelementen aus der Wirkstruktur (z. B. Bauteile, Baugruppen), andere Materialelemente ergeben sich als Zwischenzustände im Produktionsprozess (z. B. Ausgangsmaterialien, Zwischenbaugruppen) [GBR10, S. 717f.], [GBD+12, S. 100ff.].

Analog zur Wirkstruktur der Prinziplösung bildet das Partialmodell Prozesse den Kern des Produktionssystemkonzepts und stellt die Grundlage für die frühzeitige Identifikation von Wechselwirkungen dar, bspw. Restriktionen durch Fertigungstechnologien. Diese können somit bereits während der Konzipierung in die Produktentwicklung einfließen.

¹⁸ Vgl. Prozesskette nach [Wes05, S. 7]

¹⁹ Fertigungsprozesse werden zunächst als Fertigungsfunktionen spezifiziert. Diese werden zu Fertigungsverfahren und -technologien konkretisiert (vgl. [DIN8580]). Die Konkretisierung von Montage- und Transportprozesse erfolgt analog [GBR10, S. 717].

ben. Des Weiteren bildet das Partialmodell den Ausgangspunkt für die Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsablaufplanung [GBR10, S. 717f.], [GBD+12, S. 101].

Ressourcen: Die Realisierung der Prozesse erfolgt über Ressourcen, die im gleichnamigen Partialmodell beschrieben werden. Dies umfasst alle für die Ausführung der Prozesse benötigten Betriebsmittel²⁰ sowie das Personal [DIN69901-5, S. 17]. Die Ressourcen werden den Arbeitsvorgängen zugeordnet. Es ist durchaus möglich, dass eine Ressource mehrere Arbeitsvorgänge ausführt, bspw. ein CNC-Bearbeitungszentrum. Über Materialflüsse sind die Ressourcen untereinander verkettet. Diese ergeben sich aus den Reihenfolgebeziehungen der Arbeitsvorgänge in der Prozessfolge. Die Konkretisierung der Ressourcen erfolgt über Parameter und Gestaltinformationen (z. B. Layouts). Das Partialmodell Ressourcen bildet den Ausgangspunkt für die Arbeitsmittel- und Materialflussplanung [GBR10, S. 718f.], [GBD+12, S. 102f.].

Gestalt des Produktionssystems: In Analogie zur Produktkonzipierung können auch bei der Produktionssystemkonzipierung erste Festlegungen zur Gestalt getroffen werden. Dies umfasst Arbeitsräume und Platzbedarfe von Maschinen oder grobe Layouts. Die Spezifikation der Produktionssystemgestalt erfolgt in Form quantifizierter Flächenbedarfe, Skizzen oder 3D-CAD-Modellen. Diese Informationen werden für die Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsstätten- und Arbeitsmittelplanung verwendet [GBR10, S. 719.], [GBD+12, S. 103].

2.6.2 Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung

Das Vorgehen für die integrativen Konzipierung nach GAUSEMEIER ET AL. gliedert sich in sieben Phasen (Bild 2-19). Die Produktkonzipierung umfasst die Phasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipierung auf Systemebene*, *Konzipierung auf Modulebene* und *Konzeptintegration*. Die Phasen *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipierung auf Prozessebene* und *Konzipierung auf Ressourcenebene* beschreiben das Vorgehen der Produktionssystemkonzipierung. Trotz der Darstellung ist das Vorgehen nicht als stringente Folge von Aktivitäten zu verstehen. Zum Teil werden mehrere Iterationsschleifen durchlaufen und die Lösung dabei konkretisiert. Anzahl, Reihenfolge und Zeitpunkte sind von der spezifischen Entwicklungsaufgabe abhängig (z. B. Komplexität, Organisationsformen) [GDK+11, S. 774f.].

²⁰ Der Begriff Betriebsmittel umfasst Maschinen, Fahrzeuge, Lager- und Transportsysteme, Werkzeuge, Messmittel, Prüfgeräte, Vorrichtungen und Steuerprogramme [Wes05, S. 8].

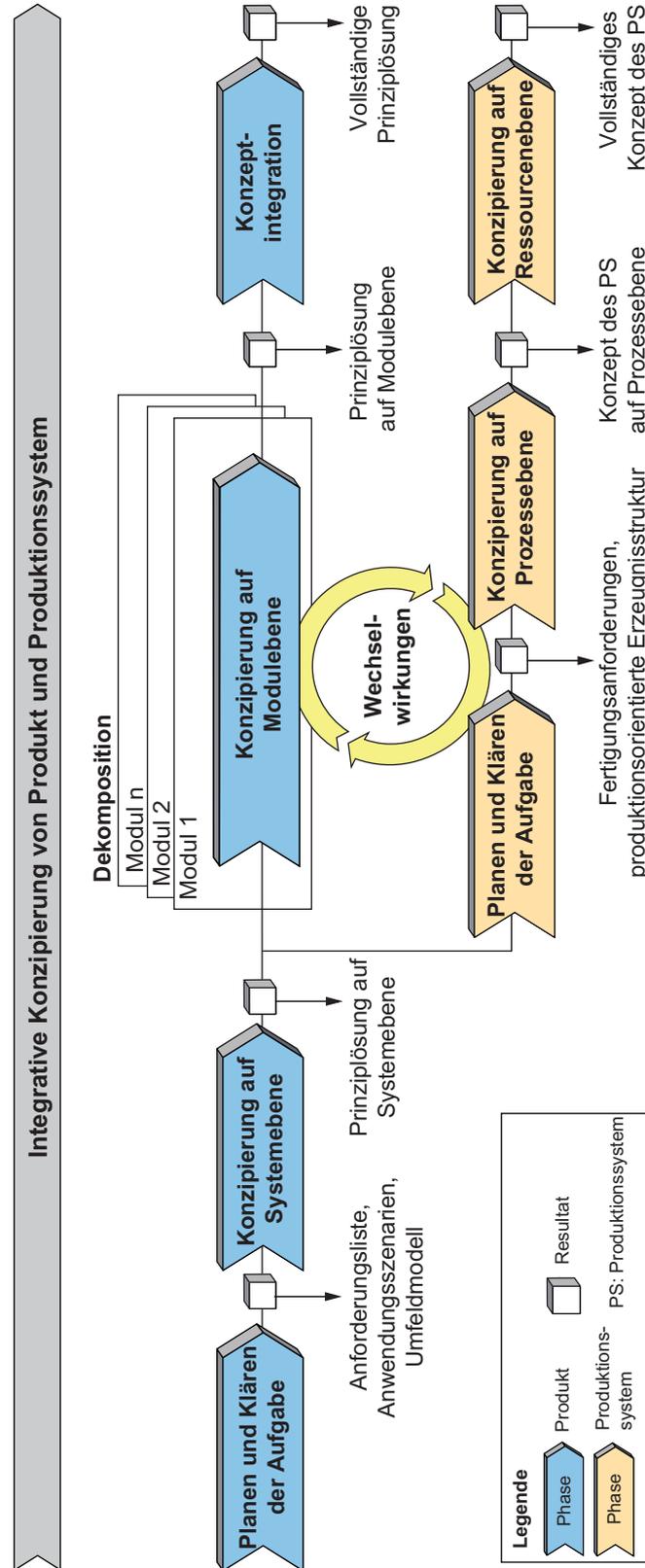


Bild 2-19: Generelles Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach [GDK+11, S. 775], [Nor12, S. 99]

Planen und Klären der Aufgabe (Produkt): Die Entwicklungsaufgabe wird abstrahiert und der Kern der Entwicklungsaufgabe identifiziert. Für die Ermittlung der Randbedingungen und der externen Einflüsse auf das System wird ein Umfeldmodell erstellt. In Form von Anwendungsszenarien werden typische Betriebssituationen des Systems und die zugehörigen Systemzustände spezifiziert. Diese beschreiben abstrakt einen Teil der Systemfunktionalität. Umfeldmodell und Anwendungsszenarien bilden die Grundlage für die systematische Ermittlung von Anforderungen an das zu entwickelnde System. Als Resultat liegt eine Anforderungsliste vor [GFD+09, S. 217f.], [GD10, S. 62f.]. Eine detaillierte Darstellung findet sich im Anhang (siehe Anhang Bild A-1).

Konzipierung auf Systemebene: Ziel der Phase ist die fachdisziplinübergreifende Prinziplösung des zu entwickelnden Systems. Den Ausgangspunkt bilden die Anwendungsszenarien und die Anforderungsliste. Aus diesen werden die Hauptfunktionen abgeleitet, die in einer Funktionshierarchie strukturiert und in Teilfunktionen untergliedert werden. Dies erfolgt solange, bis geeignet Teillösungen zur Erfüllung der Teilfunktionen zugeordnet werden können. Mit Hilfe eines morphologischen Kastens werden die Funktionen und Lösungen strukturiert und konsistente Kombinationen gebildet. Das logische und funktionale Zusammenwirken der Teillösungen wird in der Wirkstruktur beschrieben. Ausgehend von der Wirkstruktur erfolgt die Spezifikation der Gestalt und des Systemverhaltens. Abschließend werden die Lösungsalternativen gegenüber den Anforderungen bewertet und die am besten geeignete Lösung ausgewählt [GFD+09, S. 218], [GD10, S. 64]. Eine detaillierte Darstellung findet sich im Anhang (siehe Anhang Bild A-2).

Konzipierung auf Modulebene: Das mit der Prinziplösung beschriebene Gesamtsystem wird entwicklungsorientiert in Module strukturiert. Anschließend erfolgt die Detaillierung und Konkretisierung der einzelnen Module. Das Vorgehen entspricht hierbei den beiden vorangegangenen Phasen. Als Resultat dieser Phase liegen die Prinziplösungen der verschiedenen Module vor. Sie ermöglichen Aussagen zur technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit [GFD+09, S. 216], [GD10, S. 62].

Konzeptintegration: Die entwickelten Prinziplösungen der Module werden in dieser Phase zu einer detaillierten Prinziplösung des Gesamtsystems integriert. Hierbei sind Probleme und Widersprüche zu identifizieren und zu lösen. Den Abschluss bildet eine Bewertung der gefundenen Lösung unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die vollständige Prinziplösung bildet die Grundlage für den fachdisziplinspezifischen Entwurf (vgl. Kap. 2.4.3.2) [GFD+09, S. 216], [GD10, S. 62].

Planen und Klären der Aufgabe (Produktionssystem): Auf Grundlage der Prinziplösung des zu entwickelnden Systems wird die Entwicklungsaufgabe aus Sicht der Produktionssystementwicklung analysiert. Die bestehende Anforderungsliste wird auf die fertigungsrelevanten Anforderungen reduziert. Dies sind bspw. Stück- und Variantenzahlen, Abmessungen und Produktmasse. Anschließend werden die Wirkstruktur und die Gestalt des Produkts analysiert und die zu fertigenden Systemelemente (Bauteile,

Baugruppen, Module) sowie ihre strukturellen Verbindungen identifiziert [BGN+09, S. 529], [GDK+11, S. 775], [NBG13, S. 621].

Konzipierung auf Prozessebene: Die zentrale Aufgabe dieser Phase ist die Erstellung eines ersten Arbeitsablaufs. In diesem werden die notwendigen Fertigungs- und Montagevorgänge, ihre Reihenfolgebeziehungen sowie die relevanten Systemelemente (z. B. Bauteile, Baugruppen und Zwischenzustände im Herstellungsprozess) spezifiziert. Auf Grundlage der identifizierten zu fertigenden Systemelemente und ihrer Verbindungen wird eine erste Montagefolge abgeleitet. Anschließend werden die Materialelemente in Eigen- und Fremdfertigung unterteilt. Für die Bauteile aus Eigenfertigung ist der Arbeitsablauf auszuarbeiten. Dazu werden geeignete Fertigungstechnologien bestimmt, Fertigungstechnologieketten gebildet und die Zwischenzustände der Bauteile ermittelt [BGN+09, S. 529], [GDK+11, S. 775], [NBG13, S. 621ff.].

Konzipierung auf Ressourcenebene: Für die Realisierung der spezifizierten Fertigungs- und Montageprozesse werden Ressourcen ausgewählt. Prozesse können häufig auf unterschiedlichen Maschinen realisiert werden. Ein Bohr-Prozess kann sowohl mit einem CNC-Bearbeitungszentrum als auch mit einer Standbohrmaschine umgesetzt werden. Somit ergeben sich alternative Konzepte für das Produktionssystem. Diese bilden den Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsplanung [BGN+09, S. 529f.], [GDK+11, S. 775], [NBG13, S. 623].

Wechselwirkungen: Zwischen der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem bestehen vielfache Wechselwirkungen. Dies gilt insb. für die Phasen Konzipierung auf Modulebene, Planen und Klären der Aufgabe (Produktionssystem) und Konzipierung auf Prozessebene. Beispielsweise hat die Auswahl einer Fertigungstechnologie direkten Einfluss auf die Gestalt und den Werkstoff des Produkts. Die zyklischen Pfeile in Bild 2-19 deuten dies an. Die Konzipierung von Produkt und Produktionssystem muss daher parallel und in enger Abstimmung erfolgen [GDK+11, S. 774].

2.6.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Die Entwicklungsmethodik ermöglicht die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme. Hierbei bestehen jedoch Defizite. Die Produktmodellierung mittels 3D-CAD-Systemen ist für die Konzipierung ungeeignet [Lem09, S. 18]. Die Spezifikationstechnik CONSENS stellt keine Beschreibungsmittel für eine intuitive und effiziente Beschreibung der Gestalt mittels Hand- oder 2D-Skizzen zur Verfügung. Weiterhin unterstützt die Entwicklungsmethodik die Erarbeitung der Prinziplösung sowie die Konzipierung des zugehörigen Produktionssystems. Jedoch ist insb. der Übergang von der Konzipierung des Produkts in die Produktionssystemkonzipierung unzureichend beschrieben. Beispielsweise wird keine Produktstrukturierung unter montagetechnischen Gesichtspunkten unterstützt.

Die zu entwickelnde Systematik soll sich in die beschriebene Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronische Systeme einfügen. Die Vorgehensweise für die integrative Konzipierung der Montage wird in das bestehende Vorgehensmodell integriert. Auf Basis der in den Partialmodellen der Prinziplösung enthaltenen Informationen erfolgt die montageorientierte Produktstrukturierung. Die Spezifikationstechnik CONSENS bildet die Grundlage für die Beschreibung des Montagekonzepts, wobei die existierenden Partialmodelle genutzt und ggf. erweitert werden.

2.7 Problemabgrenzung

Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen und Entwicklungszeiten, eine zunehmende Produktkomplexität bei hoher Produktqualität, interdisziplinäre Entwicklungsteams sowie ein dynamisches Unternehmensumfeld prägen den Produktentstehungsprozess moderner maschinenbaulicher Erzeugnisse. Die Produktentstehung kann nicht mehr als Sequenz separater Tätigkeiten verstanden werden. Es bedarf eines Ansatzes, bei dem die Gesamtheit der vernetzten Aktivitäten im Produktlebenszyklus sowie die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion Berücksichtigung finden. Gefordert wird ein übergreifender Ansatz, der die fachdisziplinspezifischen Methoden und Arbeitstechniken integriert [AR11, S. 63].

Ein Lösungsansatz ist die **integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem**. Hierbei werden die sequentiellen Abläufe im Sinne des Simultaneous Engineering parallelisiert und von einem interdisziplinären Entwicklungsteam durchgeführt [Ehr09, S. 188], [AR11, S. 63]. Die Ergebnisse der beteiligten Fachbereiche müssen ausgetauscht und aufeinander abgestimmt werden [ELP+05, S. 21]. Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung bildet ein Rahmenwerk für die integrative Entwicklung [GPW09, S. 38ff.]. Das Bindeglied zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung ist die Montageplanung [Fra03, S. 27]. Durch ein abgestimmtes Vorgehen von Produktentwicklung und Montageplanung ergeben sich die folgenden **Nutzenpotentiale**:

- **Berücksichtigung von Wechselwirkungen:** Zwischen Produktentwicklung und Montageplanung bestehen vielfache Wechselwirkungen. Beispielsweise beeinflussen die Produktgestalt und -struktur die Gestaltung des Montageprozesses. Andererseits determinieren die gewählten Montageverfahren das Produktkonzept, z. B. bzgl. Gestalt und Werkstoff [AR11, S. 63]. Nur unter der Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten lässt sich ein leistungsfähiges und kostengünstiges Produkt entwickeln.
- **Abstimmung der Entwicklungsbereiche:** In den frühen Entwicklungsphasen entstehen ca. 80 % der Produktfehler. Zu 70 % werden die Fehler erst am Ende der Auftragsabwicklung in der Montage und im Versuch erkannt, wenn die Teilsysteme zum Gesamtsystem kombiniert werden. Die Kosten für die Beseitigung nicht ent-

deckte Fehler steigen im Verlauf der Produktentstehung progressiv an²¹ [Hes06, S. 24], [Bos07, S. 111], [Ehr09, S. 138]. Durch die Abstimmung der Entwicklungsbereiche können unnötige zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess vermieden werden. Die Abstimmung zwischen Produktentwicklung und Montageplanung spielt hierbei eine Schlüsselrolle.

- **Frühzeitige Kostenverantwortung:** Die Montage verursacht einen Großteil der späteren Produktkosten [Fra03, S. 27f.], [BK12, S. 344]. Viele kostenbeeinflussende Entscheidungen werden jedoch bereits in der Konzeptphase der Produktentwicklung getroffen. Diese können in den nachgelagerten Bereichen nicht mehr bzw. nur bedingt beeinflusst werden. Somit werden die Herstellkosten bereits frühzeitig festgelegt [EE11, S. 141]. Produktentwicklung und Montageplanung sollten frühzeitig aufeinander abgestimmt werden, um eine positive Beeinflussung der Herstellkosten zu ermöglichen [ESA05, S. 15].

Aufgrund der wirtschaftlichen und technischen Bedeutung der Montageplanung sollten die Produktentwicklung und Montageplanung so früh wie möglich und im engen Wechselspiel erfolgen [Fra03, S. 28]. Die Integration von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung ist heute jedoch nur unzureichend realisiert. Produkt- und Produktionssystementwicklung erfolgen organisatorisch und inhaltlich meist getrennt [NWD+08, S. 409], [PSD+09, S. 988], [SL09b, S. 111], [EEW10, S. 200].

In der Produktkonzipierung werden die Funktionen und der grundsätzliche Aufbau festgelegt. Die Prinziplösung beschreibt fachdisziplinübergreifend die physikalische und logische Funktionsweise des Systems. Weiterhin legt sie die Systemelemente hinsichtlich Anzahl und Anordnung fest und beinhaltet erste Angaben zur Gestalt des Systems [GFD+09, S. 213]. **Ein geeigneter Ansatzpunkt für die integrative Montagplanung ist somit die Prinziplösung eines mechatronischen Systems.** Auf diese Weise werden Produktentwicklung und Montageplanung bereits frühzeitig parallelisiert. Wechselwirkungen zwischen der Prinziplösung und dem Produktionssystemkonzept können von Beginn an berücksichtigt werden [VDI2206, S. 43], [Mic06, S. 2]. Der Übergang von der Prinziplösung des Produkts zur Konzipierung des Produktionssystems ist bislang nicht hinreichend konkretisiert (Bild 2-20).

²¹ Vgl. „rule of ten“ nach CLARK und FUJIMOTO [CF92]. Diese besagt, dass die Fehlerbeseitigungskosten mit jeder Entwicklungsphase um den Faktor Zehn steigen.

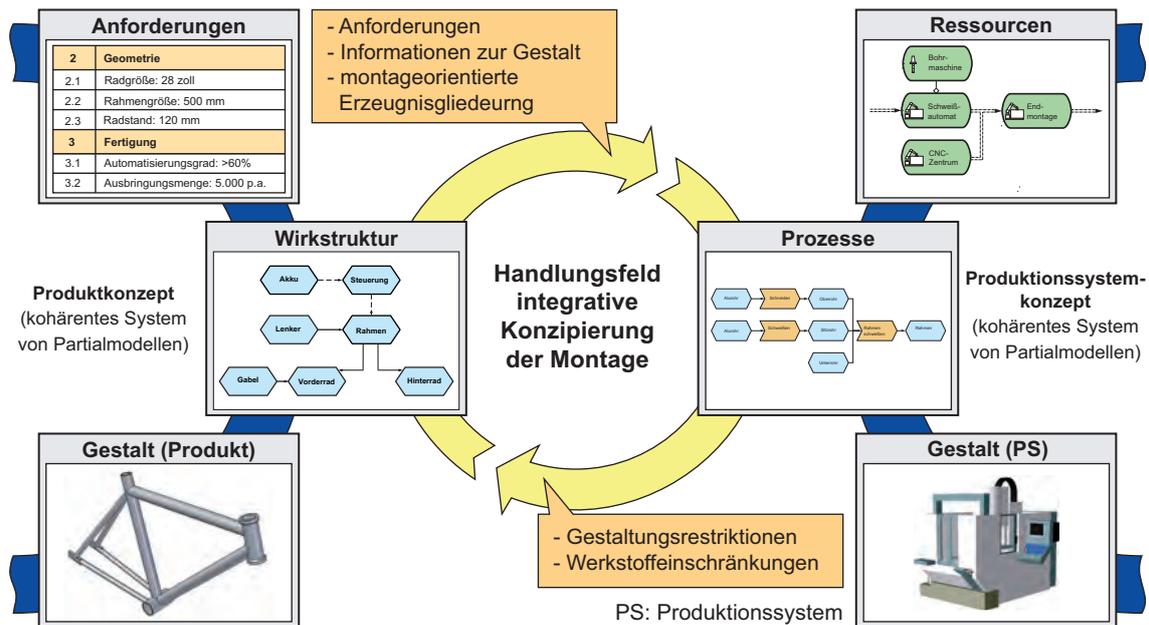


Bild 2-20: Handlungsfeld integrative Konzipierung der Montage

Die für die Montageplanung relevanten Partialmodelle sind Anforderungen, Wirkstruktur und Gestalt. Aus den Produkthanforderungen lassen sich Anforderungen an das Produktionssystem ableiten (z. B. Stückzahlen). Die Wirkstruktur enthält gestaltbehaftete Systemelemente sowie montagerelevante Zusammenhänge (z. B. Kraft- oder Energieübertragungen). Angaben zur Geometrie und räumliche Anordnung der Systemelemente werden im Partialmodell Gestalt beschrieben. Bei der Beschreibung der Prinziplösung des zu entwickelnden Produkts bestehen heute folgende **Defizite**:

- **Gestalt:** Die Spezifikation der Produktgestalt erfolgt in konventionellen 3D-CAD Systemen. Dies verleitet zu einer direkten Modellierung der Gestalt. Konzeptionelle Überlegungen, die Betrachtung von Alternativkonzepten etc. werden hierdurch häufig übergangen [Lem09, S. 18]. Die Modellierung der Gestalt sollte in der Konzeptphase auf Basis von grob maßstäblichen Skizzen erfolgen und die 3D-Modellierung erst mit dem Übergang von der Konzipierung in die Entwurfsphase beginnen [VDI2209, S. 59].
- **Struktur:** Flussbeziehungen aus der Wirkstruktur geben Hinweise auf mögliche Bauteilverbindungen (z. B. erfordert eine Kraftübertragung i. d. R. eine mechanische Verbindung). Die Beschreibung von baulichen Strukturbeziehungen (z. B. Verbindung von Bauteilen, Montagegruppen) ist hingegen nicht vorgesehen. Folglich ist die Ableitung einer montageorientierten Erzeugnisgliederung nicht möglich.

Vor dem beschriebenen Hintergrund stellen sich die folgenden **Forschungsfragen**:

- **Wie können die Bauzusammenhänge eines Produkts in der Prinziplösung spezifiziert werden?** Es ist zu klären, welche Bauzusammenhänge zu spezifizieren

sind. Weiterhin ist festzulegen, in welchen Partialmodellen und mit welchem Detaillierungsgrad diese Informationen modelliert werden.

- **Wie können mechatronische Systeme frühzeitig montageorientiert strukturiert werden?** Die Produktbestandteile sind in der Regel funktionsorientiert zu Baugruppen zusammengefasst. Auf Grundlage der Prinziplösung ist das Produkt montageorientiert zu strukturieren. Es ist zu klären, welche Informationen als Grundlage der Strukturierung dienen und wie Montagegruppen gebildet werden.
- **Wie kann frühzeitig der Montageprozess spezifiziert werden?** Der Montageprozess beschreibt die Montageablaufstruktur und die Montageverfahren. Er dient als Kommunikationsmittel für die Abstimmung zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung. Es ist festzulegen, welche Informationen in welchem Detaillierungsgrad abgebildet werden und wie der Montageprozess mit der Prinziplösung des Produkts und dem Produktionssystemkonzept verknüpft wird.
- **Wie lassen sich in der frühen Phase der Produktentstehung geeignete Montageverfahren auswählen?** In der Konzipierung liegen meist nur unscharfe und teilweise unvollständige Informationen vor. Auf dieser Basis sollen unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten die bestmöglichen Montageverfahren ausgewählt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Auswahl der Fügeverfahren.
- **Wie lassen sich die resultierenden Wechselwirkungen zwischen der Prinziplösung und dem Montagekonzept berücksichtigen?** Durch die Festlegung der Montageablaufstruktur und die Auswahl der Fügeverfahren ergeben sich Restriktionen an das Produkt. Diese müssen in die weitere Produktentwicklung einfließen.

Aus der geschilderten Problematik ergibt sich der **Bedarf** für eine *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf der Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme*. Die Systematik soll die beteiligten Fachleute in der frühen Phase der Produktentstehung bei der Erstellung eines ersten Montagekonzepts unterstützen²². Dies umfasst die montageorientierte Strukturierung und Gestaltung des Produkts, die Ableitung geeigneter Montageablaufstrukturen, die Auswahl von Montageverfahren sowie die Berücksichtigung der gegenseitigen Wechselwirkungen mit dem Produktkonzept. Weiterhin ist die Systematik in das Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER ET AL. [GDK+11, S. 775] zu integrieren.

Der Definition in Kapitel 2.1.3 folgend, besteht eine Systematik aus einem Vorgehensmodell sowie dedizierten Hilfsmitteln für dessen erfolgreiche Umsetzung. Dementsprechend umfasst die Systematik folgende Bestandteile:

²² Die Systematik soll das Entwicklungsgeschehen nicht automatisieren sondern die beteiligten Fachleute in ihrer kreativen Tätigkeit unterstützen und bei häufig wiederkehrenden Aufgaben entlasten.

- Ein **Vorgehensmodell** als Leitfaden für die Entwickler und Planer, welches die erforderlichen Tätigkeiten der Montagekonzipierung detailliert beschreibt. Die Arbeitsschritte werden mit den erforderlichen Ein- und Ausgangsinformationen sowie den einzusetzenden Methoden und Werkzeugen verknüpft.
- **Methoden** für die Lösung von Teilaufgaben im Rahmen der integrativen Montagekonzipierung sowie **Werkzeuge** zur deren Umsetzung.
- Eine **Spezifikationstechnik** für die integrative Beschreibung des Montagekonzepts. Sie soll auf die Spezifikationstechnik CONSENS aufbauen [GBD+12, S. 89ff.] und diese erweitern.

2.8 Anforderungen

Auf Grundlage der Problemanalyse werden die folgenden Anforderungen an die *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* gestellt.

A1) Anwendbarkeit in der Mechatronik: Bei heutigen maschinenbaulichen Erzeugnissen handelt es sich in der Regel um mechatronische Systeme. Daher soll die Systematik branchen- und produktneutral für die integrative Konzipierung der Montage mechatronische Systeme eingesetzt werden können. Das Vorgehensmodell und die zugehörigen Methoden müssen fachdisziplinübergreifend anwendbar sein. Andernfalls sind fachdisziplinspezifische Vorgehensmodelle und Methoden auszuprägen.

A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme: Für die integrative Konzipierung von mechatronischen Systemen und der zugehörigen Produktionssysteme existiert eine Entwicklungsmethodik (vgl. Kap. 2.6). Die geforderte Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage muss sich in diese Methodik integrieren.

A3) Prinziplösung als Ausgangspunkt: Die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem muss von Beginn an integrativ erfolgen. Der frühestmögliche Ausgangspunkt für die Montageplanung ist die Prinziplösung des zu entwickelnden Systems. Somit muss die Systematik in der Phase der Konzipierung ansetzen.

A4) Frühzeitige Spezifikation der Produktgestalt: Den Ausgangspunkt für die Montageplanung bildet die Produktgestalt. Grobe Abmessungen, Lage und Anzahl von Kontaktpunkten oder Verbindungseigenschaften (z. B. Lösbarkeit, Zugänglichkeit) werden in der Regel bereits frühzeitig definiert. Die Systematik muss die Festlegung montagerelevanter Gestaltinformationen in der Konzipierungsphase ermöglichen.

A5) Frühzeitige montageorientierte Produktstrukturierung: Die Montageablaufstruktur basiert auf der montageorientierte Erzeugnisgliederung des Produkts. In der Konzipierung liegt der Fokus auf der Wirkungsweise des Systems. Eine montageorien-

tierte Erzeugnisgliederung liegt noch nicht vor. Die Systematik muss daher die frühzeitige montageorientierte Produktstrukturierung auf Basis der Prinziplösung ermöglichen.

A6) Auswahl von Montagetechnologien: Ein zentraler Aspekt der Montageplanung ist die Auswahl geeigneter Montageverfahren bzw. -technologien. Die Systematik muss daher entsprechende Methoden beinhalten, um auf Grundlage des Produktkonzepts eine frühzeitige Auswahl zu ermöglichen.

A7) Berücksichtigung montagetechnischer Restriktionen: Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem bestehen beidseitig. Es ist nicht ausreichend, nur die Einflüsse des Produktkonzepts auf das Montagekonzept zu berücksichtigen. Auch müssen Restriktionen an das Produkt, die sich aus dem Montagekonzept ergeben, in die weitere Produktentwicklung einfließen.

A8) Ganzheitliche Konzipierung der Montage: Das Aufgabenspektrum der Montagekonzipierung entspricht einer frühzeitigen Montageplanung. Es müssen der Montageablauf sowie das Montagesystem spezifiziert werden. Die Systematik muss daher eine frühzeitige Festlegung der Montageablaufstruktur, eine Auswahl der Montageverfahren und eine Grobbeschreibung des Montagesystems (Ressourcen, Layout) ermöglichen.

A9) Nutzung eines disziplinübergreifenden Beschreibungsmittels: In der Konzipierung dient die Prinziplösung als Kommunikationsmittel der beteiligten Fachleute. Abhängigkeiten zwischen dem Produktkonzept und dem Montagekonzept müssen für die Entwickler und Planer deutlich erkennbar sein. Das Montagekonzept muss daher allgemeinverständlich und nachvollziehbar beschrieben sein. Die Notation der Prinziplösung und des Montagekonzepts soll ähnlich sein und eine Wiedererkennung ermöglichen.

A10) Systematische Vorgehensweise: Das Vorgehen in der Produktentstehung ist von Iterationen geprägt (vgl. Kap. 2.2). Mit Hilfe einer systematischen Vorgehensweise kann sichergestellt werden, dass die notwendigen Entwicklungsschritte in der richtigen Reihenfolge durchlaufen werden. Die Dokumentation erfolgt in einem Vorgehensmodell. Die Systematik muss daher ein Vorgehensmodell enthalten, welches die Entwickler und Planer in der zielgerichteten Konzipierung der Montage unterstützt.

3 Stand der Technik

Die vorangegangene Problemanalyse hat den Bedarf nach einer *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* aufgezeigt. Bereits in der frühen Phase der Produktentstehung sind das Produkt und dessen Montage integrativ zu konzipieren. Auf diese Weise finden die Wechselwirkungen zwischen Produktgestalt und den eingesetzten Montageverfahren frühzeitig Berücksichtigung, Fehler können vermieden und die Entwicklungszeit verkürzt werden.

Inhalt dieses Kapitels sind bestehende Ansätze und Arbeiten, die im Kontext der integrativen Konzipierung der Montage relevant sind. In Kapitel 3.1 werden Vorgehensweisen für die integrative Montageplanung vorgestellt. Inhalt von Kapitel 3.2 sind Methoden und Modellierungssprachen für die frühzeitige Beschreibung der Produktgestalt. Auf die montageorientierte Produktstrukturierung geht Kapitel 3.3 ein. Anschließend werden in Kapitel 3.4 Methoden für die Auswahl von Montagetechnologien vorgestellt und Kapitel 3.5 behandelt die montagegerechte Produktgestaltung. Kommerzielle Softwaresysteme sind Inhalt von Kapitel 3.6. Die vorgestellten Ansätze werden auf Grundlage der in Kapitel 2.8 aufgestellten Anforderungen bewertet. Das Ergebnis dieser Bewertung wird in Kapitel 3.7 zusammengefasst und analysiert.

3.1 Integrative Entwicklung von Produkt und Montage

Im Folgenden werden Vorgehensweisen diskutiert, die ein abgestimmtes Vorgehen der Produktentwicklung und der Montageplanung ermöglichen. Sie folgen der Prämisse, dass bei komplexen maschinenbaulichen Erzeugnissen die Montageplanung bereits während der Entwicklung des Produkts erfolgen soll.

3.1.1 Integrierter Vorgehensplan für Konstruktion und Montageplanung nach BICHELMAIER

BICHELMAIER stellt einen integrierten Vorgehensplan vor, der die Abstimmung zwischen Konstruktion und Montageplanung unterstützt und verbessern soll. Dieser beschreibt welche Informationen zu welchen Zeitpunkten zwischen den Bereichen auszutauschen sind und schlägt Vorgehensweisen für diese Abstimmung vor. Der Vorgehensplan basiert auf dem Vorgehen zum methodischen Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] und dem Vorgehen zur Montageplanung nach FELDMANN [Fel97]. Die Arbeitsschritte werden in sog. Konkretisierungsebenen strukturiert. Innerhalb dieser Ebenen erfolgt die Abstimmung zwischen der Konstruktion und der Montageplanung [Bic00, S. 70f.]. Bild 3-1 zeigt den Vorgehensplan.

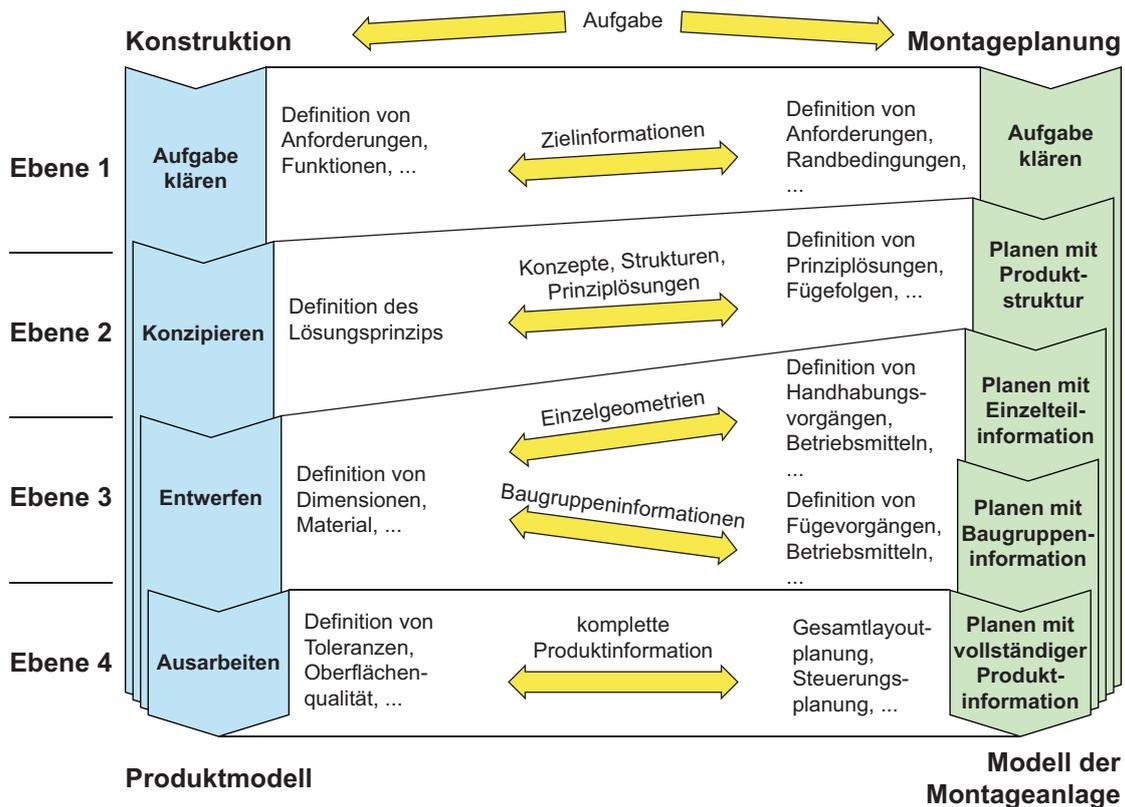


Bild 3-1: Integrierter Vorgehensplan [Bic00, S. 71]

Ebene 1 – Aufgabe klären: Auf der obersten Konkretisierungsebene werden die Ziele aufeinander abgestimmt. Die Schnittstelle zwischen dem Produkt und der Montageanlage bildet der Montagevorgang. Aufgrund dieser engen Vernetzung ergeben sich in der Regel Zielkonflikte zwischen den Bereichen, die zu lösen sind [Bic00, S. 71].

Ebene 2 – Konzipieren – Planen mit Produktstruktur: In dieser Ebene werden Konzepte für das Produkt und die Montageanlage erstellt. Zum Beispiel werden eine montagegerechte Erzeugnisgliederung sowie ein Ablaufplan erarbeitet. Auf dieser Basis kann die Verfügbarkeit der benötigten Betriebsmittel geprüft und die erforderlichen Anlagenkomponenten können grob ausgewählt werden [Bic00, S. 71].

Ebene 3 – Entwerfen – Planen mit Einzelteil- und Baugruppeninformationen: Auf Seiten des Produkts erfolgt die Festlegung der Gestalt von Bauteilen und Baugruppen (z. B. Dimensionen, Hüllvolumen, Materialien). Auf Grundlage dieser Informationen werden montagerrelevante Eigenschaften überprüft, wie Speicherbarkeit oder Handhabbarkeit. Weiterhin werden auf Basis der Baugruppeninformationen die Verbindungen zwischen den Bauteilen überprüft, der zugehörige Montageprozess konkretisiert und die Betriebsmittel festgelegt [Bic00, S. 71f.].

Ebene 4 – Ausarbeiten – Planen mit vollständigen Produktinformationen: In dieser Ebene wird das Produkt final ausgearbeitet. Für die Montageplanung stehen somit die

gesamten Produktinformationen zur Verfügung. Diese bilden die Grundlage für die Erarbeitung von Layout- und Steuerungsplänen [Bic00, S. 72].

Innerhalb der einzelnen Ebenen werden die Arbeitsschritte *Aufgabenklärung*, *Lösungssuche* und *Lösungsanalyse, Bewertung, Auswahl* zyklisch für die Aspekte Produkt, Montagevorgang und Montageanlage durchlaufen. Bild 3-2 zeigt das Vorgehen.

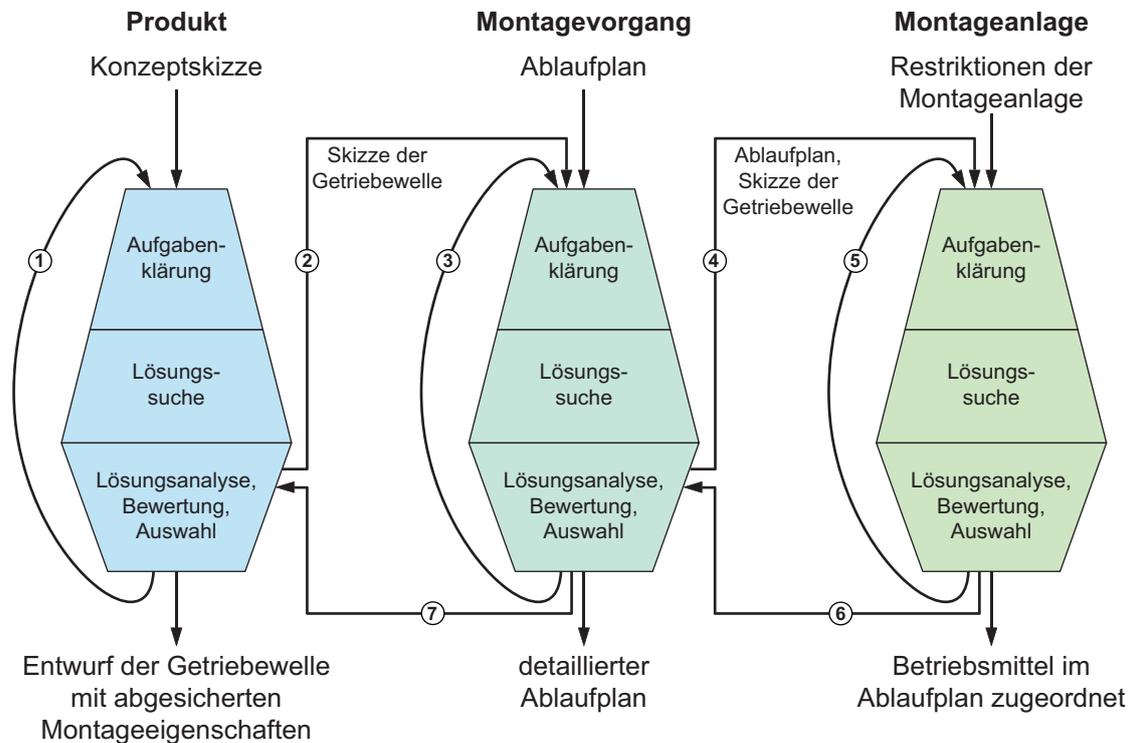


Bild 3-2: Ablauf der Absicherung einer montagerelevanten Produkteigenschaft [Bic00, S. 74]

Auf Basis der Konzeptskizze wird der Vorgehenszyklus *Getriebe entwerfen* solange durchlaufen, bis eine zufriedenstellende Lösung gefunden ist (1). Sind nicht alle montagerelevanten Produkteigenschaften abgesichert (z. B. die Speicherbarkeit der Getriebewelle) erfolgt einer Abstimmung mit dem Montageplaner (2). Dieser durchläuft den Vorgehenszyklus *Ablaufplan erstellen* auf Ebene der Montagevorgänge für die gesamte Baugruppe (3). Sind die erforderlichen Betriebsmittel noch nicht ausgewählt wechselt er in den Zyklus *Betriebsmittel auswählen* (4). Hier werden geeignete Betriebsmittel recherchiert und ausgewählt (5). Auf dieser Grundlage kann der Ablaufplan finalisiert (6) und die Anpassung der Produktgestalt angestoßen werden (7) [Bic00, S. 74f.].

Bewertung: Der Ansatz nach BICHELMAIER beschreibt die abgestimmte Vorgehensweise zwischen Konstruktion und Montageplanung auf Grundlage existierender Vorgehensmodelle. Abstimmungspunkte und die auszutauschenden Informationen werden aufgezeigt und die Montage wird ganzheitlich betrachtet. Die Beschreibung des Vorgehens erfolgt auf einer sehr abstrakten Ebene. Zwar stellt BICHELMAIER detailliertere Prozessbausteine zur Verfügung, die durchzuführenden Tätigkeiten werden jedoch nicht

detailliert beschrieben. Die Montageplanung beginnt bereits mit der Produktentwicklung. Somit bildet die Prinziplösung den Ausgangspunkt der Montageplanung und die montageorientierte Produktstrukturierung erfolgt frühzeitig. Methoden für die Produktgestaltung, die Produktstrukturierung und die Technologieauswahl werden nicht bereitgestellt.

3.1.2 Integrierte Produktentwicklung und Montageplanung nach GRUNDWALD

GRUNDWALD entwickelt eine Methode für die integrierte Produktentwicklung und Montageplanung. Die Grundlage bilden Prozessbausteine, welche Teilaufgaben des Produktentwicklungs- und Montageplanungsvorgehens beschreiben. Diese sind in einem Baukasten strukturiert und ermöglichen die Planung des Gesamtprozesses. Den Kern des Vorgehens bilden die vier Schritte *Zielfindung*, *Konzepterarbeitung*, *Moduldefinition* sowie *Modulentwicklung und -detaillierung* (Bild 3-3).

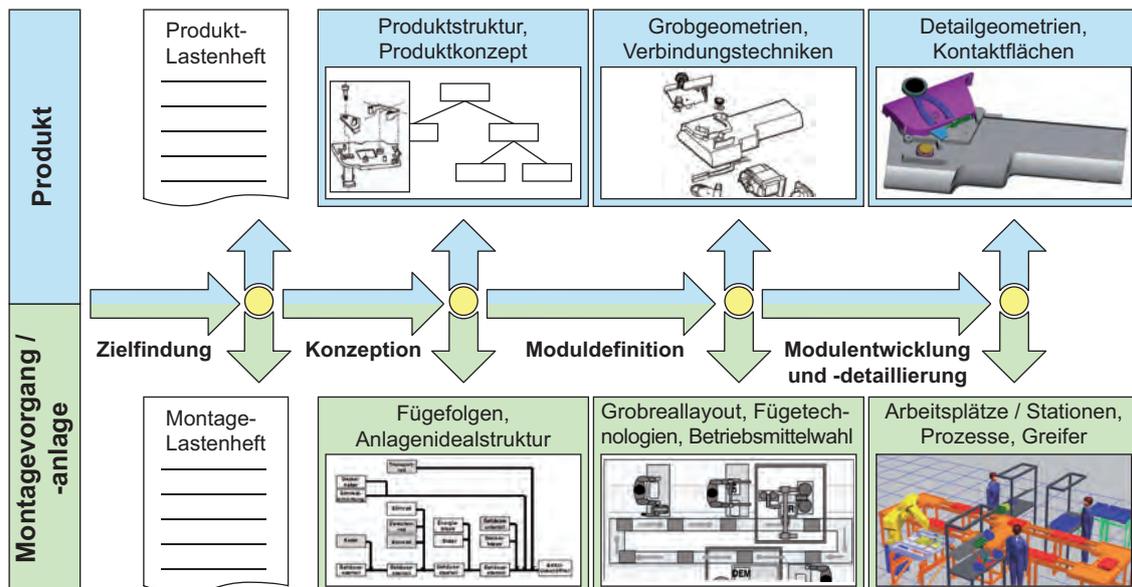


Bild 3-3: Makrozyklus der integrierten Produktentwicklung und Montageplanung [Gru02, S. 100]

Zielfindung: In dieser Phase ist die Hauptaufgabe die Beschaffung und Aufbereitung von Informationen. Kundenwünsche und Unternehmensziele werden gesammelt und aufbereitet. Hierbei wird zwischen integrierten Zielen (z. B. Produktgeometrie) und spezifischen Zielen differenziert. Letztere unterteilen sich in produktspezifische (z. B. Funktionen), montagevorgangsspezifische (z. B. Taktzeit) und montagesystemspezifische Ziele (z. B. Flächenbedarf). Die integrativen Ziele müssen in enger Abstimmung zwischen Konstruktion und Montageplanung bearbeitet werden. Als Resultat dieser Phase liegen Lastenhefte für das Produkt und die Montage vor [Gru02, S. 102f.].

Konzepterarbeitung: Das Ziel dieser Phase sind die Prinziplösungen des Produkts und des Montagesystems. Für das Produkt wird die Funktionsweise festgelegt und eine erste grobe Baustruktur entwickelt. Die Baustruktur gliedert das Produkt in Module und Bauteile und wird in enger Abstimmung mit der Modul-Fügereihenfolge erarbeitet. Auf Basis der Fügereihenfolge entstehen das Konzept der Montageanlage sowie ein erstes Groblayout. Die Strukturierung von Produkt, Fügereihenfolge und Montageanlage erfolgt in Abstimmung zwischen Konstrukteuren und Montageplanern [Gru02, S. 103].

Moduldefinition: Entsprechend einer Kapazitätsteilung werden PVA-Module gebildet. Diese beschreiben Einheiten aus Aspekten von Produkt, Vorgang und Anlage. Die PVA-Module werden anschließend kategorisiert (vorhanden, anzupassen, neu zu entwickeln) und innerhalb von Modulteam aus Produktentwicklung, Montagevorgangs- und Anlagenplanung integrativ detailliert. Zum Beispiel werden die Handhabungsprozesse und Referenzpunkte sowie ein grobes Reallayout der Anlage festgelegt [Gru02, S 104].

Modulentwicklung und -detaillierung: Die Modulentwicklung umfasst erste geometrische Festlegungen bzgl. Dimension, Form und Werkstoff. Verbindungselemente und Füge-technologien werden in enger Abstimmung zwischen Konstrukteur und Montageplaner ausgewählt. Der Montageprozess wird mittels Grundoperationen beschrieben (z. B. Speichern, Vereinzeln, Bewegen, Fügen) und es werden erste Betriebsmittel ausgewählt. Die Gestaltung von Produkt, Betriebsmittel und Montageanlage sollte hierbei ganzheitlich erfolgen. In der anschließenden Moduldetaillierung erfolgt die Festlegung der Maße und Oberflächeneigenschaften. Auf Grundlage der Handhabungseinrichtungen werden z. B. Greifflächen und Aufnahmebohrungen definiert. Für die Montageanlagen wird das Feinlayout entworfen [Gru02, S. 104.].

Bewertung: GRUNWALD beschreibt eine Vorgehensweise zur integrativen Entwicklung von Produkt und Montage. Das Vorgehen deckt den gesamten Prozess ab, von der Zieldefinition über die Konzipierung bis zur Detailgeometrie bzw. dem Anlagenlayout. Die Beschreibung erfolgt sehr abstrakt mit vier Hauptphasen. Für die Ausprägung projektspezifischer Vorgehensweisen stellt GRUNWALD insgesamt 85 Prozessbausteine bereit. Den Prozessschritten sind z. T. Methoden zugewiesen, wobei die Angaben sehr allgemein gehalten sind (z. B. Analogiebetrachtungen, Kreativitätstechniken, Bewertungs- und Auswahlmethoden) und nur wenige konkrete Methoden genannt werden. Hierdurch bietet der Ansatz eine nur eingeschränkte Unterstützung bei den durchzuführenden Tätigkeiten.

3.1.3 Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen nach MÜLLER

Die von MÜLLER entwickelte Methodik ermöglicht die frühzeitige Generierung von Produktionsverfahrensketten auf Grundlage erster Produktskizzen und unscharfer Produktinformationen. Hierbei werden neben den im Unternehmen bekannten Technologien auch neue Technologien berücksichtigt [Mül08, S. 10]. Die Methodik umfasst Mo-

delle zur Abbildung von technologischem Wissen, zur Berücksichtigung von Interdependenzen und zur Bewertung von Alternativen sowie ein Vorgehensmodell.

Die Abbildung von **technologischem Wissen** erfolgt unternehmensspezifisch. Auf die informationstechnische Realisierung geht MÜLLER nicht weiter ein. Für die Strukturierung des Wissens schlägt er bestehende Arbeiten vor. Dies sind die DIN 8580 *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung* und ihre Verweise für die Strukturierung von Fertigungsverfahren [DIN8580] sowie die VDI-Richtlinie 2860 *Montage- und Handhabungstechnik* [VDI2860] für die Aspekte Handhabung und Montage. Weiterhin werden die Arbeiten von KNOCHE [Kno04] und MORYSON [Mor04] für die Strukturierung von Fertigungstechnologien und Betriebsmitteln herangezogen [Mül08, S. 88ff.]

Interdependenzen beschreiben Abhängigkeiten zwischen dem Produkt und den Produktionstechnologien sowie zwischen mehreren Produktionstechnologien. Für ihre Abbildung stehen mehrere Hilfsmittel zur Verfügung: Produkte werden entsprechend einer Strukturierungskonvention in Produktfunktionen, -elemente und -subelemente untergliedert. Analog erfolgt die Einteilung der Produktionsverfahren in Verfahrensgruppen. Der Fokus liegt hierbei auf den maßgeblich wertschöpfenden Verfahren, den sog. Primärverfahren [Mül08, S. 94ff.]. Die Zuordnung von Produktionsverfahren zu Produktelementen erfolgt mit Hilfe der Produkt-Primärverfahren-Matrix. Für die Paarungen von Produktelement und Produktionsverfahren werden Kennzahlen festgelegt. Sie beschreiben die Art der Relation (z. B. muss, optional, darf nicht), mögliche Verfahrensalternativen zur Erzeugung eines Produktelements und den Einfluss eines Verfahrens auf weitere Produktelemente [Mül08, S. 100f.]. Die Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Primärverfahren wird durch die Primärverfahren-Primärverfahren-Matrix unterstützt. Diese beschreibt, ob ein Verfahren Vor- bzw. Nachfolgeverfahren benötigt. Zwangsfolgen von mehreren Produktionsverfahren (z. B. das Entfetten vor einem Klebprozess) werden zu Verfahrensmodulen zusammengefasst [Mül08, S. 101f.].

Für die **Bewertung** der alternativen Verfahrensketten kommen qualitative und quantitative Zeit- und Kostenbewertungen zum Einsatz. Diese erlauben die Bewertung von Lösungsalternativen mit unterschiedlichem Konkretisierungsgrad. Die Güte der Bewertungsaussagen steigt somit mit fortschreitender Entwicklung [Mül08, S. 106ff.].

Das von MÜLLER beschriebene **Vorgehen** gliedert sich in vier Phasen. Diese sind ggf. mehrfach iterative zu durchlaufen. Bild 3-4 zeigt die Schritte ohne Rücksprünge.

Integrierte Produktdefinition: 2D-Skizzen, Werkstoffangaben und Lösungsprinzipien des zu entwickelnden Produkts bilden die Eingangsinformationen. Zunächst wird das Produkt in die Produktklassen des Unternehmens einsortiert. Die Grundlage bilden Ähnlichkeitsbetrachtungen, bspw. der Funktion, Beanspruchung und Geometrie. Die Produktklasse stellt eine Beschreibung der zugrundeliegenden Produkte mit einer Maximalausprägung der Produktfunktionen, Produktelemente und Produktsubelemente dar. Bei dem Beispiel des Produkts *Turbinenschaufel* ist *Kühlung* eine Produktfunktion und

Kühlbohrung ein Produktelement. Anschließend werden die erforderlichen Produktelemente für das spezifische Produkt ausgewählt [Mül08, S. 129].

Verfahrenskettendefinition: Ziel dieser Phase sind erste grobe Verfahrensketten. Hierzu werden die Produktelemente in eine Produkt-Primärverfahren-Matrix eingetragen und es werden Produktionsverfahren zugeordnet. Zum Beispiel wird dem Produktmerkmal *Verbindung zweier Produktelemente* das Produktionsverfahren *Schweißen* zugewiesen. Anschließend werden die gewählten Produktionsverfahren in eine Reihenfolge gebracht. Hierbei kommen die Verfahren nach FALLBÖHMER [Fal00], TROMMER [Tro01] und KNOCH [Kno04] zum Einsatz [Mül08, S. 130ff.].

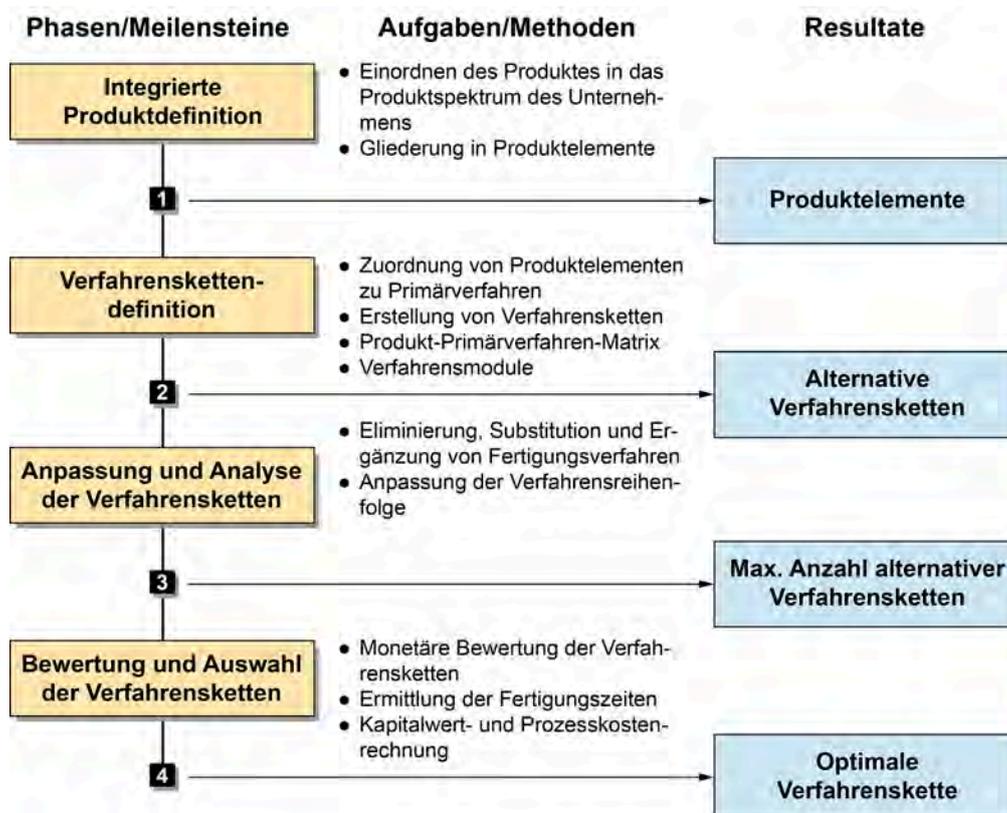


Bild 3-4: Vorgehen bei der entwicklungs- und planungsbegleitenden Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen [Mül08, S. 128]

Anpassung und Analyse der Verfahrensketten: Die Produktionsplaner optimieren die erstellten Verfahrensketten, indem sie Verfahren eliminieren, substituieren, ergänzen oder die Reihenfolge anpassen. Als Resultat liegt die maximale Anzahl geeigneter Verfahrensketten vor [Mül08, S. 136ff.].

Bewertung und Auswahl von Verfahrensketten: In diesem Schritt wird die Anzahl der alternativen Verfahrensketten reduziert. Dies erfolgt auf der Grundlage von wirtschaftlichen und qualitativen Aspekten. Die wirtschaftliche Bewertung umfasst die Bestimmung der Fertigungskosten und der Investitionskosten. Die Fertigungskosten werden über den Maschinenstundensatz und die benötigten Zeiten ermittelt. Hierbei werden

die Zeiten geschätzt, standardisiert, historisch ermittelt oder berechnet. Die Investitionen werden mittels Kapitalwertmethode bestimmt. Für die qualitative Bewertung kommt eine Nutzwertanalyse zum Einsatz. Als Resultat liegt die am besten geeignete Verfahrenskette vor [Mül08, S. 136ff.].

Bewertung: Die von MÜLLER entwickelte Methodik ist grundsätzlich für die Konzipierung mechatronischer Systeme geeignet. Der Fokus liegt jedoch auf konventionellen Produkten [Mül08, S. 177]. Das Produkt wird hierfür in seine Elemente gegliedert und strukturiert. Für die Produktelemente mit verbindenden Eigenschaften werden anschließend systematisch Fügeverfahren ausgewählt und Prozessketten gebildet. Aufgrund der sehr detaillierten Strukturierung des Produkts in Subelemente (z. B. Kühlbohrungen einer Turbinenschaufel) ist die Methodik in der Konzipierung nur sehr eingeschränkt anwendbar. Die notwendigen Informationen liegen in dieser Phase noch nicht vor.

3.1.4 Systematik zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme nach NORDSIEK

Die Systematik nach NORDSIEK ermöglicht die Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Produktentwickler und Fertigungsplaner werden frühzeitig bei der Erstellung erster Produktionssystemkonzepte unterstützt [Nor12, S. 3]. Sie umfasst ein Vorgehensmodell, eine Spezifikationstechnik sowie unterstützende Methoden. Das Vorgehen ist in das Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme eingebettet (vgl. Kap. 2.6.2). Es gliedert sich gemäß Bild 3-5 in drei Hauptphasen, die sich in weitere Unterphasen aufteilen. Für eine detaillierte Beschreibung der Unterphasen sei auf [Nor12] verwiesen.

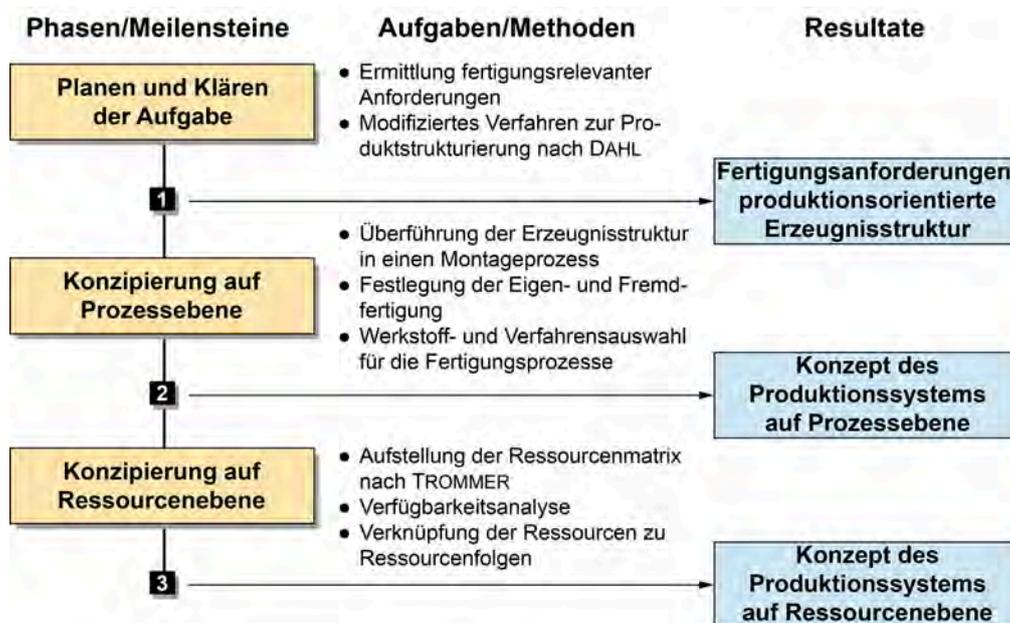


Bild 3-5: Vorgehen für die Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK [Nor12, S. 99]

Planen und Klären der Aufgabe (des Produktionssystems): Den Ausgangspunkt dieser Phase bildet das Produktkonzept. Die Anforderungsliste wird auf fertigungsrelevante Anforderungen reduziert. Basierend auf den Informationen aus der Wirkstruktur und der Gestalt des Produkts wird eine produktionsorientierte Erzeugnisstruktur abgeleitet [Nor12, S. 100]. Hierbei kommt das Verfahren zur Produktstrukturierung nach DAHL zum Einsatz [Dah90] (vgl. Kap. 3.3.3). Gestaltbehaftete Systemelemente und ihre strukturellen Verbindungen werden identifiziert und entsprechend der Funktionshierarchie strukturiert. Anschließend wird auf Basis der Anzahl der strukturellen Verbindungen der einzelnen Systemelemente die produktionsorientierte Erzeugnisgliederung erstellt [Nor12, S. 108f.].

Konzipierung auf Prozessebene: Die produktionsorientierte Erzeugnisgliederung wird um lösungsneutrale Montagevorgänge ergänzt und in einen Montageprozess überführt. Anschließend werden die Systemelemente auf Basis eines Prüfschemas in Eigen- und Fremdfertigung unterteilt. Für die Elemente in Eigenfertigung werden die erforderlichen Fertigungsprozesse bestimmt. Die Auswahl erfolgt in Anlehnung an die Methode zur Technologievorauswahl nach FALLBÖHMER [Fal00] in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung [Nor12, S. 100].

Konzipierung auf Ressourcenebene: Frühzeitige Analyse (z. B. bzgl. Wirtschaftlichkeit) erfordern die Festlegung von Ressourcen. Diese werden den einzelnen Prozessschritten zugeordnet. Die Auswahl geeigneter Ressourcen erfolgt auf Basis von Ressourcenmatrizen und ist an die Methodik zur Generierung von Fertigungsfolgen nach TROMMER angelehnt [Tro01]. Das Konzept auf Ressourcenebene bildet den Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung des Produktionssystems.

Bewertung: Die von NORDSIEK entwickelte Systematik erweitert die Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme. Ausgehend von der Prinziplösung unterstützt sie die integrative Konzipierung von Produktionssystemen. Der Fokus liegt hierbei auf der Auswahl von Fertigungsverfahren und der Bildung von Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen. Eine frühzeitige Produktgestaltung sowie die Montage von Bauteilen zu Baugruppen werden nicht bzw. nur peripher betrachtet. Weiterhin erfolgt die Produktstrukturierung ausgehend von der Funktionshierarchie, weshalb sie nur eingeschränkt für die montageorientierte Strukturierung geeignet ist.

3.2 Frühzeitige Gestaltmodellierung

Die Produktgestalt ist die zentrale Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung (vgl. Kap. 2.1.6). Bereits im Rahmen der Konzipierung werden erste Festlegungen zur Gestalt getroffen. Die Gestaltinformationen und die Gliederung der gestaltbehafteten Systembestandteile in Baugruppen und Module bilden den Ausgangspunkt für die Montageplanung. Für eine integrative Konzipierung der Montage ist daher eine frühzeitige Beschreibung der Gestalt von Bauteilen und Baugruppen unerlässlich. Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, die eine frühzeitige

Gestaltmodellierung ermöglichen. Die Ansätze haben gemein, dass sie Gestaltkonzepte einfach und verständlich beschreiben. Von dem Detaillierungsgrad gängiger 3D-CAD Systeme sind sie meist weit entfernt.

3.2.1 Methodisches Gestalten nach EHRENSPIEL

EHRENSPIEL fasst unter der Gestalt eines Produkts die Gesamtheit seiner geometrisch beschreibbaren Merkmale und des Werkstoffs zusammen. Dabei differenziert er zwischen der Wirkgestalt, welche durch die Funktionalität des Produkts festgelegt wird, und der Produktionsgestalt, die sich auf Basis der Forderungen aus Teilefertigung und Montage ergibt [Ehr09, S. 440].

Die Beschreibung der Gestalt erfolgt mit Hilfe von zwei Basiselementen und wird in Form von Skizzen dargestellt (Bild 3-6). **Wirkflächen** ermöglichen die Umsetzung von Haupt- und Nebenfunktionen und somit den Umsatz von Energien, Stoffen und Informationen. Demgegenüber sind **Konturflächen** nicht funktional erforderlich. Sie verbinden die Wirkflächen zu Wirkkörpern [Ehr09, S. 441].

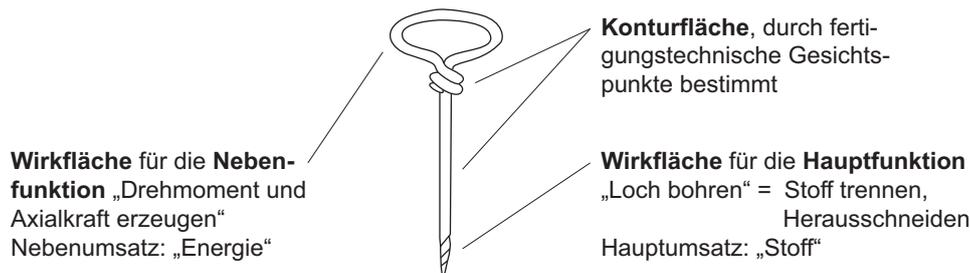


Bild 3-6: Wirk- und Konturflächen am Beispiel eines Nagelbohrers [Ehr09, S. 441]

Der Gestaltungsprozess erfolgt über die direkte und indirekte Variation. Bei der direkten Variation werden systematisch die Wirkflächen und Wirkkörper bzw. die Beziehungen zwischen diesen verändert, z. B. Form, Lage, Zahl oder Größe. Die indirekte Variation der Gestalt erfolgt durch äußere Einflüsse. Dies kann durch eine Variation des Werkstoffs oder der Fertigungs- und Montageverfahren erfolgen [Ehr09, S. 441].

Bewertung: Der Ansatz von EHRENSPIEL gibt Hinweise für die frühzeitige Gestaltmodellierung und beschreibt die grundsätzlichen Basiselemente. Konkrete Beschreibungsmittel umfasst der Ansatz jedoch nicht. Die Besonderheiten mechatronischer Systeme sowie die montageorientierte Produktstrukturierung sind nicht Gegenstand des Ansatzes und werden daher nicht betrachtet.

3.2.2 Baukonzept nach PONN/LINDEMANN

Das Münchener Konkretisierungsmodell (MKM) nach PONN und LINDEMANN ist ein Beschreibungsmodell für den Produktentwicklungsprozess. Das MKM differenziert den Anforderungs- und den Lösungsraum. Der Lösungsraum wird nach dem Konkretisie-

nungsgrad in die Funktions-, Wirk- und Bauebene unterteilt [PL11, S. 26f.]. Die Beschreibung der Produktgestalt erfolgt auf zwei Ebenen und ist in Bild 3-7 dargestellt.

Im Wirkkonzept auf **Wirkebene** werden erste, durch die technische Funktion festgelegte Gestaltaspekte beschrieben. Dies sind bspw. die räumliche Lage und Anordnung einzelner Subsysteme. Diese Informationen bilden den Ausgangspunkt für die Gestaltbeschreibung in der Bauebene [PL11, S. 138].

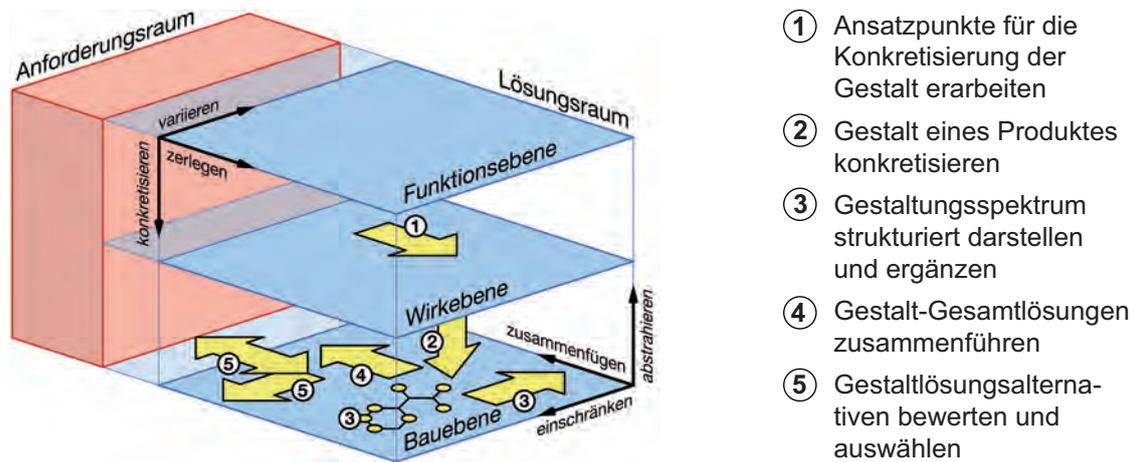


Bild 3-7: Gestaltbeschreibung im Münchener Konkretisierungsmodell [PL11, S. 139]

Das Baukonzept auf **Bauebene** beschreibt die Verbindungsstruktur, die Anordnung und Lage der Systembestandteile zueinander sowie ihre Form und Schnittstellen. Die Betrachtung erfolgt auf der Ebene von Bauteilen und Baugruppen. Die im Baukonzept enthaltenen Informationen lassen Aussagen zu gestaltabhängigen Produkteigenschaften zu (z. B. Bauraum, Gewicht) und ermöglichen somit erste Abschätzungen der Herstellbarkeit und der Herstellkosten [PL11, S. 115]. Das Baukonzept wird zunächst in Form von Verbindungsstrukturen und Prinzipskizzen beschrieben. Mit fortschreitender Konkretisierung werden Gestaltskizzen und 3D-CAD-Modelle der Bauteile und Baugruppen erstellt [PL11, S. 157]. Bild 3-8 zeigt dies am Beispiel eines Klappfahrrades.

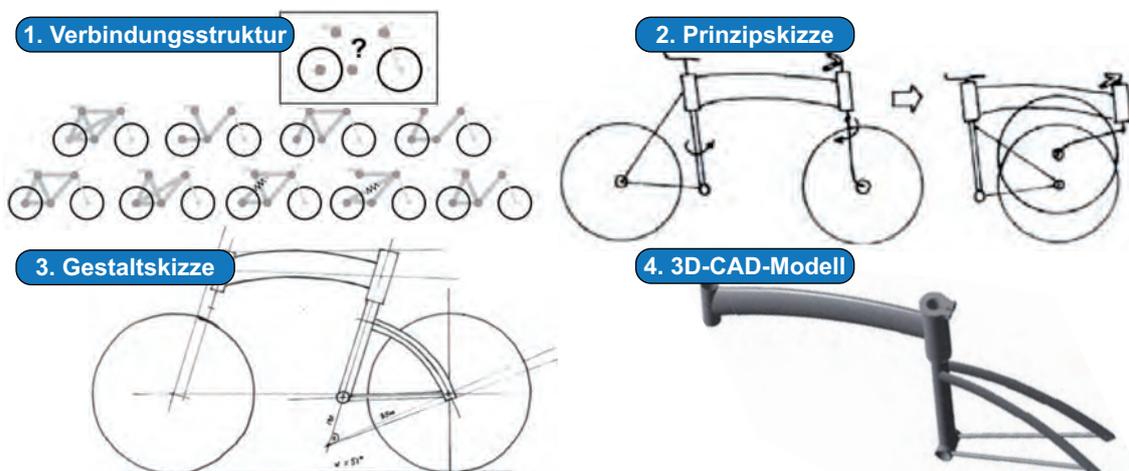


Bild 3-8: Gestaltbeschreibung im Baukonzept nach [Mül04], [PL11, S. 155ff.]

Bewertung: Mit dem Münchener Konkretisierungsmodell (MKM) beschreiben PONN und LINDEMANN die grundsätzliche Vorgehensweise für die Produktgestaltung. Das Vorgehen erfolgt hierbei vom Abstrakten zum Konkreten. Da Vorgehen stimmt in vielen Punkten mit der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme überein und ist grundsätzlich mit dieser kombinierbar. Die Beschreibung der Gestalt beginnt bereits in der Wirkebene und ist somit auch Teil der prinzipiellen Lösung. Das Modell stellt jedoch keine konkrete Beschreibungssprache für die Modellierung zur Verfügung.

3.2.3 Contact and Channel Model nach ALBERS/MATTHIESEN

Das von ALBERS und MATTHIESEN entwickelte Contact and Channel Model (C&CM)¹ unterstützt den Übergang von der funktionalen Systemmodellierung zur Gestaltung der Komponenten. Die zugrundeliegende Hypothese besagt, dass die Funktion eines technischen Systems durch den Kontakt von Wirkflächen erfüllt wird. Ein System besteht somit aus mindestens zwei Wirkflächenpaaren und der sie verbindenden Leitstützstruktur. Das Ziel ist ein grobes Gestaltmodell, welches mittels definierter Basiselemente für Flächen und Volumina beschrieben wird [AM02, S. 55ff.], [Mat02, S. 53].

Wirkflächen (WF) sind Oberflächen eines Körpers, die über einen Kontakt mit anderen Wirkflächen an der Stoff-, Energie- und Informationsübertragung beteiligt sind. Der Kontakt zweier Wirkflächen stellt ein **Wirkflächenpaar** (WFP) dar. Die Wechselwirkung zwischen den Wirkflächen erfolgt im **Funktionskontakt** (FK). Flächen, die nie Wirkflächen sind, werden als **Begrenzungsflächen** (BF) bezeichnet [Mat02, S. 49f.].

Leitstützstrukturen (LSS) sind Volumina, die genau zwei Wirkflächen verbinden und die Stoff-, Energie- und Informationsübertragung ermöglichen. Die Gesamtheit aller Leitstützstrukturen bildet die **Tragstruktur** (TS). Volumina, die nie Tragstrukturen darstellen, werden als **Reststrukturen** (RS) bezeichnet [Mat02, S. 51].

Die Summe der Wirkflächen und Leitstützstrukturen eines Systems stellt die **Wirkstruktur** dar [Mat02, S. 51]. Aus dieser wird die Systemgestalt abgeleitet und als Skizze beschrieben. Bild 3-9 zeigt ein C&C Model am Beispiel eines Elektromotors.

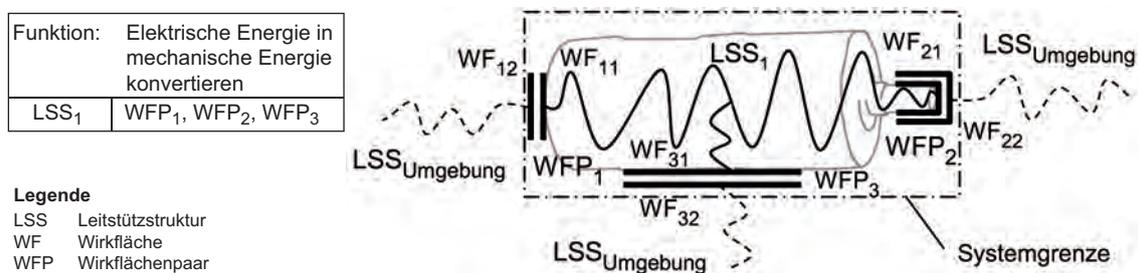


Bild 3-9: C&C Model am Beispiel eines Elektromotors [Sed10, S. 32]

¹ Das C&CM wird auch als „Elementmodell Wirkflächen und Leitstützstrukturen“ bezeichnet.

Bewertung: ALBERS und MATTHIESEN liefern mit dem Contact and Channel Model einen Ansatz für die frühzeitige und systematische Beschreibung der groben Produktgestalt. Durch die Definition von Wirkflächen und Leitstützstrukturen werden die funktionale und die gestalterorientierte Sichtweise kombiniert. Bauteile bzw. Bauteilelemente können mit Systemfunktionen verknüpft werden. Über Wirkflächenpaare werden bauliche Zusammenhänge beschrieben, welche den Ausgangspunkt für die Konzipierung der Montage bilden. Durch die Hierarchisierung der Modelle ist eine montageorientierte Produktstrukturierung prinzipiell möglich, diese wird methodisch aber nicht unterstützt. Weiterhin fehlt es an einer detaillierten Vorgehensweise.

3.2.4 Schrittweise Gestaltsynthese nach LEMBURG

Die von LEMBURG entwickelte Methodik zur Gestaltsynthese basiert auf einer zyklischen Abfolge von Synthese- und Analyseschritten. Für die Beschreibung der Gestalt setzt er auf dem Contact and Channel Model auf (vgl. Kap. 3.2.3) und erweitert dieses um eine Vorgehensweise. Durch diese einfache und intuitive Darstellungsform sollen die kognitiven Ressourcen des Produktentwicklers bestmöglich für den eigentlichen Problemlösungsprozess zur Verfügung stehen [Lem09, S. 100f.].

Der Betrachtungsfokus in der **Analyse** liegt auf Wirkflächenpaaren. Es werden Wirkflächen oder Gruppen von Wirkflächen identifiziert. Weiterhin werden die Schnittstellen der Wirkflächen überprüft, d. h. welche Gegenflächen vorliegen, welche Wirkflächenpaare gebildet werden und ob es mehrere alternative Leitstützstrukturen zur Verbindung der Wirkflächen gibt [Lem09, S. 82].

In der **Synthese** werden die einzelnen Wirkflächen und die sie verbindenden Leitstützstrukturen betrachtet. Wirkflächen werden variiert (z. B. Art, Form, Lage) oder bei Bedarf neu erzeugt. Anschließend werden die Wirkflächen über Leitstützstrukturen zu einer Tragstruktur verbunden. Die sich hierbei ergebenden Begrenzungsflächen und Reststrukturen werden ebenfalls skizziert [Lem09, S. 82].

Die Repräsentation der Produktgestalt erfolgt mittels sog. Prinziplösungskizzen. Hierfür stellt LEMBURG ein Set von Symboliken zur Verfügung (Bild 3-10). Eine gesamte Übersicht findet sich im Anhang (siehe Anhang Bild A-3).

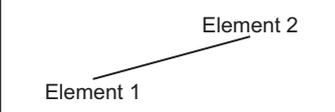
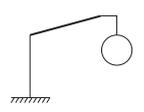
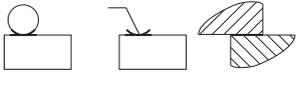
		Darstellung	
		Element	Beispiel
Typ	Struktur		
	Wirkflächenpaar		

Bild 3-10: Symbolik zur Beschreibung der Gestalt (Auszug) [Lem09, S. 73]

Der Aufbau der einzelnen Wirkflächen und somit der Gestalt erfolgt schrittweise für die verschiedenen Haupt- und Nebenfunktionen des Produkts. Aus der Überlagerung der beschriebenen Zusammenhänge resultiert die Gestalt des Bauteils bzw. des technischen Systems. Bild 3-11 zeigt dies am Beispiel eines Hebels. Im linken Teil ist eine Skizze des Gesamtsystems dargestellt. Der rechte Teil zeigt die Beschreibung der Wirkflächen und Leitstützstrukturen für die Hauptfunktion *Kraftübertragung* und die Nebenfunktion *Positionieren* [Lem09, S. 80].

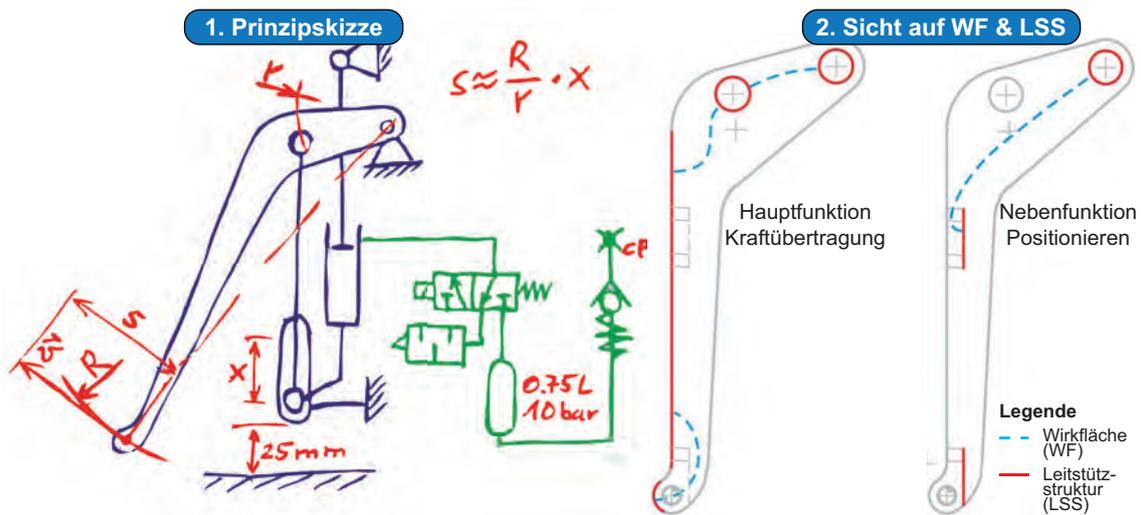


Bild 3-11: Prinzipskizze nach LEMBURG [Lem09, S. 74]

Bewertung: Der Ansatz basiert auf dem Contact and Channel Model und bietet somit eine einfache und nachvollziehbare Möglichkeit für die frühzeitige Gestaltmodellierung. Weiterhin beschreibt LEMBURG ein Vorgehen für die Gestaltsynthese und stellt Symboliken für die Gestaltbeschreibung bereit. Die Strukturierung des Produkts wird hierbei nicht unterstützt und ist lediglich über die Hierarchisierung der Modelle möglich. Durch die allgemeine Darstellungsform ist eine Anwendung für mechatronische Systeme prinzipiell möglich, LEMBURG fokussiert diese Produktgruppe allerdings nicht.

3.2.5 Module Interface Graph nach BLEES

Der von BLEES entwickelte Module Interface Graph (MIG) ist eine schematische Abbildung der Komponenten eines Systems und ihrer Zusammenhänge. Das Ziel ist ein einfaches Verständnis des Systems und der erforderlichen Schnittstellen. Weiterhin bildet der MIG den Ausgangspunkt für die Konkretisierung der Gestalt der einzelnen Bauteile sowie der Bildung von Modulen [Ble11, S. 67f.].

Die Systemelemente werden grob maßstäblich (Größe, Lage, Form) dargestellt. Hierbei wird eine skizzenhafte Darstellungsform verwendet. Über Funktionsbeziehungen werden die Beziehungen zwischen den Systemelementen beschrieben. Es handelt sich um Strukturverbindungen, elektrische und mechanische Leistungen sowie Stoffflüsse, die

sowohl gerichtet als auch ungerichtet auftreten [BK08, S. 304f.], [Ble11, S. 75ff.]. Bild 3-12 zeigt einen Module Interface Graph am Beispiel eines Sprühgeräts.

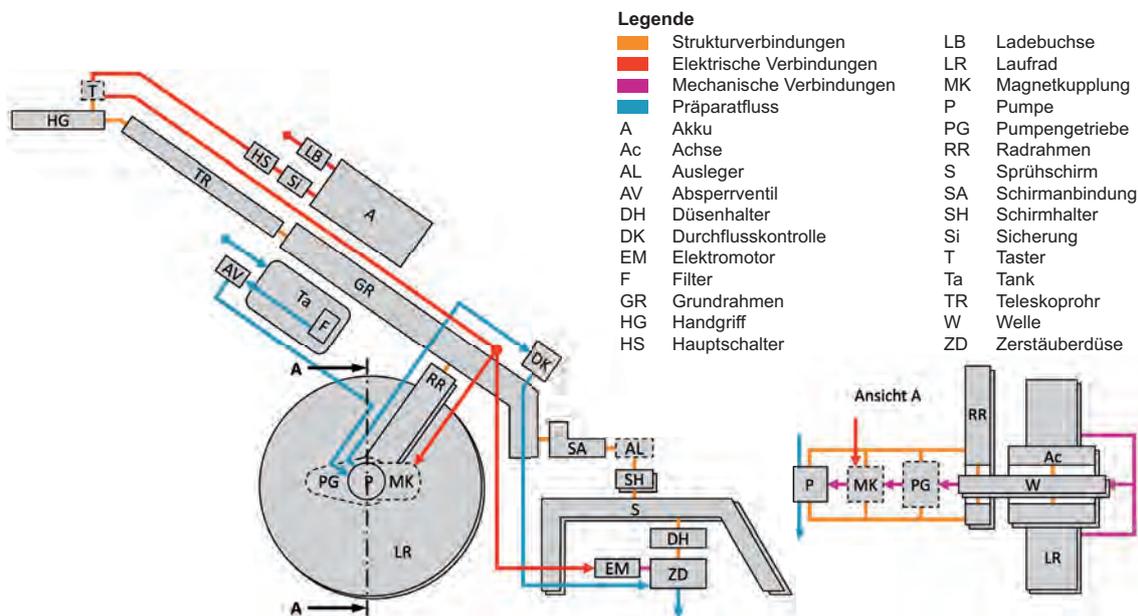


Bild 3-12: Module Interface Graph eines Sprühgeräts nach [BJK10, S. 170]

Bewertung: Der Module Interface Graph ist eine Methode zur frühzeitigen Gestaltmodellierung. Ein grobmaßstäbliches Modell der Systembestandteile wird mit den Flussbeziehungen zwischen den Elementen kombiniert. Durch die Integration von geometrischen Informationen und Wirkzusammenhängen ist die Methode für die Abbildung mechatronischer Systeme geeignet. Aufgrund der integrierten Darstellungsform werden komplexe Systeme mit einer Vielzahl von Flussbeziehungen allerdings schnell sehr unübersichtlich. Die für eine montageorientierte Produktstrukturierung benötigten Informationen sind z. T. im MIG enthalten (z. B. Strukturverbindungen). Eine Beschreibung der erforderlichen Verbindungseigenschaften ist jedoch nicht vorgesehen.

3.3 Montageorientierte Produktstrukturierung

Das Produktkonzept bildet den Ausgangspunkt für die Konzipierung der Montage. Die Strukturierung im Rahmen der Konzipierung erfolgt in der Regel unter entwicklungsrelevanten Aspekten, bspw. unter funktionalen oder variantentechnischen Gesichtspunkten. Die Baugruppen und Module entsprechen daher meist nicht bzw. nur z. T. den Zuständen im Montageprozess. Für die Konzipierung eines ersten Montageablaufs ist die Struktur der Prinziplösung daher ungeeignet. Es ist eine Gliederung in Montagegruppen und Vormontagegruppen erforderlich. Im Folgenden werden Methoden für die Produktstrukturierung vorgestellt, welche auf eine montageorientierte Strukturierung ausgerichtet sind bzw. angepasst werden können.

3.3.1 Design Structure Matrix

Die Design Structure Matrix (DSM) und die Verfahren zur Clusterung wurden maßgeblich von STEWARD, EPPINGER und PIMMLER entwickelt [Ste81], [EWS+94], [PE94], [UE95], [ECW+98] (vgl. [Mau07, S. 53f.]). Sie werden für die Strukturierung von technischen Systemen nach spezifischen Beziehungsaspekten verwendet. Das Ziel sind Gruppen von Systemelementen, die untereinander keine oder nur wenige Beziehungen aufweisen. Das Vorgehen erfolgt in drei Schritten und ist Bild 3-13 dargestellt.

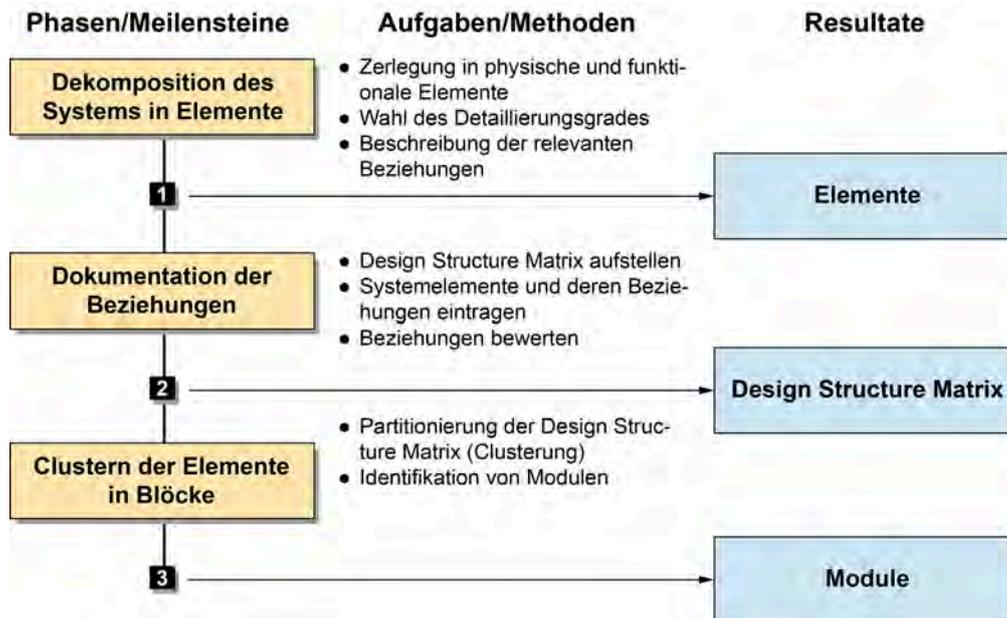


Bild 3-13: Vorgehen der Strukturierung mittels DSM nach [PE94, S. 3]

Dekomposition des Systems in Elemente: Den Ausgangspunkt bildet ein grobes Modell des zu strukturierenden Systems, z. B. in Form einer Prinzipskizze. Hierfür wird das System in seine Systemelemente dekomponiert. Anschließend werden die relevanten Beziehungen zwischen den Systemelementen beschrieben. Dies sind Flussbeziehungen (Stoff, Energie, Information) sowie räumliche Verbindungen [PE94, S. 3].

Dokumentation der Beziehungen zwischen den Elementen: Die Systemelemente sowie ihre Beziehungen werden in die DSM übertragen. Diese ist symmetrisch aufgebaut. In den Zeilen und Spalten sind jeweils die Systemelemente aufgetragen. Die Beziehungen zwischen zwei Systemelementen werden auf einer Skala von stark positiv (starke Verbindung notwendig) bis stark negativ (Verbindung vermeiden) bewertet und in das entsprechende Matrixfeld eingetragen (Bild 3-14 links) [PE94, S. 4f.].

Clustern der Elemente in Blöcke: Bei der anschließenden Strukturierung, der sog. Clusterung, wird die Matrix umsortiert (Bild 3-14 rechts). Dabei werden schrittweise Spalten und Zeilen gleichgerichtet verschoben. Das heißt, dass wenn die Spalte des Systemelements *A* nach rechts verschoben wird, rückt gleichzeitig die Zeile des Systemelements *A* um den gleichen Betrag nach unten. Die Matrix wird solange umsortiert, bis

die Systemelemente mit positiven Beziehungen nah beieinander stehen. Die Zellen mit starken Abhängigkeiten rücken dabei nah an die Diagonale der Matrix. Im Idealfall besitzen die sich so ergebenden Cluster starke interne Beziehungen und lediglich schwache Beziehungen außerhalb ihrer Grenzen [PE94, S. 5f.].

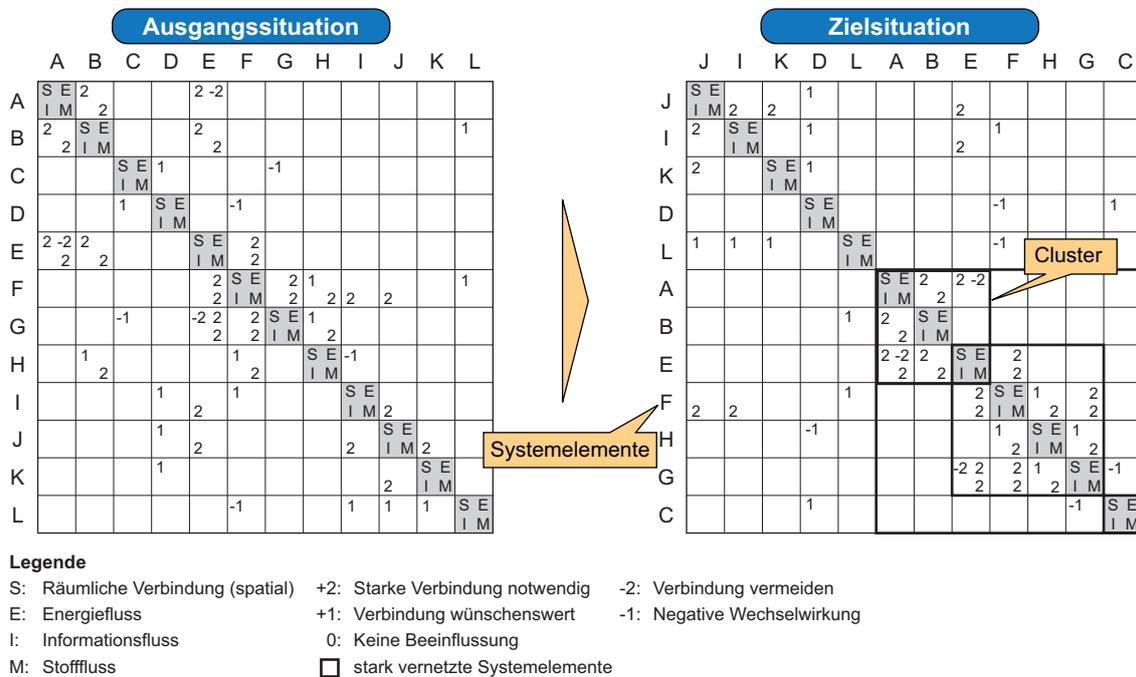


Bild 3-14: Funktionsweise der DSM nach [PE94, S. 6f.] (vgl. [Ste07, S. 69])

Bewertung: Das Verfahren ist klar strukturiert. Eine Vielzahl verfügbarer Software-Werkzeuge unterstützt die Clustering und Auswertung. Das Verfahren eignet sich somit auch für die Anwendung auf komplexe Systeme. Da bei der Strukturierung auch räumliche Verbindungen (spatial) berücksichtigt werden, ist eine montageorientierte Produktstrukturierung grundsätzlich möglich. Die DSM fokussiert dies allerdings nicht. Bei komplexen Systemen ist die Matrixdarstellung schnell unübersichtlich und wenig intuitiv.

3.3.2 Produktstrukturierung nach STEFFEN

STEFFEN hat ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortschrittliche mechatronische Systeme entwickelt. Das Verfahren ist für die frühe Phase der Produktentstehung ausgelegt und setzt auf der Prinziplösung auf. Das Ziel ist eine entwicklungsorientierte Struktur des mechatronischen Systems. Diese soll die notwendigen Abstimmungsaufwände in der weiteren Konkretisierung reduzieren [Ste07, S. 3]. Das Vorgehen gliedert sich in vier Schritte. Iterationsschleifen und somit Rücksprünge können vorkommen, sind aber nicht dargestellt [Ste07, S. 89].

Analyse der Entwicklungsaufgabe: STEFFEN definiert neun Grundtypen von Entwicklungsaufgaben, bspw. „Miniaturisiertes Produkt“. Für die einzelnen Grundtypen be-

schreibt er Empfehlungen und Hinweise für die Produktstrukturierung. Die vorliegende Entwicklungsaufgabe wird analysiert und einem Grundtyp zugeordnet. Im weiteren Verlauf wird die Produktstruktur entsprechend der grundtypspezifischen Empfehlungen ausgeprägt [Ste07, S. 90].

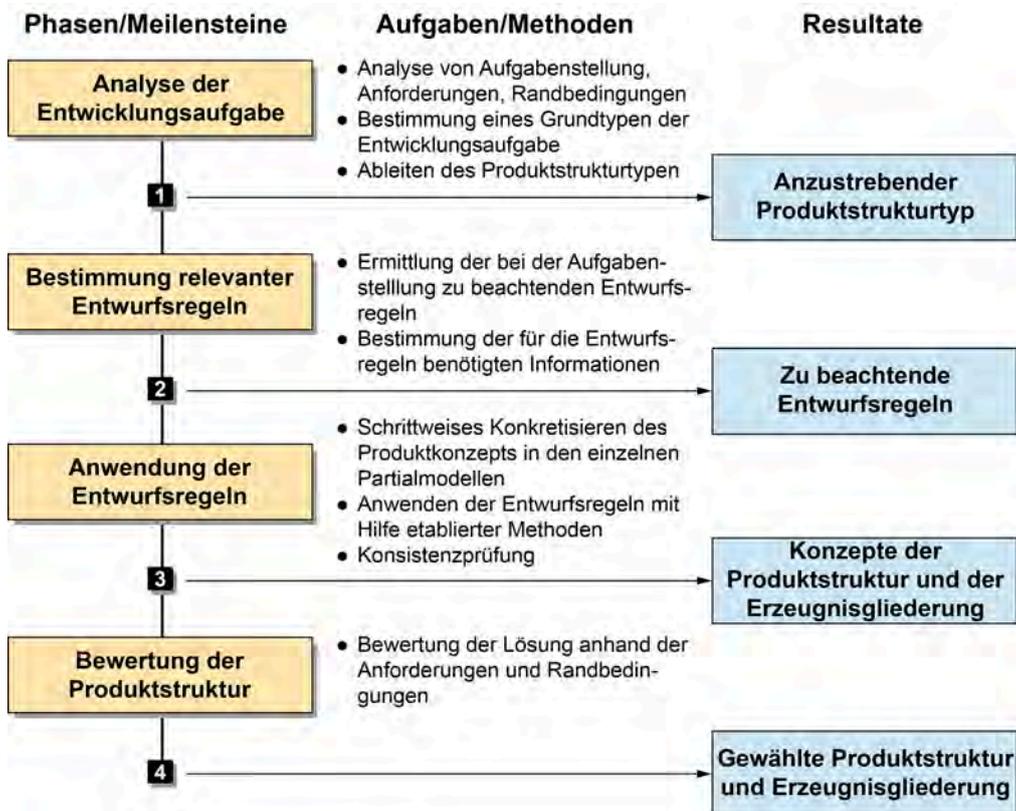


Bild 3-15: Verfahren zur Produktstrukturierung nach STEFFEN [Ste07, S. 89]

Bestimmung relevanter Entwurfsregeln: Für die Unterstützung der beteiligten Entwickler definiert STEFFEN 27 Entwurfsregeln. Diese berücksichtigen die Besonderheiten bei der Entwicklung mechatronischer Systeme. Entsprechend des zuvor identifizierten Grundtyps des Systems werden die relevanten Entwurfsregeln bestimmt [Ste07, S. 90].

Anwendung der Entwurfsregeln: Die Entwurfsregeln werden auf die Partialmodelle der Prinziplösung des zu entwickelnden Systems angewendet (vgl. Kap. 2.6.1). Die Modelle enthalten strukturelevante Informationen, wie z. B. die Beziehungen zwischen Systemelementen der Wirkstruktur [Ste07, S. 91]. Auf Grundlage dieser Informationen kommen etablierte Methoden zur Strukturierung zum Einsatz. Zunächst werden die Beziehungen zwischen den Systembestandteilen in einer Design Structure Matrix strukturiert [Ste07, S. 109ff.] (vgl. Kap. 3.3.1, [EWS+94]). Weiter Eigenschaften der Systembestandteile, wie Produktleistung, Qualität oder Recyclingfähigkeit, fließen über die Module Indication Matrix in die Produktstrukturierung ein [Ste07, S. 111ff.] (vgl. [Eri98]). Den Besonderheiten selbstoptimierender mechatronischer Systeme trägt STEFFEN Rechnung, indem er die Design Structure Matrix zu einer Reconfiguration Structure Matrix erweitert und den Aspekt der Rekonfigurierbarkeit berücksichtigt [Ste07, S.

113ff.]. Als Resultat liegen ein erster Entwurf der Produktstruktur sowie eine Erzeugnisgliederung vor (siehe Bild 3-16). Die Erzeugnisgliederung ist entwicklungsorientiert strukturiert. Es werden eine funktionsorientierte sowie eine gestaltorientierte Struktur gebildet und gegenübergestellt.

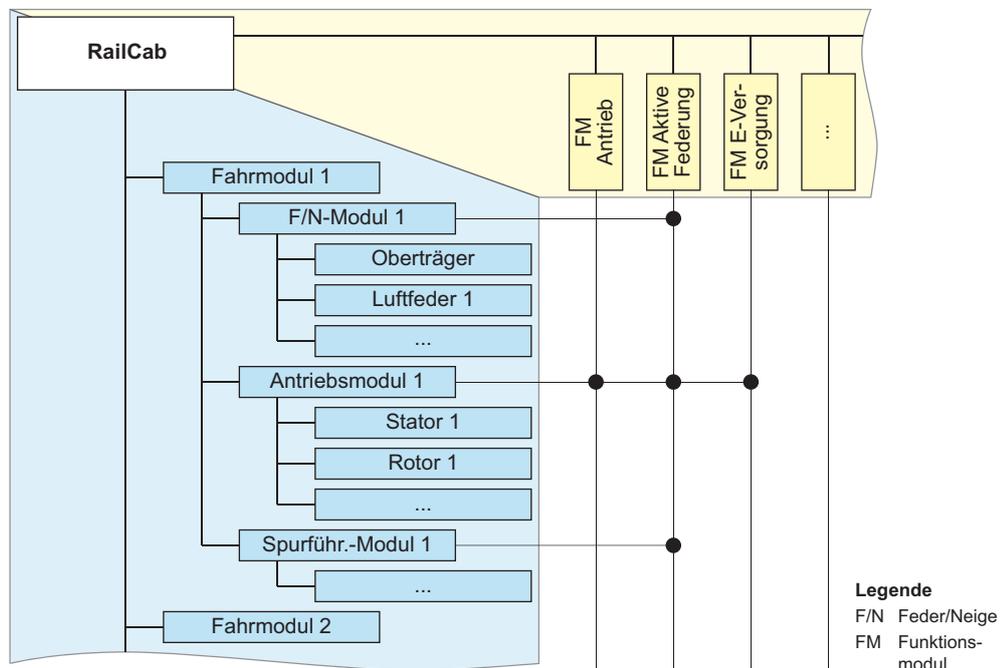


Bild 3-16: Ausschnitt einer Erzeugnisgliederung nach STEFFEN [Ste07, S. 146]

Bewertung der Produktstruktur: Abschließend wird die Konzeption der Produktstruktur unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten bewertet. Hierdurch soll die Anforderungserfüllung und der Einhaltung aller Rahmenbedingungen sichergestellt werden [Ste07, S. 91].

Bewertung: Das von STEFFEN entwickelte Verfahren ermöglicht die Strukturierung mechatronischer Systeme in der frühen Entwicklungsphase. Es nutzt die in der Prinziplosung (vgl. Kap. 2.6.1) enthaltenen Informationen und ist in das Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung integriert (vgl. Kap. 2.6.2). Als Resultat liegt eine Erzeugnisgliederung vor, die jedoch entwicklungsorientiert gebildet wird. Aspekte der Fertigung und Montage werden explizit ausgeklammert [Ste07, S. 92].

3.3.3 Produktstrukturierung nach DAHL

Den Kern des Konstruktionssystems zur montagegerechten Produktgestaltung nach DAHL bildet ein Verfahren zu montageorientierten Produktstrukturierung. Ausgehend von der Funktionsstruktur des zu entwickelnden Produkts werden den Teilfunktionen Strukturelemente (Bauteile) zugewiesen, welche die Funktionen realisieren. Zwischen den Strukturelementen bestehen montagerelevante Beziehungen, die ebenfalls in der Struktur abgebildet werden. Auf Basis dieser funktionalen Gliederung der Systembe-

standteile erfolgt die Überführung in die montagegerechte Produktstruktur im Rahmen von drei Aufgabenkomplexen [Dah90, S. 57ff.], die in Bild 3-17 dargestellt sind.

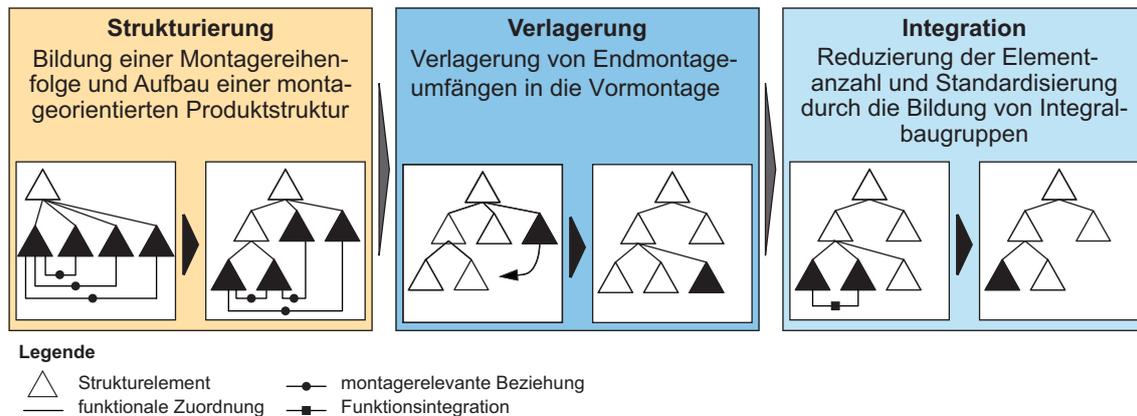


Bild 3-17: Aufgabenkomplexe der Produktstrukturierung nach DAHL [Dah90, S. 60]

Strukturierung: Die Grundlage bilden die montagerelevanten Beziehungen zwischen den Strukturelementen. In einem Top-Down-Vorgehen wird über die Ebenen der funktionsorientierten Struktur die Anzahl dieser Beziehungen für die Strukturelemente der jeweiligen Ebene bestimmt. Das Strukturelement mit der höchsten Beziehungsanzahl stellt das Basiselement der Montage dar. Es wird mit dem Strukturelement mit der zweithöchsten Beziehung zu einem Montagepaar zusammengefasst. Entsprechend der Bewertungsanzahl folgen die anderen Strukturelemente. Die Reihenfolge ist hierbei z. T. nicht eindeutig, da mehrere Strukturelemente die gleiche Beziehungsanzahl aufweisen können. In diesem Fall wird das Vorgehen iterativ wiederholt. Auch haben die Entwickler und Montageplaner die Möglichkeit, die Struktur manuell zu modifizieren. Als Ergebnis liegt eine erste montageorientierte Produktstruktur vor [Dah90, S. 61ff.].

Verlagerung: Das Ziel dieses Schrittes sind Vormontagegruppen zur Reduzierung der Umfänge in der Endmontage. Hierfür werden Strukturelemente identifiziert, deren Beziehungen die Teilmenge eines anderen Strukturelements abbilden oder sogar komplett deckungsgleich sind. Für diese Strukturelemente wird die Möglichkeit einer Verlagerung in eine niedrigere Hierarchieebenen geprüft [Dah90, S. 67f.].

Integration: Abschließend wird versucht, die Anzahl der zu montierenden Bauteile zu reduzieren. Auf Basis des Erfahrungswissens des Produktentwicklers wird die Möglichkeit der Funktionsintegration von Bauteilen überprüft. Hierdurch entstehen Integralbauteile die mehrere Funktionen erfüllen [Dah90, S. 70].

Bewertung: Das Verfahren ermöglicht die einfache Strukturierung des Produkts und ist bereits in der Konzipierung anwendbar. Den Ausgangspunkt bilden die funktionale Struktur des Systems sowie die baulichen Zusammenhänge zwischen den Systembestandteilen. Diese Informationen können aus den Partialmodellen der Prinziplösung entnommen werden. Defizite zeigt das Verfahren bei der Strukturierung mechatronischer Systeme, da bspw. elektrische und informationstechnische Beziehungen nicht

berücksichtigt werden. Weiterhin wird der Lösungsraum durch die Verwendung der Funktionshierarchie als Strukturierungsbasis stark eingeschränkt. Die funktionale Struktur bleibt weitestgehend erhalten und fließt somit in die montageorientierte Struktur ein.

3.3.4 Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS)

Der von GÖPFERT entwickelte Ansatz zielt auf die Modularisierung technischer Systeme in Verbindung mit der Entwicklungsorganisation. Ziel des Ansatzes sind funktional und physisch unabhängige Module. Hierbei besteht der Anspruch, dass die Module von verschiedenen Organisationseinheiten möglichst eigenständig und voneinander getrennt entwickelt werden. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Schritte (Bild 3-18).

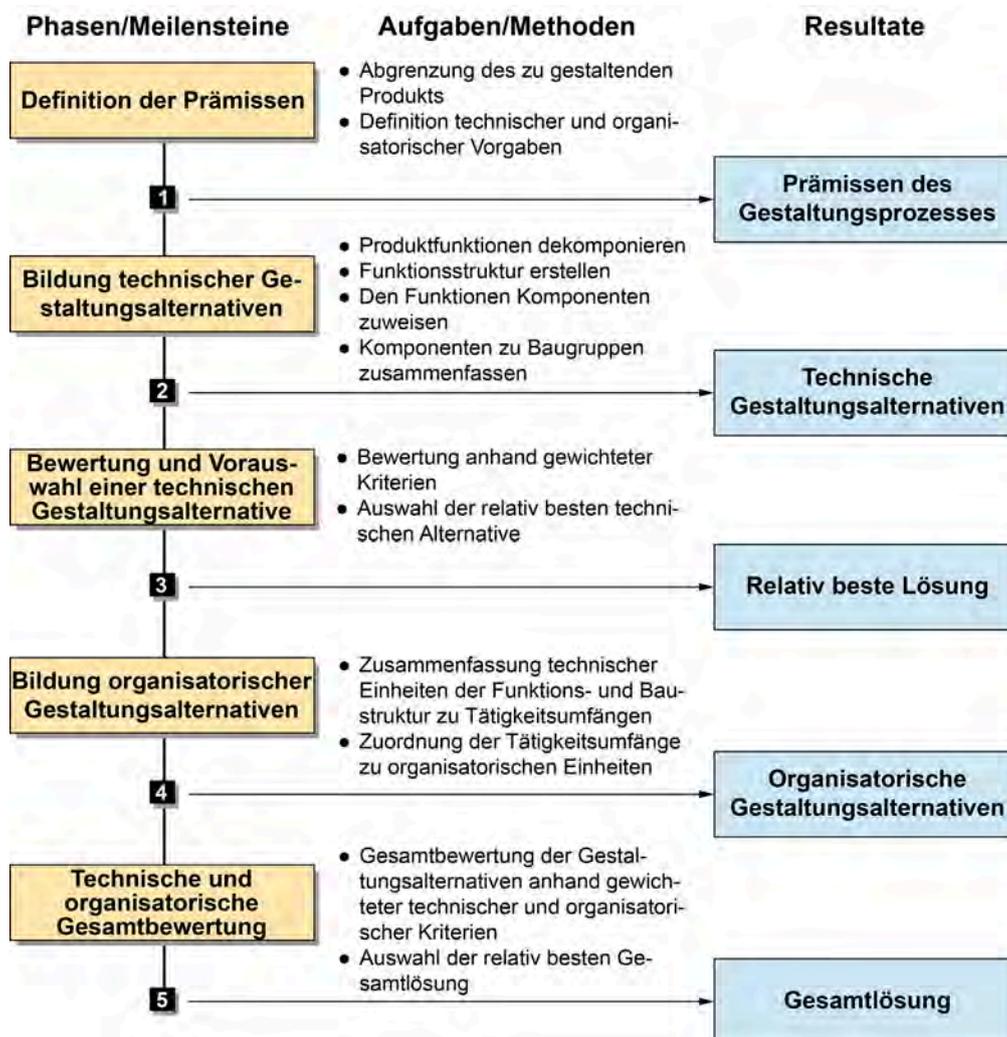


Bild 3-18: Vorgehen zur technischen und organisatorischen Gestaltung nach [Göp98, S. 233]

Definition der Prämissen: Das Ziel der Phase sind die Prämissen des Gestaltungsprozesses. Hierzu wird die Aufgabenstellung analysiert und es werden die technischen und

organisatorischen Rahmenbedingungen festgelegt. Die Phase wird durch einen Fragenkatalog unterstützt [Göp98, S. 228f.].

Bildung technischer Gestaltungsalternativen: Zunächst wird die Funktionsstruktur aufgebaut. Die Funktionen des zu entwickelnden Produkts werden in Teilfunktionen untergliedert. Komponenten zur Erfüllung der Teilfunktionen werden identifiziert und den Teilfunktionen zugewiesen. Anschließend werden die Komponenten schrittweise zu Baugruppen zusammengefasst. Es entsteht die Baustruktur (Bild 3-19). Im Konzipierungsprozess ergeben sich alternative Funktions- und Baustrukturen. Sie werden zu Gestaltungsalternativen kombiniert [Göp98, S. 229f.].

Bewertung und Vorauswahl einer technischen Gestaltungsalternative: Auf Grundlage einer Nutzwertanalyse erfolgt die Bewertung der vorliegenden Gestaltungsalternativen. Hierbei sind nur technische Kriterien zu berücksichtigen (z. B. Plattformkonzept, Recyclingfähigkeit). Die am besten geeigneten Gestaltungsalternativen werden ausgewählt [Göp98, S. 230f.].

Bildung organisatorischer Gestaltungsalternativen: In dieser Phase erfolgt die Strukturierung unter organisatorischen Gesichtspunkten. Funktionen, Komponenten und Baugruppen werden zu Tätigkeitsumfängen zusammengefasst. Diese werden organisatorischen Einheiten zugeordnet [Göp98, S. 231f.] (Bild 3-19).

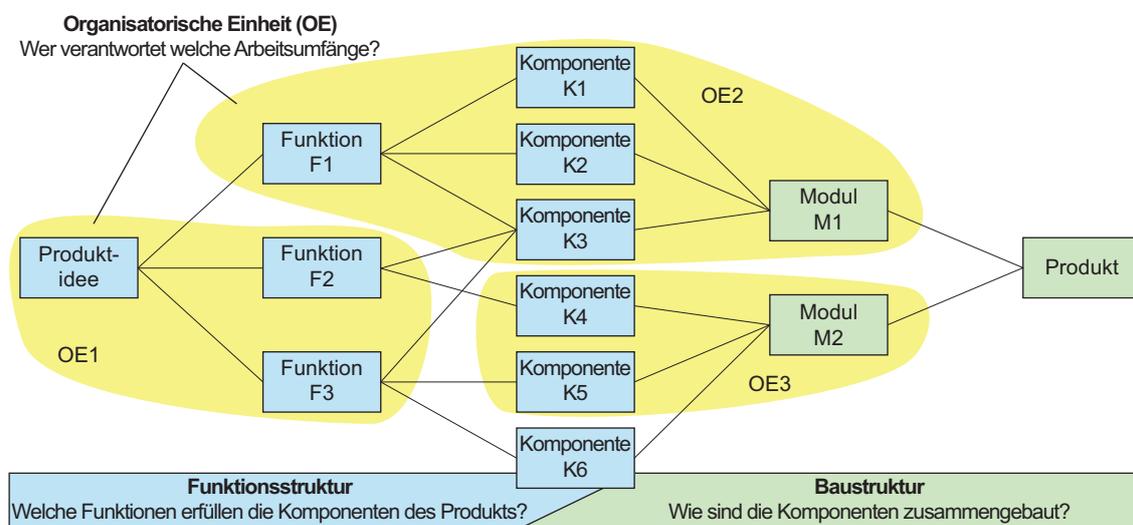


Bild 3-19: Darstellungsform von METUS nach [Göp98, S. 251], [Kip12, S. 31]

Gesamtbewertung und Auswahl einer technischen und organisatorischen Gesamtlösung: Das Vorgehen schließt mit einer Bewertung der erarbeiteten Gestaltungsalternativen unter technischen und organisatorischen Aspekten mittels Nutzwertanalyse. Das im dritten Schritt eingesetzte Bewertungsverfahren wird hierfür um organisatorische Kriterien erweitert (z. B. Berücksichtigung eigener Kernkompetenzen, Globalisierungsstrategien) [Göp98, S. 232].

Iterationen: Auch wenn das Vorgehen in Bild 3-18 als stringenter Ablauf dargestellt ist, ist es von Iterationsschleifen geprägt. Liefert die technische Bewertung keine befriedigende Lösung wird der vorangegangene Schritt wiederholt. Gleiches gilt für die abschließende Bewertung. Der Gesamtzyklus wird solange durchlaufen, bis eine zufriedenstellende Gesamtlösung gefunden ist [Göp98, S. 232].

Bewertung: Das Vorgehen zur modularen Produktentwicklung nach GÖPFERT ermöglicht die Synchronisation der Strukturen des Produkts und der Entwicklungsorganisation. Die Darstellungsform zur Abbildung der Funktions- und Baustruktur sowie der Organisationseinheiten ist leicht verständlich und visualisiert sehr gut den Zusammenhang der beiden Produktstrukturen. Allerdings umfasst der Ansatz keine konkreten Methoden zur Bildung sinnvoller Module und die Frage, welche modulare Produktstruktur sinnvoll ist, wird nicht beantwortet.

3.3.5 Modularisierung nach KOEPPEN

Die von KOEPPEN entwickelte Methodik ermöglicht die Modularisierung komplexer Produkte auf Grundlage der Kopplungen zwischen den Produktbestandteilen (Komponenten). Hierbei werden neben den technischen Aspekten auch betriebswirtschaftliche Faktoren berücksichtigt. Die Modularisierung wird durch die Festlegung und Gewichtung von Modularisierungszielen, sog. Modultreibern, auf den konkreten Anwendungsfall und die unternehmensspezifische Situation angepasst. Das Vorgehen unterteilt sich in fünf Schritte und fügt sich in das Vorgehen zur Modularisierung nach PIMMLER und EPPINGER ein [PE94, S. 345] (Bild 3-20).

Zerlegung des Produkts in Komponenten: Den Ausgangspunkt der Modularisierung bilden die Komponenten des Produkts. Im Fall einer Neuentwicklung wird auf die Funktionen und Komponenten der prinzipiellen Lösung nach PAHL/BEITZ zurückgegriffen [PBF+07, S. 231ff.], [Koe08, S. 28f.].

Identifikation der wesentlichen Modultreiber: Die Modultreiber beschreiben die Ziele der Modularisierung. Sie sind entsprechend der Phasen des Produktlebenszyklus in sieben Hauptkategorien eingeteilt. Beispiele für Modultreiber der Konzeptentwicklung sind geometrische Abhängigkeiten wie Größe, Form und Art der Kopplung oder die Übertragung von Energie. Die Modultreiber werden unternehmens- und produktspezifisch durch die Produktverantwortlichen festgelegt und entsprechend ihrer Relevanz gewichtet [Koe08, S. 60].

Abbildung der Kopplungen für jeden Modultreiber: In diesem Schritt werden die Kopplungen zwischen den Komponenten beschrieben. Je Modultreiber wird für jedes Komponentenpaar ein Kopplungswert festgelegt, welcher die Stärke der jeweiligen Kopplung beschreibt. Die Bestimmung der Kopplungswerte geschieht über modultreiberspezifische Abbildungsfunktionen. Die Abbildung erfolgt in Design Structure Matrizen, wobei für jeden Modultreiber eine DSM erstellt wird [Koe08, S. 62f.].

Zusammenfassung der Kopplungswerte zu einem Gesamtwert: In diesem Schritt werden die Einzelmatrixen zu einer Gesamtkopplungsmatrix zusammengeführt. Die Kopplungswerte je Modultreiber werden auf den Wertebereich 0-1 normiert. Anschließend werden die Werte der Komponentenpaare über alle Modultreiber gewichtet aufsummiert. Die Grundlage bilden die zuvor aufgestellten Gewichtung der einzelnen Modultreiber [Koe08, S. 65f.].

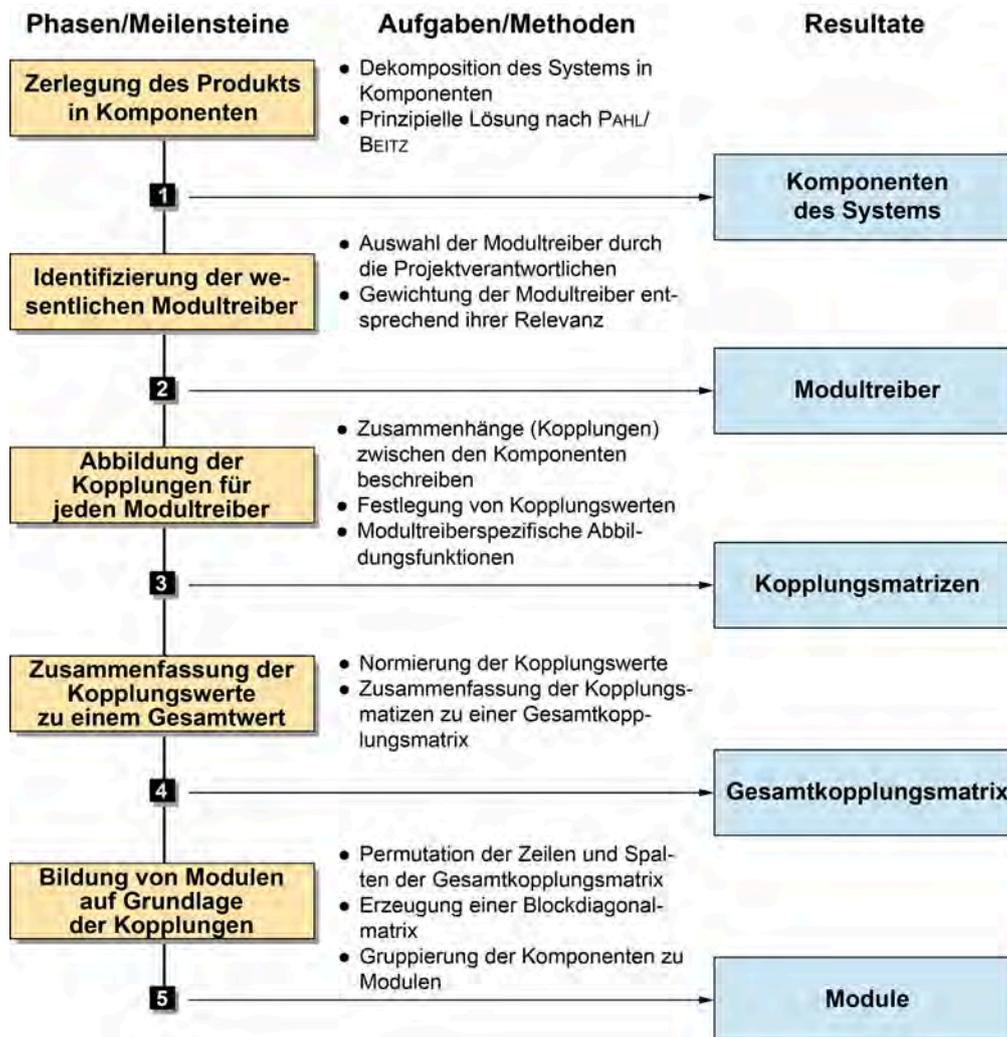


Bild 3-20: Vorgehen zur Modularisierung nach [Koe08, S. 60]

Bildung von Modulen auf Grundlage der Kopplungen: Abschließend erfolgt die Gruppierung der Komponenten. Hierfür werden die Zeilen und Spalten der Gesamtkopplungsmatrix permutiert. Das Ziel ist eine Blockdiagonalmatrix mit hohen Kopplungswerten innerhalb der Diagonallöcke (vgl. [PE94, S. 347]). Die Blöcke werden als Module definiert [Koe08, S. 30f.].

Bewertung: Die Methode nach KOEPPEN ermöglicht die Modularisierung komplexer Produkte unter technisch-funktionalen und produktstrategischen Gesichtspunkten. Durch die Gewichtung der Modultreiber kann gezielt Einfluss auf die Art der Modularisierung und damit auf die Produktstruktur genommen werden (z. B. eine montageorien-

tierte Produktstruktur). Eine Anwendung der Methode ist bereits in der Konzipierung möglich, allerdings erfordert die Bestimmung der Kopplungswerte zwischen den Komponenten eine umfassende Kenntnis der Produkteigenschaften, der Modultreiber und der Abbildungsfunktionen. Weiterhin wird die Gewichtung der Modultreiber durch eine Bewertung von Fachleuten ermittelt. Sie unterliegt somit einer starken Subjektivität. Zudem muss je Komponentenpaar der Kopplungswert für jeden Modultreiber manuell bestimmt werden. Das Verfahren ist daher sehr aufwändig in der Anwendung.

3.3.6 Modularisierung nach VDI-Richtlinie 2223

Die VDI-Richtlinie 2221 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* beschreibt die Modularisierung als Teil des generellen Vorgehens beim Entwickeln und Konstruieren [VDI2221, S. 10] (vgl. Kap. 2.4.2). Der Arbeitsschritt wird in der VDI-Richtlinie 2223 *Methodisches Entwerfen technischer Produkte* detailliert [VDI2223, S. 18]. Das Ziel ist eine modulare Struktur des Produkts, um eine effiziente Arbeitsaufteilung vor der Konkretisierung zu ermöglichen. Den Ausgangspunkt bildet die prinzipielle Lösung (Bild 3-21).

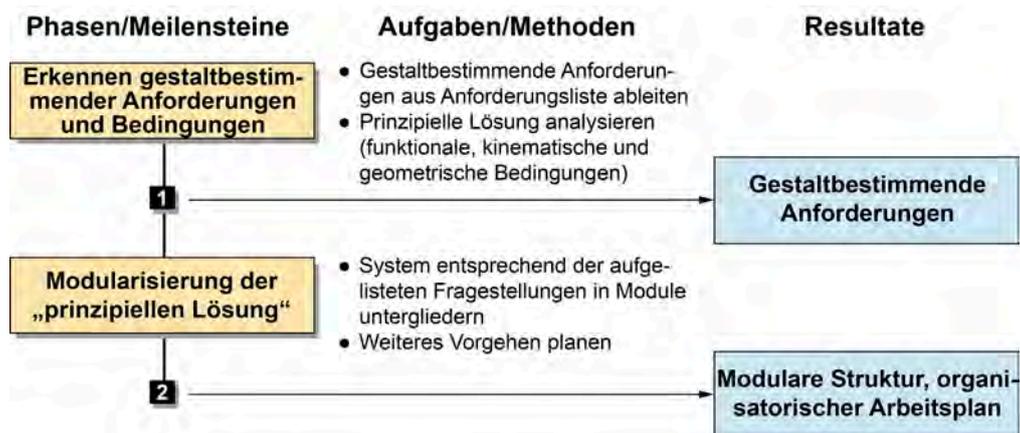


Bild 3-21: Gliedern in realisierbare Module [VDI2223, S. 18]

Erkennen gestaltbeeinflussender Anforderungen und Bedingungen: Das Ziel dieser Phase sind gestaltbestimmende Anforderungen, die bisher noch nicht explizit formuliert sind. Diese werden aus den beschriebenen Anforderungen abgeleitet oder ergeben sich in Folge eine Analyse der prinzipiellen Lösung. Die prinzipielle Lösung enthält funktionale (z. B. bedingt durch Wirkprinzipien), kinematische (z. B. aus Getriebeschemata) oder geometrische Bedingungen (z. B. Anschlussgeometrien und Hauptabmessungen), welche die Gestaltung beeinflussen [VDI2223, S. 17ff.].

Modularisierung der „prinzipiellen Lösung“: In diesem Schritt wird das System in Module untergliedert. Hierbei gibt die Richtlinie Hinweise in Form von Fragestellungen, die bei der Modularisierung beachtet werden müssen. Beispiele sind *Wie kann man das Produkt derart in Module gliedern, dass diese beim Entwerfen möglichst unabhängig voneinander bearbeitet werden können?* oder *Welche Module sind neu zu entwer-*

fen? Als Resultat liegt die Produktstruktur vor. Anschließend wird das weitere Vorgehen im Gestaltungsprozess festgelegt und es werden Zeiten und Kapazitäten geplant. Das Ergebnis wird in Form eines organisatorischen Arbeitsplans dokumentiert [VDI2223, S. 19ff.].

Bewertung: Die VDI-Richtlinie 2223 liefert einen sehr generalisierten Ansatz zur Produktstrukturierung auf Basis der fertigen prinzipiellen Lösung. Beschrieben wird das Vorgehen in nur zwei Schritten auf einer sehr abstrakten Ebene. Eine konkrete Methode bzw. ein detailliertes Vorgehen zur Strukturierung fehlen. Die eigentliche Gliederung des Produkts erfolgt manuell auf Basis zuvor identifizierte Anforderungen und Fragestellungen. Hierdurch ist das Verfahren sehr subjektiv und die Ergebnisse hängen stark von dem Erfahrungswissen und den Kompetenzen des Anwenders ab.

3.3.7 Festlegung der Produktarchitektur nach SEDCHAICHARN

Das Ziel der von SEDCHAICHARN entwickelten Methode ist eine Produktarchitektur unter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Diese soll bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung festgelegt werden. Der verfolgte Ansatz ist die Verknüpfung von Funktions- und Gestaltinformationen über das Contact and Channel Model (C&CM) (vgl. Kap. 3.2.3). Den Ausgangspunkt bildet die Produktidee und eine erste Prinzipskizze [Sed10, S. 65]. Das Vorgehen gliedert sich in drei Phasen, die in Bild 3-22 dargestellt sind.

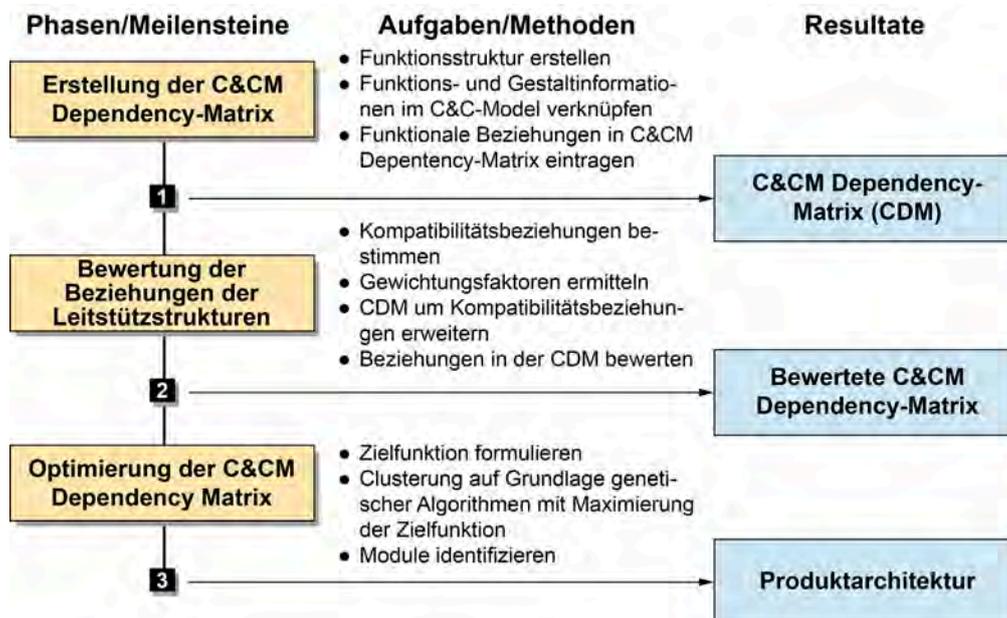


Bild 3-22: Vorgehen bei der Festlegung der Produktarchitektur nach [Sed10, S. 68]

Erstellung der C&CM Dependency-Matrix (CDM): Das Ziel dieser Phase sind die Funktions- und Gestaltinformationen in Form einer Matrix. Zunächst sind auf Grundlage der Prinzipskizze die Funktionen des Produkts zu identifizieren. Diese werden in

eine Funktionsstruktur überführt und mittels Energie-, Stoff- und Informationsflüsse verbunden. Anschließend wird aus der Prinzipskizze ein C&CM erstellt und die Modellelemente (Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen) werden den Funktionen zugeordnet. Es ist möglich, dass Leitstützstrukturen bereits in dieser Phase manuelle zu Bauteilen zusammengefasst werden. Abschließend erfolgt die Überführung in eine C&CM Dependency Matrix. In den Zeilen und Spalten sind jeweils die Leitstützstrukturen gegeneinander aufgetragen. Die Wirkflächenpaare kennzeichnen funktionale Verbindungen zwischen Leitstützstrukturen, die einen Energie-, Stoff- oder Informationsfluss ermöglichen. Sie sind in den Matrixfeldern als „X“ markiert und stellen funktionale Beziehungen dar [Sed10, S. 71ff.].

Bewertung der Beziehungen der Leitstützstrukturen: In dieser Phase finden nicht-funktionale Beziehungen zwischen Leitstützstrukturen Berücksichtigung, sog. Kompatibilitätsbeziehungen. Zunächst werden die Kompatibilitätsbeziehungen bestimmt und in das C&CM eingetragen. Sie leiten sich aus Anforderungen an das System ab. Beispiel sind eine einfache Demontage oder möglichst wenig Einzelteile. Die funktionalen Beziehungen und die Kompatibilitätsbeziehungen werden anschließend gewichtet. Dies erfolgt über eine Bewertung der Wichtigkeit der Beziehungen durch den Entwickler. Abschließend wird die CDM aktualisiert. Für jede Kombination zweier Leitstützstrukturen wird eine Beziehungszahl ermittelt. Diese ergibt sich aus der gewichteten Summe der funktionalen Beziehungen und der Kompatibilitätsbeziehungen zwischen den beiden Leitstützstrukturen und hat einen Wert zwischen 0 und 1 [Sed10, S. 80ff.].

Optimierung der C&CM Dependency Matrix: Die Aufgabe dieser Phase ist die Bildung von Modulen mit möglichst vielen internen Beziehungen und wenig Schnittstellen. Zunächst wird hierfür eine Zielfunktion formuliert. Diese beschreibt den Zusammenhang der Modulanzahl, der Anzahl von Beziehungen innerhalb der Module und der Gewichtung der Beziehungen. Auf Grundlage genetischer Algorithmen erfolgt die Clustering in der CDM. Die Zeilen und Spalten der Matrix werden schrittweise gleichgerichtet verschoben (vgl. Kap. 3.3.1). Hierbei wird versucht, die Zielfunktion zu maximieren, was möglichst vielen modulinternen Beziehungen entspricht. Als Resultat liegt ein Vorschlag für eine Produktarchitektur vor. Diese ordnet die Leitstützstrukturen einzelnen Modulen zu und kennzeichnet die Schnittstellen zwischen diesen [Sed10, S. 88].

Bewertung: SEDCHAICHARN präsentiert ein umfangreiches Verfahren zur Festlegung der Produktarchitektur in der frühen Phase der Produktentwicklung. Auf Grundlage des C&CM werden Funktions- und Gestaltinformationen des Produkts zusammengeführt. Die Beziehungen werden in einer Matrix zusammengeführt, bewertet und einer Clustering unterzogen. Die Beziehungen zwischen den Komponentenpaaren müssen manuell bewertet werden, wodurch der Aufwand steigt und das Ergebnis einer Subjektivität unterliegt. Das Verfahren ist grundsätzlich für die montageorientierte Strukturierung geeignet, der Fokus liegt jedoch auf der frühzeitigen Festlegung der Produktarchitektur aus Sicht der Produktentwicklung.

3.4 Technologieauswahl

Die Erstellung eines ersten Montagekonzepts erfordert die Auswahl geeigneter Montageverfahren, insb. von Fügeverfahren. Die Auswahlkriterien ergeben sich in der Regel aus der Produktgestalt, dem Werkstoff und produktionstechnischen- sowie wirtschaftlichen Anforderungen (z. B. Stückzahl, Kosten, Mitarbeiterqualifikation). Durch die starken Wechselwirkungen zwischen Produktgestalt, Werkstoff und Montageverfahren ist die Auswahl i. d. R. von Iterationen geprägt und stark von dem montagetechnischen Wissen und den Erfahrungen des Konstrukteurs abhängig [Fal00, S. 8], [SB03, S. 1].

Heute existieren Software-Werkzeuge für die Technologieauswahl (z. B. [Fen05], [SWS03], [Zha05]). Auf Grundlage von Datenbanken, in denen Technologie- und Werkstoffinformationen gespeichert sind, wird der Konstrukteur durch Suchalgorithmen bei der Technologieauswahl unterstützt. Die erforderlichen Eingangsinformationen für die Suche sind allerdings sehr detailliert und die Verfahren für die frühzeitige Auswahl auf Basis unscharfer Informationen somit ungeeignet [Nor12, S. 69]. Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, die eine frühzeitige Auswahl von Montagetechnologien ermöglichen.

3.4.1 Verbindungsauswahl nach VDI-Richtlinie 2232

In der VDI-Richtlinie 2232 *Methodische Auswahl fester Verbindungen – Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen* ist eine Vorgehensweise für die Auswahl von Bauteilverbindungen beschrieben. Den Ausgangspunkt bildet die Konstruktion des technischen Systems. Weiterhin stellt die Richtlinie Arbeitshilfen zur Verfügung, die das Vorgehen unterstützen. Dies sind Begriffsdefinitionen und Checklisten sowie Übersichtstabellen von verfügbaren Konstruktionskatalogen und Datenbanken [VDI2232, S. 2]. Das Vorgehen für die Auswahl fester Verbindungen gliedert sich gemäß Bild 3-23 in fünf Phasen.

Hauptaufgabensatz formulieren: Die Aufgabe der Verbindung wird beschrieben. In Analogie zur Beschreibung von Funktionen kann dies lösungsneutral erfolgen. Das ist nicht erforderlich, wenn bereits Einschränkungen vorliegen. [VDI2232, S. 11ff.] Ein Beispiel für eine Aufgabenbeschreibung ist: *Rahmen und Sattel fest und lösbar miteinander verbinden und im Betriebszustand verbunden halten.*

Anforderungen identifizieren: In dieser Phase werden Anforderungen an die zu erzeugende Verbindung festgelegt. Hierfür stehen Hilfsmittel zu Verfügung, wie bspw. Checklisten² oder Leitlinien mit Hauptmerkmalen für Anforderungen [PBF+07, S. 514]. Die Anforderungen werden identifiziert und beschrieben. Die Dokumentation erfolgt in Form einer Anforderungsliste [VDI2232, S. 11ff.].

² Es wird zwischen allgemeinen, unternehmensspezifischen und produktbezogenen Checklisten unterschieden. Eine Übersicht verfügbarer Checklisten findet sich im Anhang (siehe Anhang Tabelle A-1).

Konstruktionskataloge auswählen: Das Ziel dieses Schrittes sind Konstruktionskataloge für die Suche nach geeigneten Verbindungen. Die Richtlinie liefert hierfür eine Übersicht verfügbarer Konstruktionskataloge für feste Verbindungen. Je Konstruktionskatalog sind Inhalt, Zweck, Einsatz, Anwendung und Gliederung in Form eines Prinzipialblattes beschrieben [VDI2232, S. 22ff.]. Eine Übersicht der Konstruktionskataloge findet sich im Anhang (siehe Anhang Tabelle A-2).

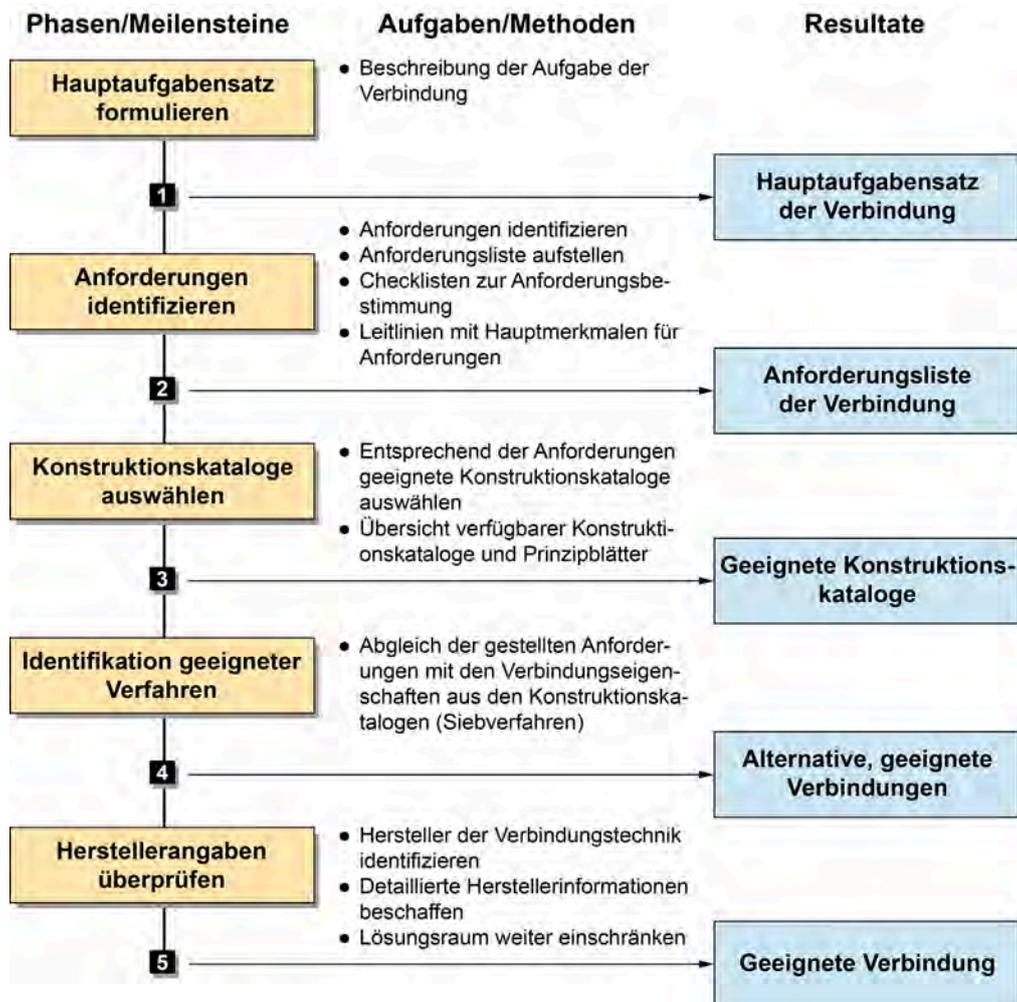


Bild 3-23: Vorgehen zur Auswahl von Verbindungen nach [VDI2232, S. 11]

Identifikation geeigneter Verbindungen: In dieser Phase werden mit dem sog. Siebverfahren geeignete Verbindungen identifiziert. Die aufgestellten Anforderungen werden den Verbindungseigenschaften aus den Konstruktionskatalogen (Zugriffsmerkmale) gegenübergestellt und verglichen. Als Resultat liegen alternative Verbindungen vor [VDI2232, S. 11ff.].

Herstellerangaben überprüfen: Für die geeigneten Verbindungen werden Hersteller der entsprechenden Verbindungstechnik gesucht. Auf Grundlage der detaillierten Herstellerinformationen kann der Lösungsraum evtl. weiter eingeschränkt werden. Weiter-

hin sind eine Festigkeitsberechnung und eine Nutzwertanalyse bzw. eine technisch-wirtschaftliche Bewertung erforderlich [VDI2232, S. 11f.].

Bewertung: Die VDI-Richtlinie 2232 beschreibt einen Leitfaden für die Auswahl fester Bauteilverbindungen und der zugehörigen Fügeverfahren. Das Vorgehen wird durch Hilfsmittel unterstützt, wie bspw. Tabellen und Checklisten. Durch die manuelle Durchführung ist das Vorgehen allerdings sehr zeit und arbeitsaufwändig. Ein Beispiel ist die Suche nach geeigneten Bauteilverbindungen mit Hilfe von Konstruktionskatalogen. Den Fokus des Verfahrens bildet die gestaltende Phase, nach Abschluss der prinzipiellen Phase [VDI2232, S. 7]. Das Vorgehen ist grundsätzlich auf die frühe Phase übertragbar und liefert einen geeigneten Ablauf für die Verfahrensauswahl.

3.4.2 Technologieauswahl nach ASHBY

ASHBY beschreibt ein Verfahren zur Technologieauswahl auf Grundlage einer Taxonomie und einer einheitlichen Beschreibung der Technologien. Das Verfahren ist zusammen mit einem Verfahren zur Materialauswahl in dem kommerziellen Softwaretool CES Selector [GDL13-ol] implementiert.

Die **Taxonomie** strukturiert die Technologien. Auf oberster Ebene werden sie in drei Familien eingeteilt: *Formgebende Technologien*, *Fügetechnologien* und *Technologien zur Feinbearbeitung*. Diese werden weiter in Technologieklassen untergliedert, welche die konkreten Technologien enthalten [Ash07, S. 177ff.]. Bild 3-24 zeigt einen Auszug der Taxonomie.

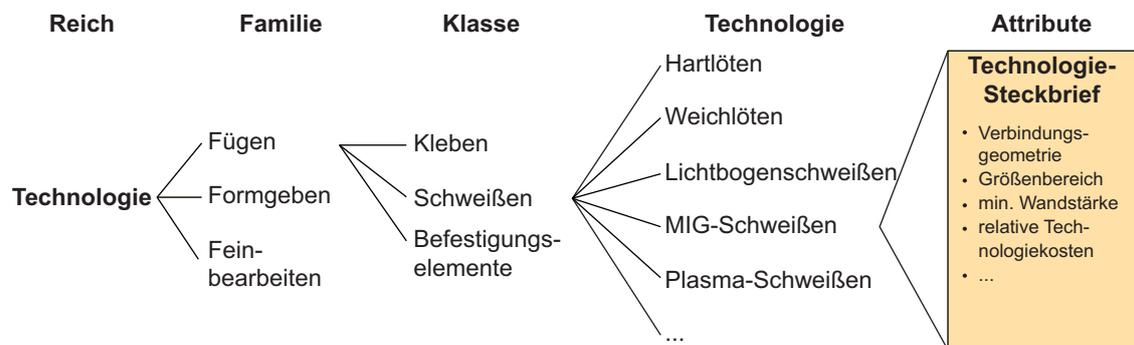


Bild 3-24: Ausschnitt der Taxonomie für Technologien nach ASHBY [Ash07, S. 179]

Die **Beschreibung** der Technologien erfolgt über vordefinierte Attribute in Form von Technologiesteckbriefen (siehe Anhang Bild A-4). Beispiele sind die Verbindungsgeometrie, Größenbereiche, Wandstärken oder die relativen Technologiekosten [Ash07, S. 210]. Auf Grundlage der Steckbriefe erfolgt ein Abgleich der geforderten Eigenschaften des Produkts mit den realisierbaren Fähigkeiten der Technologien. Das Vorgehen gliedert sich in vier Phasen, die in Bild 3-25 dargestellt sind.

Übersetzung der Bauteilanforderungen: In dem ersten Schritt werden die zu fertigenden und zu fügenden Bauteile bzgl. Material und Form klassifiziert. Beispiele für

Materialklassen sind Stähle, Nichteisenmetalle, Elastomere etc. Die Gestalt untergliedert sich bspw. in prismatisch, blechförmig und dreidimensional³. Weiterhin werden Anforderungen an die Technologie beschrieben (z. B. Toleranzklassen oder Bauteilgewicht) und Zielgrößen festgelegt (z. B. Kosten, Zeit oder Qualität) [Ash07, S. 196ff.].

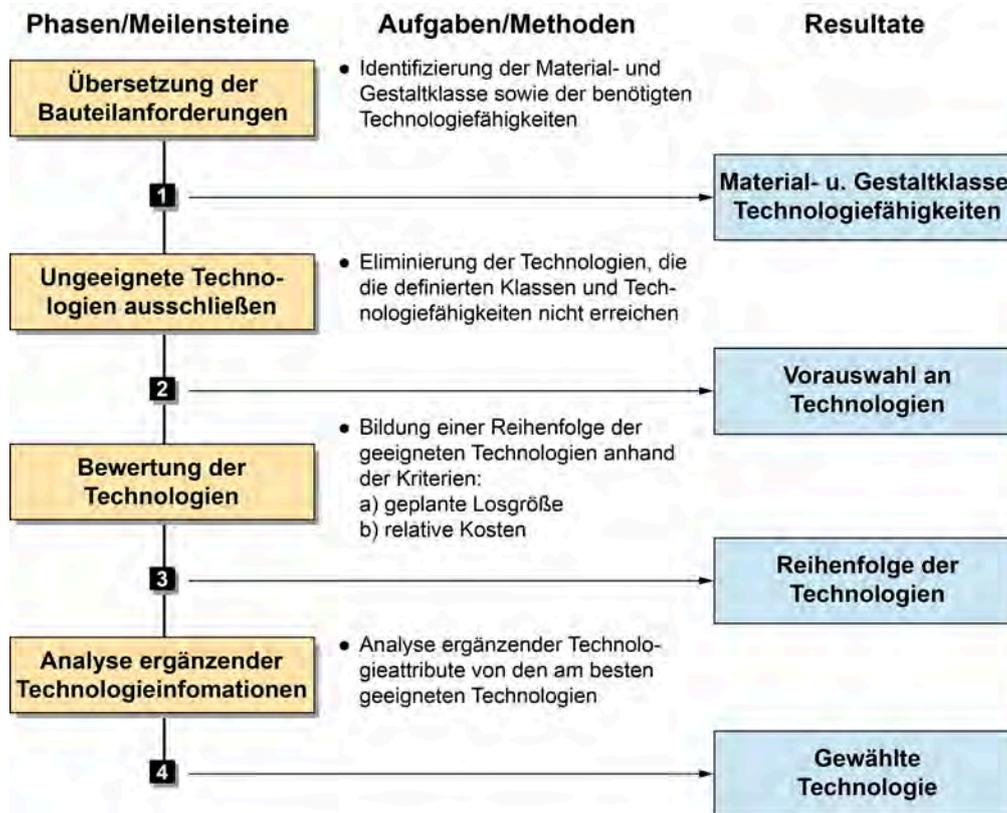


Bild 3-25: Vorgehen zur Technologieauswahl nach ASHBY [Ash07, S. 195]

Ungeeignete Technologien ausschließen: Auf Grundlage der zuvor festgelegten Bauteilanforderungen erfolgt eine Analyse der verfügbaren Technologien. Hierbei werden die Technologien ausgeschlossen, welche die Anforderungen nicht erfüllen. Als Arbeitshilfen stehen verschiedene Matrizen und Tabellen zur Verfügung, die sog. Ashby-Diagramme. Diese stellen die Technologien bspw. den Materialien (process-material matrix) (siehe Anhang Bild A-6) oder der Bauteilmasse (process-mass-range chart) (siehe Anhang Bild A-7) gegenüber. Als Resultat liegen die geeigneten Technologien vor [Ash07, S. 196ff.].

Bewertung der Technologien (Screening): Das Ziel dieser Phase ist eine Reihenfolge der geeigneten Technologien. Die Grundlage bildet eine wirtschaftliche Bewertung durch den Entwickler. Hierbei werden die folgenden vier Kriterien verwendet: *Standards verwenden, einfache Lösungen bevorzugen, einfach Montierbarkeit* und *keine*

³ Eine Übersicht der Gestaltklassen findet sich im Anhang (siehe Bild A-5)

unnötige Überdimensionierung. Weiterhin wird die Bewertung durch Diagramme unterstützt, die Technologien in Relation zur Losgröße setzen [Ash07, S. 202ff.].

Analyse ergänzender Technologieinformationen (Ranking): Abschließend werden weitere Informationen in die Bewertung einbezogen, z. B. Investitionskosten oder der Energieverbrauch von Technologien. Auf Grundlage einer detaillierten wirtschaftlichen Bewertung wird so die am besten geeignete Technologie ausgewählt [Ash07, S. 205f.].

Bewertung: Der Ansatz zur Technologieauswahl nach ASHBY basiert auf dem Vergleich der Anforderungen des Bauteils bzw. der Verbindungsstelle mit den realisierbaren Technologiefähigkeiten. Hierfür werden eine Taxonomie, Technologiesteckbriefe, Auswahlmatrizen und -diagramme sowie ein Vorgehen zur Verfügung gestellt. Das Verfahren zeichnet sich durch seine Anwendbarkeit in der frühen Phase aus. Technologien können bereits auf Grundlage sehr weniger Informationen ausgewählt werden. Um dies zu ermöglichen sind die Hilfsmittel allerdings auf einer sehr abstrakten Ebene beschrieben.

3.4.3 Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER

Die von SWIFT und BOOKER entwickelte Methode unterstützt den Entwickler bei der Auswahl von Fertigungs- und Montagetechnologien sowie der Bestimmung des Automatisierungsgrad des Montagesystems. Analog zu Technologiesteckbriefen werden in sog. Prozessinformationskarten⁴ die Fähigkeiten der Technologien in standardisierter Form beschrieben. Ein matrixbasierter Ansatz ermöglicht die Auswahl geeigneter Technologien für ein vorliegendes System [SB03, S. 19ff.]. Das Vorgehen gliedert sich in zwei Schritte (Bild 3-26).

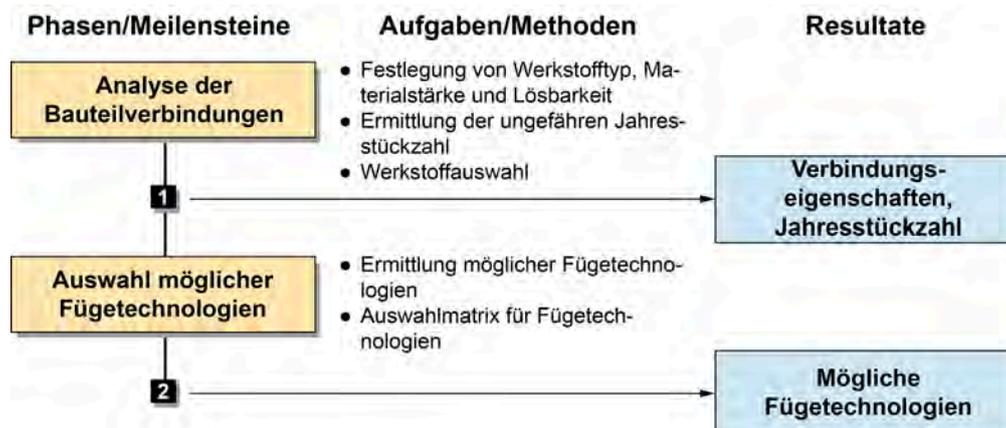


Bild 3-26: Vorgehen zur Technologieauswahl nach [SB03, S.27ff.]

Analyse der Bauteilverbindung: Auf Grundlage der Produktspezifikation werden für die Verbindung der Werkstofftyp, die Materialstärke, die Lösbarkeit der Verbindung

⁴ Process Information Map – PRIMA

sowie die geplante Jahresstückzahl festgelegt. Bei der Materialstärke wird zwischen *dünn* (<3 mm), *mittel* (3-19 mm) und *stark* (>19 mm) differenziert. Die Lösbarkeit wird in *lösbar*, *bedingt lösbar* und *nicht lösbar* unterteilt [SB03, S. 30f.].

Auswahl möglicher Fügetechnologien: Das Ziel dieser Phase sind geeignete Fügetechnologien, die in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses auf Grundlage einiger weniger Einflussfaktoren ausgewählt werden. Die Auswahl erfolgt auf Basis der Auswahlmatrix für Fügetechnologien⁵. In der Matrix werden die vier Aspekte Werkstofftyp, Materialstärke, Lösbarkeit der Verbindung und geplante Jahresstückzahl gegenübergestellt. In den Feldern der Matrix sind die für die jeweilige Kombination der Aspekte geeignete Fügeverfahren aufgeführt [SB03, S. 32f.]. Ein Ausschnitt der Matrix ist im Anhang zu finden (siehe Anhang Tabelle A-3).

Bewertung: Der Ansatz nach SWIFT und BOOKER unterstützt die frühzeitige Auswahl von Montagetechnologien. Die Auswahl erfolgt über Technologieauswahlmatrizen, die Technologien sind mittels Prozessinformationskarten beschrieben. Aufgrund der Anwendung des Verfahrens in der frühen Phase werden nur sehr grob Technologieklassen ausgewählt und es existiert meist eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien zur Realisierung einer Bauteilverbindung. Die weitere Technologiebetrachtung und -auswahl erfordert tiefgehende Kenntnisse über die Bauteile und Montageprozesse.

3.4.4 Konstruktionskataloge

Konstruktionskataloge stellen manuell handhabbare Informationsspeicher dar und ermöglichen die Ausschöpfung häufig wenig bekannter Wissensquellen. Ihr Inhalt, der Aufbau und der Zugriff sind auf das methodische Konstruieren abgestimmt.

Abhängig vom **Inhalt** lassen sich Konstruktionskataloge in Objekt-, Operations-, Lösungs- und Beziehungskataloge einteilen [Rot01, S. 7f.]. Eine Übersicht verfügbarer Konstruktionskataloge im Kontext Verbindungstechnik ist im Anhang dargestellt (siehe Anhang Tabelle A-2). Bild 3-27 gibt einen Überblick der einzelnen Katalogtypen.

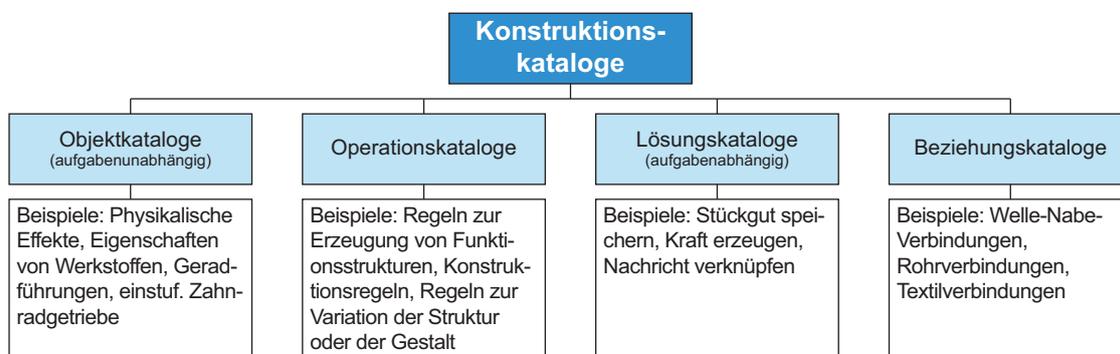


Bild 3-27: Einteilung von Konstruktionskatalogen [Rot01, S. 10]

⁵ Joining process PRIMA selection matrix

Der **Aufbau** von Konstruktionskatalogen gliedert sich nach ROTH in einen Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil. Der Gliederungsteil beschreibt die Strukturierungsaspekte, nach denen die im Katalog enthaltenen Elemente widerspruchsfrei eingeteilt werden. Der eigentliche Kataloginhalt ist im Hauptteil abgelegt. Je nach Inhaltsart sind dies bspw. Objekte oder Operationen (Regeln). Sie werden in Form von Skizzen, Gleichungen oder textuell beschrieben. Der Zugriffsteil enthält die Zugriffsmerkmale. Diese sind mit dem Hauptteil gekoppelt, d. h. es wird gekennzeichnet, ob bzw. in welchem Wertebereich eine Lösung das Merkmal erfüllt [Rot01, S. 5]. Bild 3-28 zeigt den Ausschnitt eines Konstruktionskatalogs für Verbindungen

Gliederungsteil		Hauptteil	Zugriffsteil								
Schlussart		Feste Verbindung	Eigenschaften						Bewertung		
			Demon- tierbar	Kein Spiel	Vor- span- nung	Rei- bungs- unab- hängig	Dreh- ge- sichert	Ferti- gung preis- wert	bei Verzicht auf		Gesamt
Nr.		1	2	3	4	5	6	Demon- tierbar	Vor- span- nung	9	
Stoffschluss	1		1.1 3	1.2 1	1.3 1	1.4 1	1.5 1	1.6 2	1.7 1,2	1.8 1,6	1.9 1,5
Berührungs- schluss	2		2.1 2	2.2 3	2.3 3	2.4 1	2.5 1	2.6 1	2.7 1,8	2.8 1,6	2.9 1,84
Kraftschluss	elastischer Schluss		3.1 1	3.2 1	3.3 0	3.4 3	3.5 2	3.6 3	3.7 1,8	3.8 2,0	3.9 1,67
			4.1 3	4.2 1	4.3 1	Bewertung der Eigenschaft von „ausgezeichnet“ (0) bis „schlecht“ (3)			4.7 1,6	4.8 2,0	4.9 1,84

Bild 3-28: Konstruktionskatalog für feste Verbindungen [Rot96, S. 11] (Ausschnitt)

Der **Zugriff** erfolgt über die Vorgabe geforderter Zugriffsmerkmale. Lösungen, welche die Zugriffsmerkmale nicht erfüllen, werden systematisch ausgeschlossen und der Lösungsraum wird eingeschränkt. Beispielsweise werden durch die Forderung nach *Demontierbarkeit* und *Spielfreiheit* die Lösungen 1, 2 und 4 ausgeschlossen.

Die Verknüpfung mehrerer Konstruktionskatalogen erfolgt über eine **Hierarchisierung**. Dabei werden drei Katalogebenen unterschieden: ubersichtskataloge, Detailkataloge und Firmenkataloge [VDI2232, S. 10]. Entsprechend dieser Gliederung erfolgt auch die rechnerinterne Abbildung der Kataloge [Rot01, S. 34f.]. **ubersichtskataloge** geben auf Grundlage der Schlussart und der den Schluss erzeugenden Kräfte einen ersten Überblick der Verbindungsverfahren und ermöglichen eine grobe Vorauswahl geeigneter Verfahren. In den verbindungsklassenspezifischen **Detailkatalogen** werden unterschiedliche Verbindungsverfahren innerhalb einer Verbindungsklasse gegenübergestellt. Beispiele sind Kataloge für Schraubenverbindungen [Bog83], Schnappverbindungen [Kol98], [Rot96], [KJ77] und Nietverbindungen [Rot96], [DK81]. Auf der niedrigsten Hierarchieebene sind **firmenspezifische Kataloge** enthalten, die meist nur ein Teilspektrum der Verbindungsklasse abdecken, die enthaltenen Verbindungsverfahren allerdings sehr detailliert beschreiben [VDI2232, S. 10].

Bewertung: Konstruktionskataloge bieten umfangreiche Informationen zu Montage-technologien und stellen daher eine gute Datenbasis für die Technologieauswahl dar. Über die geforderten Verbindungseigenschaften können geeignete Fügeverfahren identifiziert und gegeneinander bewertet werden. Die Suche nach Verfahren ist allerdings sehr zeitaufwändig. Eine effiziente Nutzung von Konstruktionskatalogen erfordert daher eine IT-technische Unterstützung.

3.5 Montagegerechte Produktgestaltung

Die integrative Konzipierung der Montage ist von einer Vielzahl von Wechselwirkungen geprägt. Das Montagekonzept beeinflusst maßgeblich die Produktgestalt, bspw. über Fügeverfahren oder Handhabungseinrichtungen. Ein möglicher Ansatzpunkt zur Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten in der frühen Phase sind Ansätze zur montagegerechten Gestaltung. Im Folgenden werden zwei Ansätze vorgestellt.

3.5.1 Design for Assembly (DfA)

Im Bereich der montagegerechten Gestaltung, die auch als Design for Assembly (DfA) bezeichnet wird, existiert eine Vielzahl von Arbeiten (z. B. [Gai81], [AKL83], [MO86], [Bar87]). Das übergeordnete Ziel ist ein kostengünstig zu produzierendes Produkt. Die bedeutendste Methode ist das von BOOTHROYD und DEWHURST entwickelte Design for Manufacturing and Assembly (DFMA⁶) [BD87], [BDK11]. Dieses beschreibt ein produktentwicklungsorientiertes Vorgehen für die fertigungs- und montagegerechte Konstruktion, wobei auch Aspekte der Produktionsplanung betrachtet werden. Den Ausgangspunkt bildet ein Produktentwurf mit einem hohem Konkretisierungsgrad [Hes06, S. 19], [Mül08, S. 32]. Das Vorgehen gliedert sich in drei Schritte, die bei Bedarf mehrfach durchlaufen werden (Bild 3-29).

Auswahl der Montagemethode: Im ersten Schritt ist der angestrebte Automatisierungsgrad festzulegen. Hierzu wird auf Grundlage der erwarteten jährlichen Produktionsmenge und die Variantenzahl mit Hilfe von Auswahl diagrammen die grundsätzliche Montagemethode bestimmt (z. B. Manuelle Montage, Einzelstation mit Roboter, Mehrstationen mit Roboter) [BD87, S. 1-6], [Hes06, S. 19].

Analyse der Montageaufgabe: In Abhängigkeit der gewählten Montagemethode wird das Produkt analysiert. Zunächst wird die theoretisch minimale Teileanzahl bestimmt. Hierbei wird überprüft, ob separate Teile erforderlich sind oder sich Bauteile integrieren lassen. Die zu klärenden Fragestellungen sind: *Erfordert die Funktion eine Relativbewegung des Bauteile?*, *Wird ein anderes Material benötigt (Isolation)?* und *Erfordert die Montage/Demontage eine Bauteiltrennung?* Anschließend wird auf Grundlage der Handhabungs- und Fügeigenschaften der Bauteile die minimal erforderliche Montage-

⁶ DFMA ist ein eingetragenes Warenzeichen der Boothroyd Dewhurst Inc. [BD13-ol]

zeit abgeschätzt. Hierfür stehen Datenbanken mit Standardwerten zur Verfügung. Durch einen Vergleich mit der tatsächlichen Montagezeit ergibt sich der DFA-Index, der die Designeffizienz kennzeichnet. Abschließend werden Schwierigkeiten im Montageablauf identifiziert, die Qualitätsprobleme zur Folge haben könnten [BA92, S. 626].

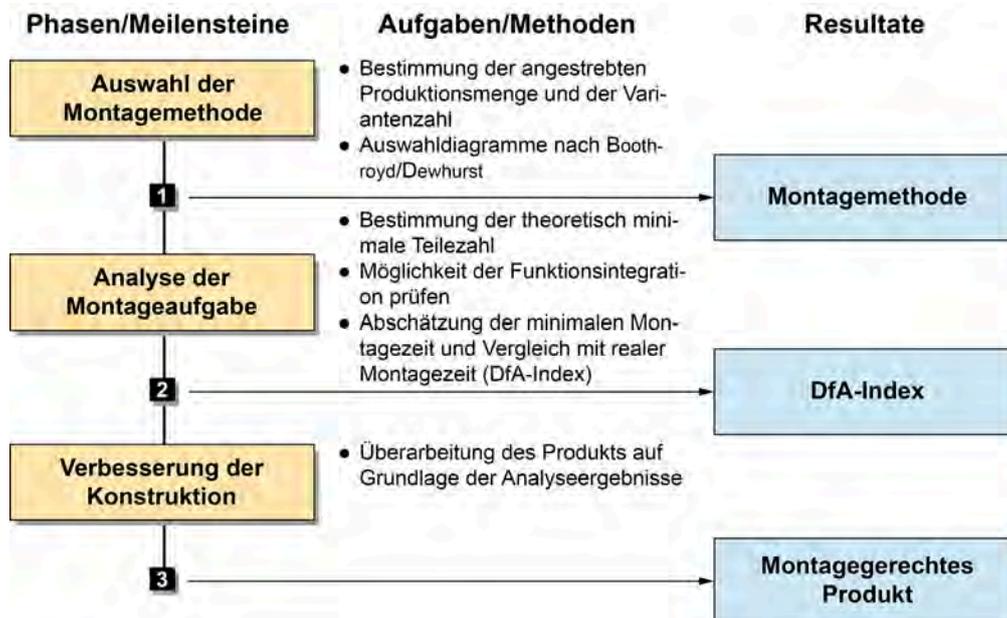


Bild 3-29: Vorgehen beim Design for Assembly nach [BD87, S. 0-1]

Verbesserung der Konstruktion: Basierend auf den Analyseergebnissen erfolgt eine Überarbeitung des Produkts. Hierbei wird versucht die Bauteilanzahl durch Integration zu minimieren. Die entstehenden Bauteile sollen montagegerecht gestaltet sein [Bot87, S. 3]. Abschließend wird durch einen erneuten Durchlauf der Analyse die Verbesserung der Konstruktion quantifiziert und es werden ggf. weitere Anpassungen vorgenommen.

BOOTHROYD und DEWHURST haben die DFMA-Methode als **kommerziellen Softwaretools** realisiert. Dieses unterstützt den Entwickler bei der fertigungs- und montagegerechten Konstruktion und stellt eine umfangreiche Sammlung von Erfahrungswissen aus verschiedenen Industriebereichen zur Verfügung. Der Reifegrad der Software ist sehr hoch, ihre Anwendung jedoch komplex. Die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wird hierdurch eingeschränkt [Mor04, S. 61], [MWB+12, S. 459].

Bewertung: Das DfA ermöglicht die Berücksichtigung montagerrelevanter Aspekte in der Produktgestalt. Durch die Ermittlung des DfA-Index können mehrere Alternativen gegeneinander verglichen werden. Den Ausgangspunkt bildet die Gestalt eines weitestgehend fertig konstruierten Produkts, weshalb der Ansatz für die frühe Phase nicht geeignet ist. Das Verfahren und insb. die Bestimmung der erforderlichen Zeiten aller Montageschritte ist sehr arbeitsintensiv und zeitaufwändig. Weiterhin fokussieren sowohl das Verfahren als auch das Softwaretool auf die Reduzierung der Teilezahl durch eine Integralbauweise. Dies führt zu einer Einengung des Lösungsraums.

3.5.2 Informationssystem für DfX-Richtlinien nach BAUER

BAUER hat ein Werkzeug zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext Design for X (DfX) entwickelt. Teil dieses Werkzeugs ist ein Informationssystem für DfX-Richtlinien. Das prototypisch implementierte Software-Werkzeug ermöglicht die strukturierte Sammlung und Bereitstellung von Gestaltungsrichtlinien. Die Grundlage der Datenbank bilden Gestaltungsrichtlinien aus der Literatur⁷. Eine Erweiterung der Datenbank um unternehmensspezifische Gestaltungsrichtlinien ist möglich. Hierdurch wird die Integration des Erfahrungswissens der Mitarbeiter ermöglicht und die Bereitstellung dieses Wissens in zukünftigen Entwicklungsprojekten unterstützt.

Die in der Datenbank gespeicherten Gestaltungsrichtlinien umfassen eine Beschreibung in semantischer Form, ggf. eine bildhafte Darstellung, den betroffenen DfX-Aspekt, eine Quellenangabe, die Phase im Produktentstehungsprozess, in der die Gestaltungsrichtlinie relevant ist, und die Herkunft der Gestaltungsrichtlinie. Bild 3-30 zeigt beispielhaft eine beschriebene Gestaltungsrichtlinie.

ID	DBID	DfX-Aspekt	Quelle
160	---	montagegerecht	HESSE, S.: Montage-Atlas. Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt, 1994
Richtlinie			
Gestalte genau so viele Fügeflächen, wie zu einer eindeutigen Lagebestimmung (Position und Orientierung) eines Bauelements nötig sind.			
Zusatz			
Überbestimmungen führen zu Montageschwierigkeiten, bei einer Unterschreitung wird das Funktionsziel nicht erreicht.			

Den Gestaltungsrichtlinie sind in der Datenbank weitere Attribute zugewiesen:

- Phase im PEP
- Merkmale
- Eigenschaften
- Ziele

Legende

ID: Identifikationsnummer

DBID: Datenbank Identifikationsnummer

Bild 3-30: Rechnerinterne Abbildung von Gestaltungsrichtlinie nach [Bau09, S. 106]

Sämtliche Richtlinien sind in einer dreistufigen, hierarchischen Struktur eingeordnet, die eine Identifikation geeigneter Richtlinien ermöglicht. Jeder Richtlinie sind hierzu festgelegte Merkmale, resultierende Eigenschaften und übergeordnete Ziele zugeordnet. Merkmale bezeichnen die Aspekte eines Produkts, auf welche sich die Aussagen der Richtlinie beziehen (z. B. Form, Lage, Werkstoff, Montageverfahren). Der Produktentwickler kann diese unmittelbar beeinflussen. Aus den Merkmalen resultieren Produkteigenschaften (z. B. Gewicht, Sicherheit, Langlebigkeit, Fertigbarkeit, Montierbarkeit). Auf diese kann der Produktentwickler nur über die Merkmale mittelbar Einfluss ausüben. Die Beachtung der Richtlinie bzgl. der Merkmale fördert die Sicherstellung der

⁷ Die Datenbank umfasst mehr als 300 Richtlinien aus [Wee81], [AKL85], [Lew85], [Hes94], [Neu02].

Produkteigenschaften sowie das Erreichen der Ziele (z. B. niedrigere Kosten, Qualitätssteigerung, Reduzierung der Umwelteffekte) [Bau09, S. 61ff.].

Bewertung: Das von BAUER entwickelte Informationssystem ermöglicht die strukturierte Bereitstellung von Gestaltungsrichtlinien. Über die Strukturierung der Richtlinien nach Merkmalen, resultierende Eigenschaften und übergeordnete Ziele ist die Identifikation der relevanten Richtlinien möglich. Die Erweiterbarkeit des Informationssystems ermöglicht die Integration von Richtlinien für mechatronische Systeme. Durch die Verknüpfung der Gestaltungsrichtlinien mit den betreffenden Phasen des Produktentstehungsprozesses ist eine Fokussierung auf die Phase der Konzipierung möglich.

3.6 Kommerzielle Softwaresysteme für die integrierte Produktentstehung

Unter dem Begriff CAx-Systeme werden Softwaresysteme im Unternehmensumfeld zusammengefasst. Sie bieten für verschiedene Aufgabenstellungen eine Rechnerunterstützung (CA: Computer-Aided). Je nach Einsatzgebiet wird das „x“ ersetzt, z. B. CAD für Computer Aided-Design Design im Bereich der Entwicklung und Konstruktion. Der eigentliche Problemlösungsprozess und der gesamte Entwicklungsablauf wird weiterhin vom Anwender geführt [VWB+09, S. 1].

Im Bereich der Produktentwicklung kommen in erster Linie CAD-Systeme sowie Simulationssoftware (z. B. FEM- und Mehrkörper-Simulationen) zum Einsatz. Die Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktion bildet die Arbeitsplanung. In diesem Umfeld unterstützen Systeme zur Prozessplanung, NC- und RC-Simulation, Materialflusssimulation und der Layoutplanung [VWB+09, S. 359f.]. Die Speicherung der Produktdaten erfolgt über Produktdatenmanagement-Systeme. Im Kontext der integrierten Konzipierung der Montage sind daher die folgenden drei Klassen von Softwaresystemen relevant:

Computer-Aided Design (CAD): CAD-Systeme unterstützen in der Entwicklung und Konstruktion die Modellierung von Produkteinzelnteilen und -baugruppen. Die Schwerpunkte liegen in der Modellierung der Geometrie, der Ableitung von Zeichnungen, der Informationsbereitstellung sowie der Durchführung von Berechnungen und Simulationen. Der Funktionsumfang heutiger Systeme geht weit über diese Kernfunktionalität hinaus und umfasst bspw. auch Module zur Erstellung von NC-Programmen [Hac12, S. 833ff.]. Beispiele sind CATIA der Firma Dassault Systemes oder NX von Siemens PLM Software.

Computer-Aided Planning (CAP)⁸: CAP-Systeme unterstützen die Planung von Produktionsprozessen und die Erstellung von Arbeitsplänen. Den Ausgangspunkt bildet das im CAD-System erstellte Modell des herzustellenden Produkts. Den Bauteilen und

⁸ Wird auch als Computer-Aided Process Planning (CAPP) bezeichnet.

Baugruppen werden Fertigungs-, Montage- und Prüfprozesse zugewiesen. Anschließend erfolgen die Maschinenauswahl, die Bestimmung der Fertigungsmittel sowie die Vorgabezeitermittlung. Den einzelnen Arbeitsvorgängen werden anschließend Betriebsmittel zugewiesen. Aufgrund der zentralen Stellung besitzen CAP-Systeme für den Datenaustausch Schnittstellen zu CAD-, PPS- und NC-Systemen [EMP+96, 7-83ff.], [BGW11, S. 183]. Tecnomatix Assembly Planning der Firma Siemens PLM Software oder Delmia V6 Manufacturing Planning von Dassault Systemes sind zwei Beispiele für kommerzielle CAP-Systeme.

Produktdatenmanagement (PDM): Die Aufgabe von PDM-Systemen ist die Speicherung und Verwaltung von Produktdaten entlang des Produktentstehungsprozesses. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die Abbildung der Produktstruktur. Auf Basis einer generischen Produktstruktur werden anwendungsfallspezifisch Sichten gebildet, z. B. eine Funktionssicht oder eine Montagesicht. Die informationstechnische Darstellung der Strukturen erfolgt in der Regel in Form von Listen oder Tabellen, z. B. Stücklisten [ARV+12, S. 932ff.].

Bewertung: Die kommerziell verfügbaren Softwarewerkzeuge in den Bereichen CAD, CAP und PDM unterstützen die Verknüpfung von Produktentwicklung und Arbeitsplanung. Den Ausgangspunkt der CAP-Systeme bilden jedoch fertige Produktmodellen aus den CAD-Systemen. Eine frühzeitige Gestaltmodellierung sowie die Ableitung erster Montagefolgen auf Basis eines Produktkonzepts bleiben weitestgehend unberücksichtigt. Die PDM-Systeme erzeugen verschiedene Sichten der Produktstruktur, wobei eine frühzeitige montageorientierte Strukturierung nicht fokussiert wird. Weiterhin unterstützen Softwarewerkzeuge einen Entwicklungsprozess lediglich, eine Steuerung erfolgt nicht. Ihren vollen Nutzen entfalten diese Systeme erst durch die Integration in eine umfassende Systematik [Pro10, S. 5f.].

3.7 Handlungsbedarf

Die untersuchten Ansätze wurden jeweils mit den in Kapitel 2.8 aufgestellten Anforderungen verglichen. Im Folgenden wird die Bewertung je Anforderung zusammengefasst. Das Ergebnis ist in Bild 3-31 visualisiert.

A1) Anwendbarkeit in der Mechatronik: Einige Ansätze erfüllen diese Anforderung in vollem Umfang und sind speziell für mechatronische Systeme entwickelt (z. B. die Produktstrukturierung nach STEFFEN). Fast alle weiteren Ansätze sind allgemein anwendbar und nicht auf eine Fachdisziplin beschränkt. Sie lassen sich auch in der Mechatronikentwicklung einsetzen bzw. hierfür anpassen.

A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme: Die meisten Ansätze sind im Kontext der klassischen Konstruktionsmethodik entwickelt worden und setzten zeitlich nach der Konzipierung ein.

Die Verfahren zur Gestaltmodellierung und zur Produktstrukturierung lassen sich in die Entwicklungsmethodik integrieren. Dies erfordert z. T. die Anpassung der Verfahren

A3) Prinziplösung als Ausgangspunkt: Die Ansätze zur Technologieauswahl und der montagegerechten Gestaltung beginnen mit einer vollständigen Produktbeschreibung nach Abschluss der Konstruktion. Die anderen Ansätze fokussieren bereits die frühe Phase oder lassen sich entsprechend adaptieren.

A4) Frühzeitige Spezifikation der Produktgestalt: Bei den untersuchten integrativen Ansätzen zur Montageplanung steht die Festlegung der Produktgestalt nicht im Fokus. Entsprechende Hilfsmittel werden nicht zur Verfügung gestellt. Nur die Verfahren zur frühzeitigen Gestaltmodellierung erfüllen diese Forderung.

A5) Frühzeitige montageorientierte Produktstrukturierung: Sowohl die integrativen Ansätze als auch die Ansätze zur montageorientierten Produktstrukturierung bieten die Möglichkeit, das Produkt in Baugruppen und Module zu gliedern. Allerdings kaum ein Verfahren ist auf die Besonderheiten der montageorientierten Strukturierung ausgerichtet. Auch einige Ansätze zur frühzeitigen Gestaltmodellierung bieten mittels Hierarchisierung die Möglichkeit, dass Produkt montageorientiert zu strukturieren.

A6) Auswahl von Montagetechnologien: Die Ansätze zur Technologieauswahl erfüllen diese Forderung weitestgehend. Einschränkend ist festzuhalten, dass die Verbindungsauswahl nach VDI-Richtlinie 2232 sowie Konstruktionskataloge für die Anwendung in den späteren Entwurfsphasen entwickelt wurden. Eine Übertragung in die Konzipierung ist jedoch möglich.

A7) Berücksichtigung montagetechnischer Restriktionen: Die integrativen Ansätze nutzen das Produktkonzept als Ausgangspunkt, ein Rückfluss von montagetechnischen Restriktionen erfolgt jedoch nicht. Die Ansätze zur montagegerechten Produktgestaltung bieten die Möglichkeit, auf Grundlage des Montagekonzepts Gestaltungsrichtlinien in der Produktentwicklung bereitzustellen.

A8) Ganzheitliche Konzipierung der Montage: Lediglich die integrativen Ansätze nach BICHELMAIER und GRUNWALD erfüllen diese Anforderung. Die Ansätze nach MÜLLER und NORDSIEK weisen Defizite auf und vernachlässigen Teilaspekte.

A9) Nutzung eines disziplinübergreifenden Beschreibungsmittels: Die Ansätze nach NORDSIEK und STEFFEN basieren auf der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Kap. 2.6.1) und erweitern diese. Sie bieten somit ein disziplinübergreifendes Beschreibungsmittel.

A10) Systematische Vorgehensweise: Die meisten der vorgestellten Ansätze bieten eine systematische Vorgehensweise. Dabei werden allerdings entweder nur Teilaspekte der integrativen Montagekonzipierung betrachtet oder die Ansätze sind in den späteren Entwurfsphasen angeordnet.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.		Anforderungen (A)									
		Anwendbarkeit in der Mechatronik	Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik	Prinziplösung als Ausgangspunkt	Frühzeitige Spezifikation der Produktgestalt	Frühzeitige montageorientierte Produktstrukturierung	Technologieauswahl	Berücksichtigung montage-technischer Restriktionen	Ganzheitliche Konzipierung der Montage	Disziplinübergreifendes Beschreibungsmittel	Systematisches Vorgehen
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Integrative Ansätze	Integrierter Vorgehensplan für Konstruktion und Montageplanung nach BICHELMAIER										
	Integrierte Produktentwicklung und Montageplanung nach GRUNWALD										
	Methodik für die Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen nach MÜLLER										
	Systematik zur Produktionssystemkonzipierung nach NORDSIEK										
Frühzeitige Gestaltmodellierung	Methodisches Gestalten nach EHRENSPIEL										
	Baukonzept nach PONN/LINDEMANN										
	Contact and Channel Model nach ALBERS/MATTHIESEN										
	Schrittweise Gestaltsynthese nach LEMBURG										
	Module Interface Graph nach BLEES										
Montageorientierte Produktstrukturierung	Design Structure Matrix										
	Produktstrukturierung nach STEFFEN										
	Produktstrukturierung nach DAHL										
	Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS)										
	Modularisierung nach KOEPPEN										
	Modularisierung nach VDI-Richtlinie 2223										
	Festlegung der Produktarchitektur nach SEDCHAICHARN										
Technologieauswahl	Verbindungsauswahl nach VDI-Richtlinie 2232										
	Technologieauswahl nach ASHBY										
	Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER										
	Konstruktionskataloge										
Montagegerechte Produktgestaltung	Design for Assembly (DfA)										
	Informationssystem für DfX-Richtlinien nach BAUER										
Kommerzielle Softwaresysteme für die integrierte Produktentstehung											

Bild 3-31: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

Der Vergleich zeigt, dass einige der untersuchten Ansätze eine Vielzahl der Anforderungen erfüllen, sie zeigen allerdings auch ausgeprägte Defizite. Zum Beispiel eignet sich der Ansatz nach NORDSIEK sehr gut für die integrative Produktionssystemkonzipierung im Bereich der frühzeitigen Fertigungsprozessplanung. Defizite bestehen hingegen bei der Betrachtung der Produktgestalt, der montageorientierten Strukturierung sowie dem Rückfluss von montage-technischen Restriktionen in die Produktentwicklung. Keiner der Ansätze erfüllt die gestellten Anforderungen vollumfänglich. Es besteht somit Handlungsbedarf, eine *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* zu entwickeln.

4 Anwendungsbeispiel Pedelec

Zur besseren Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit wird die entwickelte Systematik an einem durchgängigen Beispiel erläutert. Im BMBF-Verbundprojekt VireS – „Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung“ diente die Konzipierung eines Elektrofahrrads als Demonstrator für das entwickelte Instrumentarium. Dieses Anwendungsbeispiel wird in der vorliegenden Arbeit weitergeführt.

Elektrofahrräder mit tretabhängiger Motorunterstützung werden als Pedelec (Pedal Electric Cycle) bezeichnet. Durch die Integration von Sensorik und Aktorik sowie dem Einsatz von Software- und Regelungstechnik hat sich das ursprünglich rein mechanische System Fahrrad zu einem komplexen mechatronischen System gewandelt. Der prinzipielle Aufbau und die Wirkungsweise eines Fahrrads sind allgemein bekannt, wodurch eine gute Nachvollziehbarkeit gewährleistet ist. Bild 4-1 zeigt beispielhaft ein Pedelec und erläutert die spezifischen Komponenten.

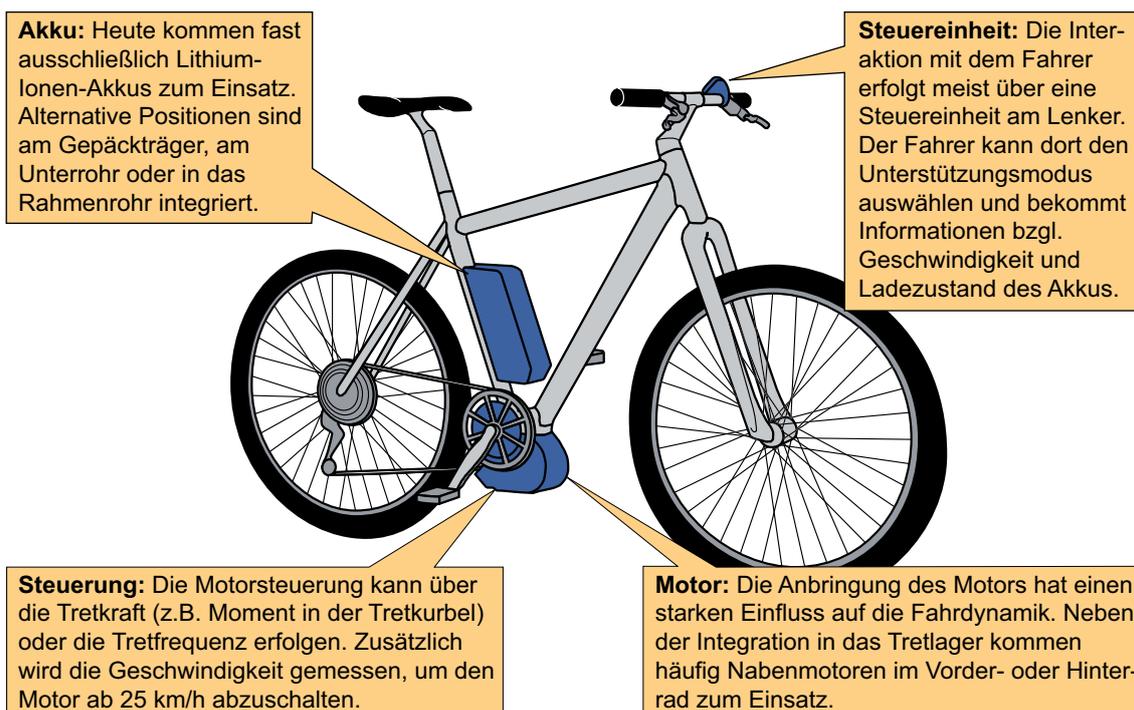


Bild 4-1: Beispielhafte Darstellung eines Pedelec mit Tretlagermotor [GB12, S. 71]

In der EU Richtlinie 2002/24EG [EU02] und der DIN EG 15194 [DIN15194] sind die rechtlichen Grundlagen definiert. Der Fahrer wird von dem integrierten **Elektromotor** nur unterstützt, wenn er in die Pedale tritt. Die Motorleistung ist auf maximal 250 W limitiert. Mit zunehmender Geschwindigkeit muss die elektrische Tretkraftunterstützung progressiv abnehmen und bei Erreichen einer Geschwindigkeit von 25 km/h wird die Motorunterstützung abgeschaltet.

Die elektrische Energie wird über einen **Akku** zur Verfügung gestellt. Bei Verwendung von Nabenmotoren kann die Reichweite durch eine Rückspeisung der Bremsenergie erhöht werden. Diese Funktionalität wird als Rekuperation bezeichnet.

Über eine **Steuereinheit** erfolgt die Interaktion mit dem Fahrer. Dieser kann Eingaben vornehmen (z. B. die Wahl des Unterstützungsmodus) und wird über den aktuellen Status informiert (z. B. Ladezustand des Akkus, verbleibende Reichweite). Über Softwareprogramme können zusätzliche Funktionen implementiert werden, wie Assistenzsysteme zur automatischen Gangwahl oder eine Lichtautomatik.

Sämtliche Regelaufgaben werden von einer **Steuereinheit** übernommen. Diese wertet die Sensorsignale aus und steuert den Motor an. Über Sensoren werden bspw. die Trittfrequenz, das Trittmoment und die Fahrzeuggeschwindigkeit erfasst.

Als Unternehmensumfeld wurde ein fiktives Unternehmen der Fahrradindustrie gewählt. Das Unternehmen hat bisher Tourenräder und Mountainbikes entwickelt und in großer Stückzahl produziert. Es kann daher von einem umfangreichen Erfahrungswissen bzgl. konventioneller Fahrräder ausgegangen werden. Weiterhin liegt aus dem BMBF-Verbundprojekt VireS für dieses Unternehmen ein voll funktionsfähiges Enterprise Resource Planning System mit den zugehörigen Daten vor, bspw. Stücklisten und Arbeitspläne.

Mit der Verbreitung und Etablierung der Elektromobilität steigen die Verkaufszahlen von Pedelecs rasant an [ADFC09], [ZIV11]. Das Modellunternehmen will in den Markt der Elektrofahrräder einsteigen und entwickelt hierfür ein Pedelec. Aus der strategischen Produktplanung resultiert die Forderung nach einem innovativen und ausgefallenen Antriebskonzept. Das Pedelec soll nicht direkt als Elektrofahrrad erkennbar sein. In Bild 4-2 ist der erste Entwurf der Designabteilung zu sehen.



Design by J. Kapischke

Bild 4-2: Designentwurf des zu entwickelnden Pedelecs

Der Entwurf zeigt ein Fahrrad mit klassischem Diamantrahmen. Die Gabel ist asymmetrische mit einseitiger Aufhängung des Vorderrades ausgeführt. In die Gabel ist der Antriebsmotor integriert, der so nicht direkt im Sichtbereich liegt. Der Akku wird von Rahmenelementen kaschiert

In der Konzipierung wurde für das Pedelec bereits ein Produktkonzept erarbeitet¹. Somit liegen die Partialmodelle Anwendungsszenarien, Umfeld, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten und Gestalt in einem ersten Entwurf vor. Sie bilden den Ausgangspunkt für die integrative Montagekonzipierung für das Pedelec. Eine detaillierte Darstellung der Partialmodelle findet sich im Anhang (siehe Anhang Kap. A3).

Die Spezifikation der Prinziplösung des Pedelecs erfolgt mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS. Hierbei kommt das Modellierungswerkzeug Mechatronic Modeller² zum Einsatz, welches die Spezifikationstechnik umsetzt. Der Mechatronic Modeller bildet die Prinziplösung rechnerintern als zusammenhängendes, formales Datenmodell ab [GBD+12, S. 89].

¹ Das Anwendungsbeispiel orientiert sich an dem Demonstrator aus dem Verbundprojekt VireS. Für weiterführende Informationen zur Konzipierung des Pedelecs sei auf [GB12, S. 69ff.] und [GBD+12, S. 88ff.] verwiesen.

² Für detaillierte Informationen zum Mechatronic Modeller sei auf [GBD+12, S. 107ff.] verwiesen.

5 Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte *Systematik zur integrativen Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* unterstützt den Übergang von der Produktkonzipierung in die Produktionssystemkonzipierung. Der Fokus liegt hierbei auf der montageorientierten Produktstrukturierung und der Spezifikation der Montageprozesse, ausgehen von der Prinziplösung des Produkts.

Das vorliegende Kapitel gibt eine Einführung in die entwickelte Systematik. In Kapitel 5.1 wird zunächst die Grundidee vorgestellt und die Systematik in die Produktentstehung eingeordnet. Kapitel 5.2 umfasst den Lösungsansatz der integrativen Montagekonzipierung. Das grundsätzliche Vorgehen ist Inhalt von Kapitel 5.3 und abschließend werden in Kapitel 5.4 die Bestandteile der Systematik vorgestellt. Die detaillierte Beschreibung der Systematik am Anwendungsbeispiel Pedelec folgt in Kapitel 6.

5.1 Grundidee

Das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung stellt das übergeordnete Rahmenwerk für die entwickelte Systematik dar. Demnach sind Produkt und Produktionssystem bereits in der frühen Entwicklungsphase, der Konzipierung, parallel und in enger Abstimmung zu entwickeln (vgl. Kap. 2.2). Die Systematik soll den Übergang von der Produktkonzipierung in die Konzipierung des Produktionssystems unterstützen und entspricht somit dem oberen horizontalen Pfeil im 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Bild 2-7). Den prinzipiellen Ablauf der integrativen Montagekonzipierung zeigt Bild 5-1.

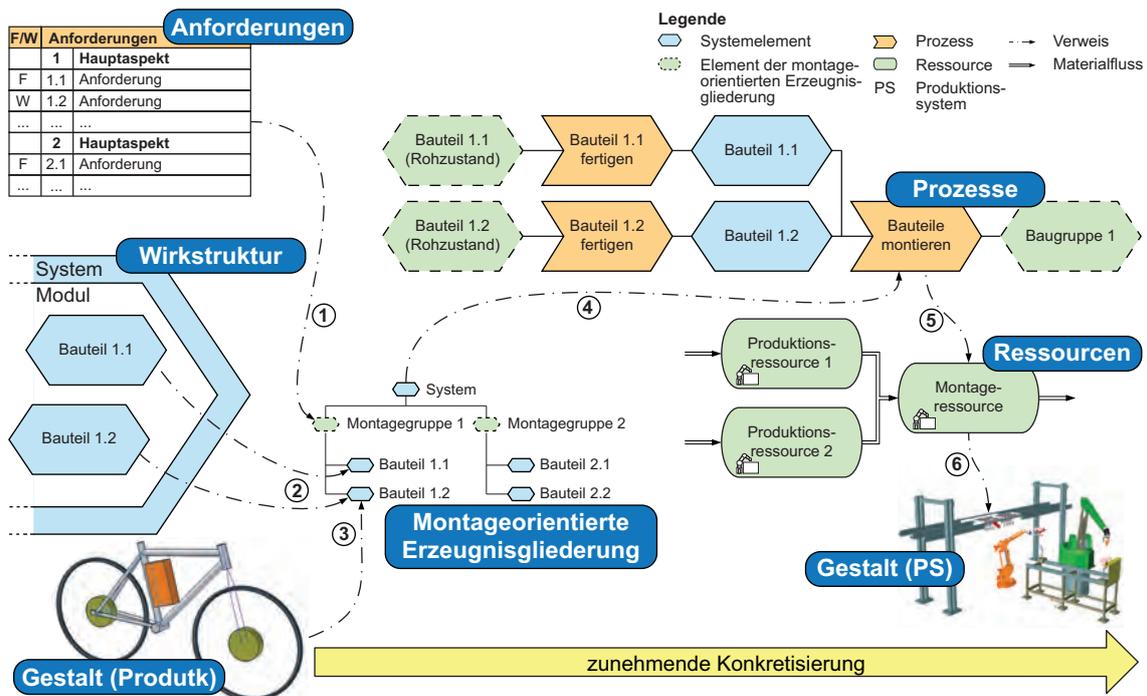


Bild 5-1: Prinzipieller Ablauf der Montagekonzipierung nach [GBR10, S. 716]

Den Ausgangspunkt bildet die Prinziplösung des Produkts, die in der Regel funktionsorientiert strukturiert ist. Ihre Module und Baugruppen spiegeln daher nicht die im Montageprozess vorliegenden Baugruppen wider. Aus diesem Grund ist das Produkt zunächst nach montageorientierten Gesichtspunkten zu strukturieren. Ausgehend von den Partialmodellen Anforderungen (1), Wirkstruktur (2) und Gestalt (3) wird eine montageorientierte Erzeugnisgliederung gebildet, welche den Ausgangspunkt für die anschließende Spezifikation der Montageprozesse (4) darstellt. Der Montageprozess bringt die Montageschritte in eine logische und zeitliche Reihenfolge und definiert die zum Einsatz kommenden Montageverfahren. Weiterhin bildet er die Grundlage für die Konzipierung der Fertigungsprozesse (vgl. [Nor12, S. 96ff.]). Auf Basis des Montageprozesses erfolgt die Konzipierung des Montagesystems, d. h. es werden die notwendigen Ressourcen zur Ausführung der Montageprozesse ausgewählt (5) sowie deren Gestalt und Anordnung festgelegt (6).

5.2 Lösungsansatz

Die entwickelte Systematik beruht auf der Verknüpfung von Produktkonzept und Produktionssystemkonzept über die Eigenschaften der Bauteilverbindungen, die sog. Verbindungseigenschaften. Bild 5-2 zeigt die wesentlichen Entitätsmengen und ihre gegenseitigen Beziehungen.

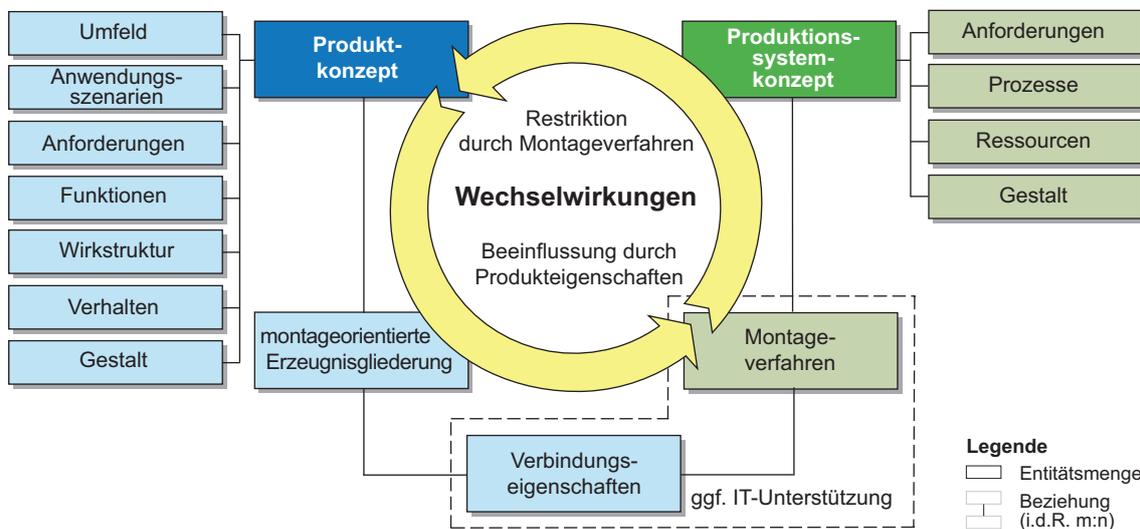


Bild 5-2: Vereinfachte relationale Darstellung eines semantischen Informationsmodells für die Konzipierung der Montage nach [GBK10, S. 348]

Die Aspekte bei der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem sind durch Partialmodelle beschrieben. Bei dem **Produktkonzept** sind dies *Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten* und *Gestalt* (vgl. Kap. 2.6.1). Das Produktkonzept bildet die Grundlage der **montageorientierten Erzeugnisgliederung**, welche die gestaltbehafteten Systemelemente und ihre Aggregation zu Montagegruppen und Vormontagegruppen beschreibt. Die notwendigen Informatio-

nen sind in den Partialmodellen *Wirkstruktur* und *Gestalt* enthalten. Bauzusammenhänge zwischen den Systemelementen werden mittels **Verbindungseigenschaften** beschrieben, z. B. die Lösbarkeit der Verbindung oder die Art des Zusammenhalts. Das Produktkonzept wird um diese Informationen ergänzt. Realisiert werden Bauteilverbindungen bzw. der Verbindungseigenschaften über **Montageverfahren**, die im weiteren Verlauf der Konzipierung detailliert und konkretisiert werden. Auf Grundlage der montageorientierten Erzeugnisgliederung und der Montageverfahren wird das **Produktionssystemkonzept** erstellt, welches in den Partialmodellen *Anforderungen*, *Prozesse*, *Resourcen* und *Gestalt* beschrieben wird (vgl. Kap. 2.6.1).

Dieser Lösungsansatz zeigt deutlich die **Wechselwirkungen** zwischen der Prinzipiellösung des Produkts und dem Konzept des zugehörigen Produktionssystems. Die Prinzipiellösung schränkt die möglichen Montageverfahren ein, bspw. über die Gestalt der Bauteile (Zugänglichkeit der Fügestelle) und deren Materialpaarung. Andererseits folgen aus den gewählten Montageverfahren Restriktionen an die Produktgestaltung, bspw. erforderliche Materialstärken oder Greifflächen für Handhabungswerkzeuge.

5.3 Prinzipielles Vorgehen der Systematik

Das prinzipielle Vorgehen zur Konzipierung der Montage gliedert sich in fünf Hauptphasen: *Konzipierung der Produktgestalt*, *Planen und Klären der Montageaufgabe*, *montageorientierte Produktstrukturierung*, *Konzipierung des Montageprozesses* und *Konzipierung des Montagesystems*. Die Phasen ordnet sich entsprechend Bild 5-3 in das Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem ein (vgl. Kap. 2.6.2, Bild 2-19).

Konzipierung der Produktgestalt: Den Ausgangspunkt für die Montagekonzipierung bildet die Produktgestalt. Im Partialmodell *Gestalt* wird die Geometrie der einzelnen Bauteile spezifiziert und Bauteile werden zu Baugruppen zusammengefasst. Hierbei sind die räumliche Anordnung sowie die Bauzusammenhänge festzulegen. Die Beschreibung der Produktgestalt erfolgt in Form von Handskizzen oder grob maßstäblichen 2D-Zeichnungen. Da diese nicht maschineninterpretierbar sind, werden die Bauzusammenhänge formalisiert und in der *Wirkstruktur* abgelegt. Abschließend werden die Bauzusammenhänge konkretisiert, wobei Eigenschaften, wie der Verbindungstyp, die Lösbarkeit der Verbindung oder die primäre Schlussart festzulegen sind. Die Bauzusammenhänge und Verbindungseigenschaften bilden die Grundlage für die spätere montageorientierte Produktstrukturierung und die Identifikation geeigneter Montageverfahren, insb. der Fügeverfahren.

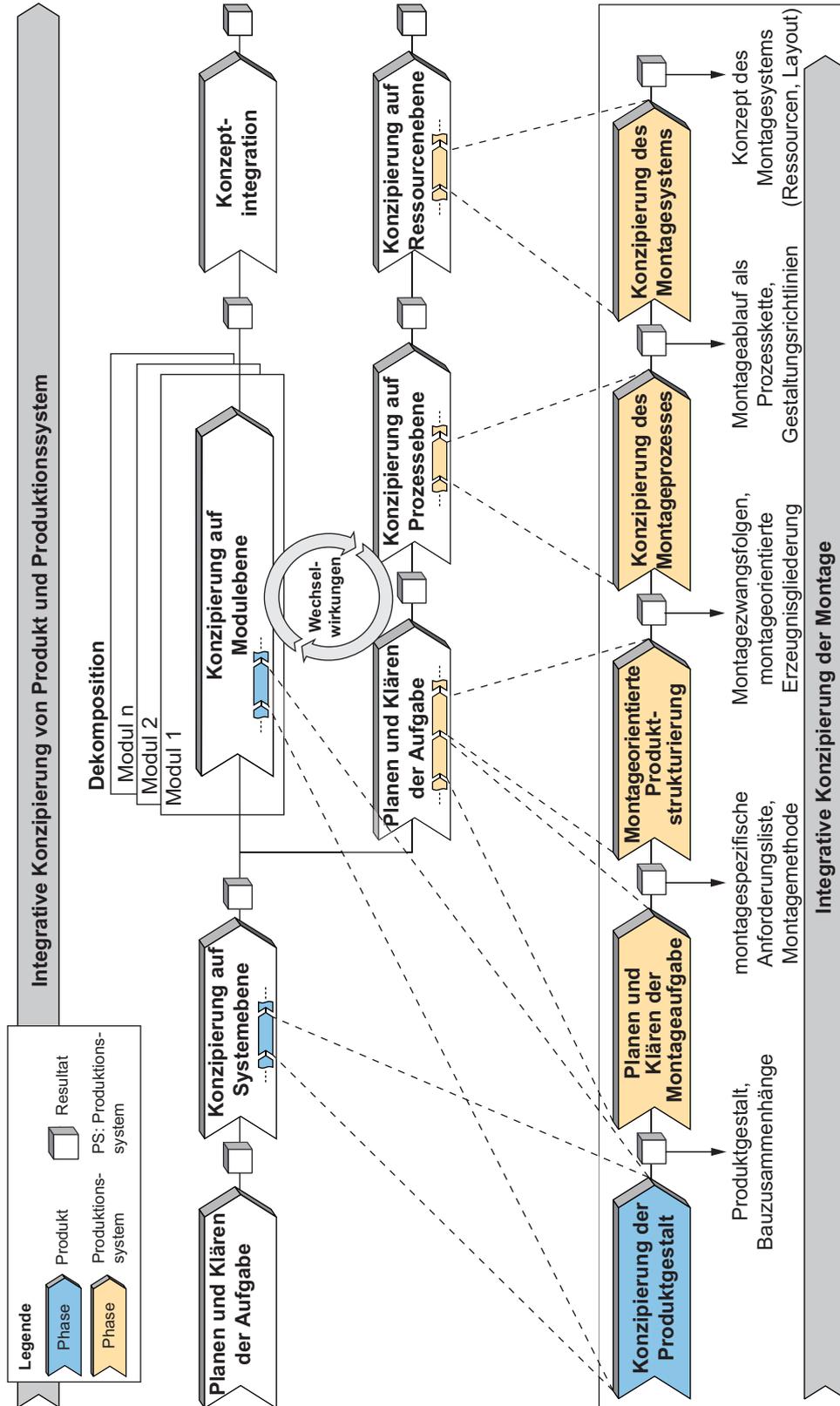


Bild 5-3: Vorgehen zur Konzipierung der Montage und Einordnung in das Vorgehensmodell zur integrativen Konzipierung

Planen und Klären der Montageaufgabe: In dieser Phase werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Montagekonzept aufgestellt. Zunächst erfolgt die Analyse der Produktanforderungen. Hierbei wird die Anforderungsliste auf die montagerelevanten Anforderungen reduziert, bspw. Angaben zu den erwarteten Stück- und Variantenzahlen. Das Resultat ist eine montagespezifische Anforderungsliste. Anschließend werden Anforderungen an die Montage aus weiteren Unternehmensbereichen ergänzt (z. B. aus der strategischen Produktionsplanung). Weiterhin hat der Automatisierungsgrad des Montagesystems einen großen Einfluss auf das Montagekonzept und die Produktgestaltung, weshalb bereits auf Grundlage der Anforderungen eine erste Festlegung der grundlegenden Montagemethode erfolgt (z. B. manuelle-, hybride- oder automatisierte-Montage). Die Grundlage hierfür bilden Stückzahlabschätzungen sowie die zu erwartende Produktkomplexität.

Montageorientierte Produktstrukturierung: Das Ziel dieser Phase ist eine montageorientierte Erzeugnisgliederung. Sie beschreibt die Aggregation der Bauteile zu Montagegruppen und Vormontagegruppen, die im Verlauf der Montage gebildet werden. In der Regel stimmen diese nicht mit den funktionsorientiert gebildeten Baugruppen des Produktkonzepts überein. Zunächst werden in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung Montagezwangsfolgen identifiziert. Dies sind Restriktionen in der Reihenfolge der Montageschritte der Bauteile. Auf Grundlage der Flussbeziehungen und der Bauzusammenhänge erfolgt die montageorientierte Produktstrukturierung, in dessen Rahmen die Bauteile zu Montagegruppen zusammengefasst werden. Abschließend folgt die Überführung der Montagegruppen in eine montageorientierte Erzeugnisgliederung.

Konzipierung des Montageprozesses: Das Ziel ist eine erste Montageablaufstruktur in Form einer Prozesskette, welche die durchzuführenden Montageschritte spezifiziert und sie in eine zeitliche und logische Reihenfolge bringt. Sie wird auf Grundlage der montageorientierten Erzeugnisgliederung abgeleitet. Sind Teile des Montageprozesses im Unternehmen bekannt, wird die Prozesskette entsprechend ergänzt. Dies kann bei der Wiederverwendung von Baugruppen der Fall sein, die bereits im Unternehmen montiert werden. Anschließend erfolgt eine Hierarchisierung und Detaillierung der Montageschritte. Dabei werden die Montageschritte in Teilschritte unterteilt und in eine Reihenfolge gebracht. Auf Grundlage der spezifizierten Eigenschaften der Bauteilverbindungen werden geeignete Montageverfahren identifiziert. Da meist mehrere Verfahren zur Verfügung stehen, ergeben sich alternative Prozessketten. Bei Bedarf kann der Lösungsraum durch eine Bewertung und Auswahl der Prozessketten eingeschränkt werden. Die Auswahl der Montageverfahren hat einen großen Einfluss auf die Produktgestaltung sowie die Werkstoffwahl. Über Gestaltungsrichtlinien fließen die montagetechnischen Restriktionen in den weiteren Verlauf der Produktentwicklung ein.

Konzipierung des Montagesystems: In dieser Phase wird das Montagesystem konzipiert, d. h. die benötigten Ressourcen werden ausgewählt sowie deren Anordnung festgelegt. Das ist bereits in der frühen Phase erforderlich, da die spezifizierte Prozesskette auf Ebene der Montageverfahren zwar Aussagen zur Wechselwirkungen zwischen Pro-

dukt und Montage zulässt, detaillierte Analysen wie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen allerdings nur sehr eingeschränkt möglich sind und einer großen Unsicherheit unterliegen. Beispielsweise lässt sich das Laufrad eines Fahrrads manuell an einem Handarbeitsplatz oder in einer vollautomatisierten Montagezelle einspeichen. Die beiden Ressourcen unterscheiden sich maßgeblich in Eigenschaften wie den Investitionskosten oder der Ausbringungsmenge. Hinreichend genaue Analysen sind daher nur auf Basis von Ressourcen durchführbar. Aus diesem Grund werden für die Prozessschritte geeignete Ressourcen identifiziert. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit der einzelnen Ressourcen sowie der Anforderungen an das Montagesystem werden Ressourcenkombinationen ausgewählt und zu einer Ressourcenfolge verknüpft. Anschließend wird die räumliche Anordnung der Ressourcen festgelegt und ein Layout des Montagesystems erzeugt. Die Ressourcenfolge und das Layout bilden den Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung im Rahmen der Arbeitsstätten-, Materialfluss- und Arbeitsmittelplanung.

Detaillierung im iterativen Vorgehen: Bei dem beschriebenen Vorgehen handelt es sich um einen iterativen Prozess, auch wenn es in Bild 5-3 als stringente Folge von Arbeitsschritten dargestellt ist. Die Arbeitsschritte werden z. T. parallel und in enger Abstimmung mehrfach durchlaufen. Hierbei wird der Konkretisierungsgrad des Montagekonzepts kontinuierlich erhöht. Es kann dabei durchaus zu einem inhomogenen Konkretisierungsgrad innerhalb des Montagekonzepts kommen. Beispielsweise sind für manche Prozessschritte die Montageverfahren und konkreten Ressourcen festgelegt, da die Prozessfolge im Unternehmen bereits bekannt ist. Andere Teilbereiche sind hingegen lediglich grob auf Funktions- oder Verfahrensebene beschrieben und müssen noch konzipiert werden. Die Anzahl der erforderlichen Iterationsschleifen und die spezifische Reihenfolge, in der die Schritte durchlaufen werden, ist von der Produktkomplexität, der Arbeitsweise und Kompetenz der beteiligten Fachleute sowie weiteren Faktoren abhängig (z. B. Organisationsform im Unternehmen).

5.4 Bestandteile der Systematik

Die entwickelte Systematik dient als Rahmenwerk für das Vorgehen der Fachleute und stellt die benötigten Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Das Ziel ist nicht die Automatisierung der Montagekonzipierung. Die kreative Leistung der Fachleute wird unterstützt, kann und soll jedoch nicht ersetzt werden.

Ein Vorgehensmodell und dedizierte Hilfsmittel bilden die Bestandteile der Systematik. Das Vorgehensmodell beschreibt und strukturiert die durchzuführenden Tätigkeiten. Eine Spezifikationstechnik ermöglicht die fachdisziplinübergreifende Beschreibung des Produkt- und Produktionssystemkonzepts. Methoden und entsprechende Werkzeuge dienen als Hilfsmittel zur Lösung von Teilaufgaben im Rahmen der Montagekonzipierung. In Bild 5-4 sind die Bestandteile und ihr grundsätzliches Zusammenwirken dargestellt.

des Produktionssystemkonzepts nach GAUSEMEIER ET AL. ein (vgl. [GBR10, S. 715ff.], [GBD+12, S. 100f.], [NBG13, S. 619f.]).

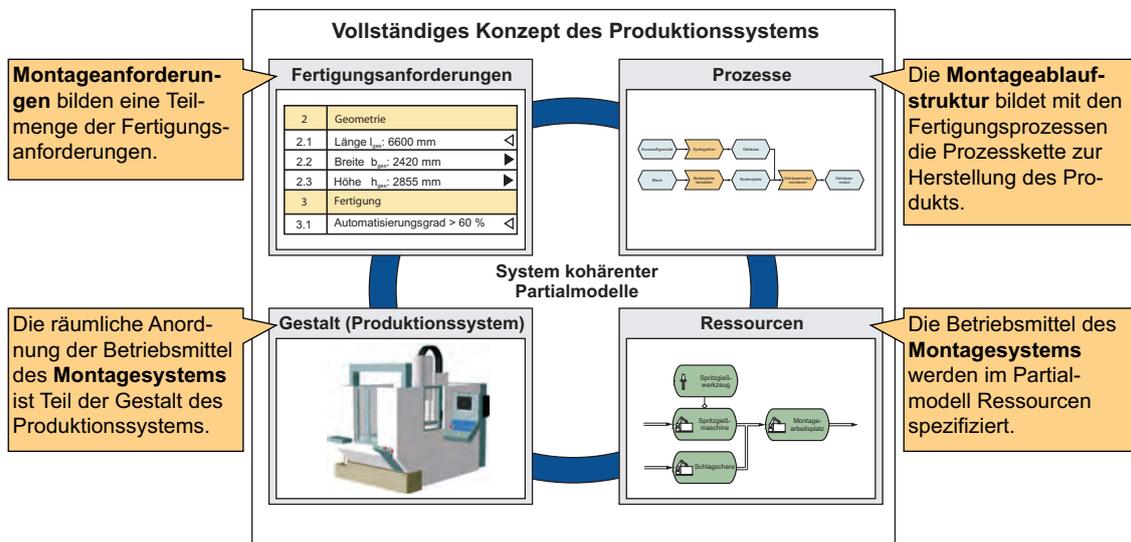


Bild 5-5: Das Montagekonzept als Teil der Partialmodelle zur Beschreibung des Produktionssystemkonzepts nach GAUSEMEIER ET AL. nach [GBR10, S. 716]

Die **Montageanforderungen** bilden eine Teilmenge der Fertigungsanforderungen und werden im gleichnamigen Partialmodell abgebildet. Die **Montageablaufstruktur** ist ein Teil des Arbeitsablaufs zur Herstellung des Produkts. Sie wird zusammen mit den Fertigungsprozessen im Partialmodell Prozesse beschrieben. Die Spezifikation des **Montagesystems** erfolgt zweigeteilt. Im Partialmodell Ressourcen werden die ausgewählten Betriebsmittel charakterisiert und ihre materialflusstechnische Verkettung abgebildet. Informationen zur räumlichen Anordnung und zur Geometrie der Ressourcen (z. B. Raumbedarf, Layout) sind Teil des Partialmodells Gestalt.

5.4.3 Methoden

Im Verlauf der integrativen Konzipierung der Montage sind von den beteiligten Fachleuten eine Reihe von Teilaufgaben zu lösen. Im Wesentlichen sind dies:

- Die montageorientierte Strukturierung des herzustellenden Produkts.
- Die Ableitung einer montageorientierten Erzeugnisgliederung.
- Die Spezifikation von Verbindungseigenschaften.
- Die Auswahl geeigneter Montageverfahren.
- Die Erstellung einer Montageablaufstruktur in Form einer Prozesskette.
- Die Auswahl der benötigten Ressourcen zur Realisierung des Montageablaufs.

Heute existiert bereits eine Vielzahl von Methoden, die spezifische Lösungen für die Teilaufgaben bereitstellen. Im Rahmen der Analyse des Stands der Technik wurden mögliche Methoden identifiziert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet (vgl. Kap. 3.7). Eine Integration in eine übergreifende Systematik für die integrative Montagekonzipierung ist bisher nicht erfolgt.

Die entwickelte Systematik stellt den Planern und Entwicklern die benötigten Methoden bedarfsgerecht zur Verfügung, indem sie den einzelnen Arbeitsschritten im Vorgehensmodell geeignete Methoden zur Lösung der jeweiligen Teilaufgabe zuordnet. Es wird hierbei auf etablierte Methoden zurückgegriffen. Ist dies nicht möglich, werden bestehende Methoden adaptiert und auf die Erfordernisse des jeweiligen Anwendungsfalls angepasst. In Kapitel 6 werden die Methoden anhand des Anwendungsbeispiels Pedelec detailliert beschrieben.

6 Anwendung der Systematik zur Konzipierung der Montage

In diesem Kapitel wird die entwickelte Systematik am Anwendungsbeispiel Pedelec vorgestellt. Der Aufbau des Kapitels orientiert sich am Vorgehen der Systematik (Bild 5-3). Im Rahmen der zugehörigen Arbeitsschritte wird der Einsatz der Spezifikationstechnik und der Methoden erläutert. Abschließend erfolgt die Bewertung der entwickelten Systematik gegen die gestellten Anforderungen aus Kapitel 2.8.

6.1 Konzipieren der Produktgestalt

Die Konzipierung der Produktgestalt erfolgt parallel zur Konzipierung der Wirkstruktur und des Verhaltens (vgl. Kap. 2.6.2, siehe Anhang Bild A-2). Das Ziel sind die Produktgestalt und die baulichen Zusammenhänge. Das Vorgehen gliedert sich in vier Schritte. Zunächst wird die Gestalt der Systembestandteile spezifiziert und deren räumliche Anordnung festgelegt. Anschließend werden montagerelevante Flussbeziehungen in der Wirkstruktur identifiziert sowie Bauzusammenhänge zwischen den Systembestandteilen formalisiert und konkretisiert. Das Vorgehen ist in Bild 6-1 dargestellt.

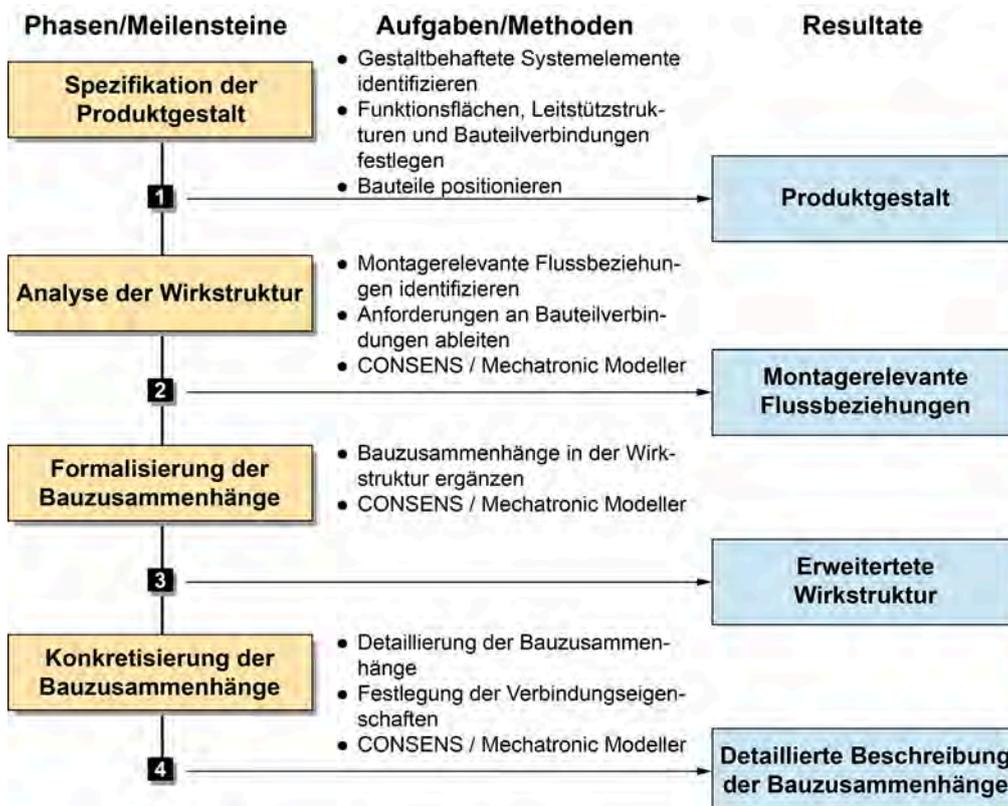


Bild 6-1: Vorgehen bei der Konzipierung der Produktgestalt

6.1.1 Spezifikation der Produktgestalt

Bereits in der Konzipierung werden erste Festlegungen zur Gestalt des Produkts getroffen [Fra06, S. 115f.]. Parallel zur Erstellung der Wirkstruktur erfolgen die Beschreibung der Geometrie gestaltbehafteter Systemelemente und die Positionierung dieser Elemente im Raum. Es entsteht eine erste Baustruktur [GFR+05, S. 35]. Gestaltbehaftete Systemelemente sind physisch vorhandene Elemente. Hierbei kann es sich um Bauteile und Baugruppen handeln. Beispiele für Systemelemente ohne Gestalt sind Komponenten der Software- und Regelungstechnik oder noch nicht weiter detaillierten Funktionsmodule.

In der Konzipierung ist für die Beschreibung der Gestalt die Spezifikationen von vier Aspekten erforderlich. Dies sind die Geometrie und räumliche Anordnung der Systembestandteile sowie ihre Aggregationsbeziehungen und Bauzusammenhänge:

- Bei der **Geometrie** der Systemelemente liegt der Fokus in der Konzipierung auf der Makrogeometrie, d. h. der Form und der Größe. Die Mikrogeometrie (Oberflächeneigenschaften) wird meist noch nicht definiert.
- Die **räumliche Anordnung** beschreibt die Positionierung der Systembestandteile zueinander bzw. im Raum.
- **Aggregationsbeziehungen** beschreiben die Zusammenfassung von Systembestandteilen zu Gruppen höherer Ordnung. Die Aggregation kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen, bspw. funktional oder montageorientiert.
- Als **Bauzusammenhänge** werden die Verbindungen zwischen Systembestandteilen bezeichnet. Beispiele sind Fügstellen oder Kontaktpunkte.

Die Beschreibung der Gestalt erfolgt im gleichnamigen Partialmodell (vgl. Kap. 2.6.1 und [Fra06, S. 115f.]). Das Partialmodell Gestalt impliziert somit die Baustruktur¹. Den Ausgangspunkt für die Gestaltbeschreibung bildet die erste Wirkstruktur. Der Verweis auf die Gestalt eines Systemelements wird durch ein Piktogramm im entsprechenden Systemelement gekennzeichnet [Fra06, S. 98]. Bild 6-2 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Partialmodellen Wirkstruktur und Gestalt.

¹ Die Baustruktur beschreibt die räumliche Anordnung der physischen Systembestandteile sowie ihre Aggregation zu Baugruppen [GRS09, S. 173]. Die Entitäten der Baustruktur sind Bauteile, Baugruppen sowie ihre Bauzusammenhänge (vgl. [FGK+04, S. 56]).

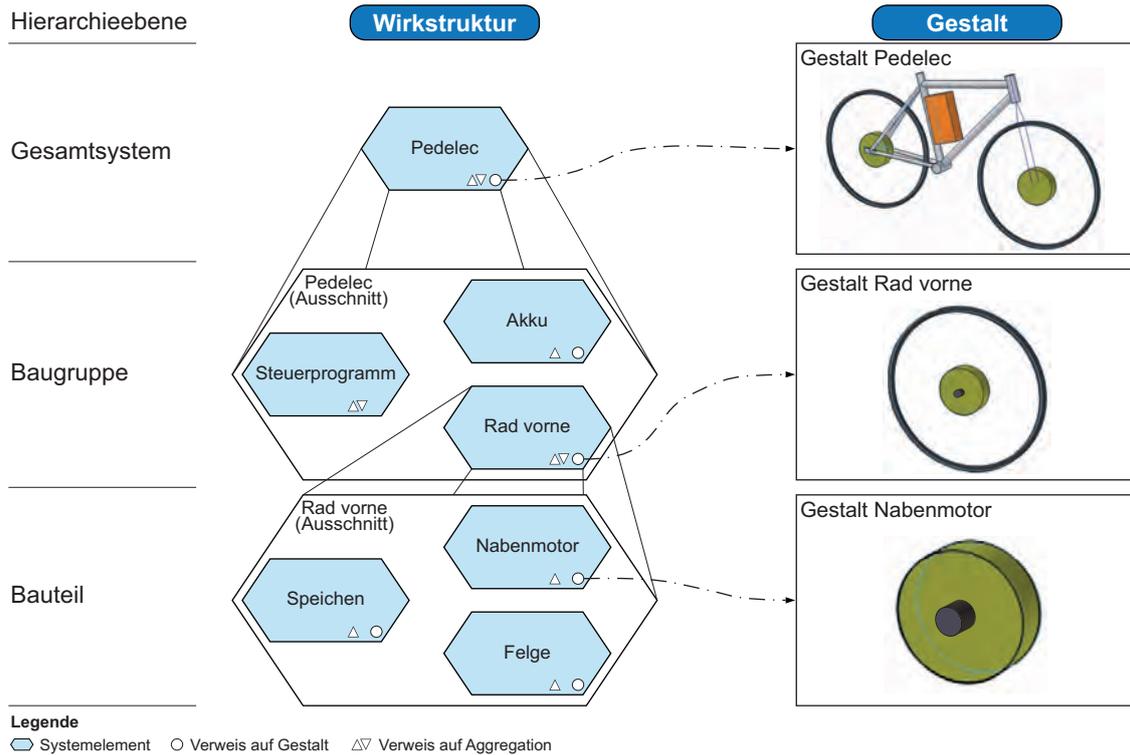


Bild 6-2: Zusammenhang zwischen den Partialmodellen Wirkstruktur und Gestalt (Flussbeziehungen sind zur besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellt)

Gestaltbehaftete Systemelemente auf der niedrigsten Hierarchieebene der Wirkstruktur, sogenannte Blätter², werden im Folgenden als **Bauteile** bezeichnet (vgl. [FGK+04, S. 56]). Es muss sich hierbei nicht um Einzelteile³ handeln. Bauteile können auch aus mehreren Einzelteilen bestehen, die in der aktuellen Phase des Entwicklungsprozesses als Einheit betrachtet werden. Ein Beispiel ist der Motor. Dieser wird als Zukaufteil bezogen und in der Konzipierung als zusammenhängendes Bauteil betrachtet. Die Beschreibung der Gestalt eines Bauteils umfasst Angaben zur Geometrie und zum Werkstoff. Weiterhin werden die Wirkflächen des Bauteils spezifiziert. Die Bauteilgestalt entspricht den Part-Modellen⁴ in gängigen 3D-CAD-Programmen.

Als **Baugruppen** werden gestaltbehaftete Systemelemente bezeichnet, die sich aus mehreren Systemelementen einer niedrigeren Hierarchieebene zusammensetzen. Sie bilden Knoten in der Hierarchie der Wirkstruktur. Die Bestandteile einer Baugruppe bilden nicht zwangsläufig eine Montageeinheit. Es kann sich auch um Gruppen handeln, die bspw. unter funktionsorientierten, baukastenorientierten oder ersatzteilorientierten

² In der Graphentheorie werden bei gerichteten Bäumen die Knoten der untersten Hierarchieebene als Blätter bezeichnet. Der zentrale Knoten des Graphens bildet die Wurzel [Die06, S. 15].

³ Als Einzelteil wird ein geometrisch bestimmter Körper bezeichnet, der sich nicht zerstörungsfrei trennen lässt [Ref93b, S. 68].

⁴ Als Part werden 3D-Elemente auf Bauteilebene bezeichnet [Bra05, S. 533].

Gesichtspunkten gebildet wurden [Gai81, S. 22]. Das Gestaltmodell einer Baugruppe beschreibt die Bauzusammenhänge und die räumliche Anordnung der enthaltenen Elemente. Die Geometrie der Baugruppe ergibt sich aus der Summe der enthaltenen Einzelgestalten. Diese kann als Hüllvolumen beschrieben werden und folgt dem Konzept der Bauräume⁵. In gängigen 3D-CAD-Systemen entsprechen Baugruppen den Assembly-Modellen⁶.

Das **Gesamtsystem** ist das zu entwickelnde Produkt. Es bildet in der Hierarchie der Wirkstruktur die Wurzel. Die Gestalt des Gesamtsystems ergibt sich analog zu der Gestalt einer Baugruppe als die Summe der Gestaltmodelle der enthaltenen Elemente.

Bauliche Verbindungen, sog. **Bauzusammenhänge**, können nur zwischen Bauteilen bestehen. Verbindungen zu Baugruppen müssen immer auf ein Bauteil innerhalb der Baugruppe referenzieren. Direkte Verbindungen zu Baugruppen sind nicht möglich, da diese lediglich eine Gruppierung und kein physisches Teil darstellen. Bauzusammenhänge werden durch Verbindungseigenschaften konkretisiert (z. B. Lösbarkeit der Verbindung oder Art des Zusammenhalts).

In der Konzipierung erfolgt im Zuge der Detaillierung und Konkretisierung häufig eine **Dekomposition** von Systemelementen. Hierbei werden die Bestandteile eines Systemelements spezifiziert. In der Hierarchie der Wirkstruktur wird das Systemelement somit von einem Bauteil (Blatt) zu einer Baugruppe (Knoten). Wurde die Geometrie des Bauteils bereits spezifiziert, beschreibt diese das Hüllvolumen der Baugruppe und kennzeichnet somit den zur Verfügung stehenden Bauraum für die Bauteile. Bestehende Bauzusammenhänge sind zu konkretisieren und auf die neuen Bestandteile der Baugruppe zu referenzieren.

Die **Modellierung** der Gestalt kann in Form von Handskizzen, 2D-Skizzen mit gebräuchlichen COTS⁷-Modellierungswerkzeugen (z. B. Microsoft Visio, Power Point) oder 3D-CAD-Systemen erfolgen. CAD-Systeme fordern bei der Modellierung sofort ein hohes Maß an genauer Gestaltfestlegung. Sie sind daher für die frühe Phase nur eingeschränkt geeignet [VDI2223, S. 22f.]. Die 3D-Modellierung sollte erst mit dem Übergang von der Konzept- in die Entwurfsphase beginnen [VDI2209, S. 3]. In der Konzipierung sind Handskizzen und 2D-Skizzen die bevorzugten Mittel zur Beschreibung der

⁵ Als Bauraum wird ein begrenzter Raum bezeichnet, in den ein Bauteil bzw. mehrere Bauteile einzu-
passen sind. Das Konzept der Bauräume wird insb. bei komplexen Produkten mit einer (zeit)parallelen
Bauteilgestaltung eingesetzt [VWB+09, S. 210].

⁶ Als Assembly werden Baugruppen aus mehreren Bauteilen (Parts) und/oder weiteren Baugruppen
bezeichnet. Im Assembly-Modell werden die Bestandteile positioniert. Dies erfolgt über die Ausrich-
tung der lokalen Koordinatensysteme oder über die Definition von Lagebedingungen, sogenannten
Constraints [Bra05, S. 448].

⁷ COTS (Commercial of the Shelf): In Serie gefertigte Elektronik- oder Softwareprodukte ohne kunden-
spezifische Anpassungen. Ein Beispiel ist Standardsoftware, wie die Microsoft Office Produkte.

Gestalt [Sed10, S. 74], [PL11, S. 144], [Eng12, S. 195]. Im Verlauf der Entwicklung können die Handskizzen zu 3D-CAD-Modellen konkretisiert werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Ansatz orientiert sich an dem Contact and Channel Model (vgl. Kap. 3.2.3). Die Beschreibung der Gestalt erfolgt primär in Form von Handskizzen sowie maßstäblicher 2D-Skizzen. Für die Erstellung der 2D-Skizzen kommen gängige Visualisierungsprogramme zum Einsatz (z. B. Microsoft Visio).

Der Ansatz wird im Folgenden am Beispiel der frühzeitigen Gestaltung von Bauteilen und Baugruppen beschrieben. Zunächst wird die Spezifikation der Gestalt einzelner Bauteile erläutert. Anschließend folgt die Modellierung der Aggregation von Bauteilen zu Baugruppen bzw. dem Gesamtsystem. Die beiden Schritte sind nicht trennscharf und von einer Vielzahl an Iterationen geprägt. Bei der Gestaltung der Baugruppen, d. h. bei der Festlegung der räumlichen Anordnung und der Spezifikation der baulichen Zusammenhänge, kommt es in der Regel zu einer Anpassung der Gestalt einzelner Bauteile. Häufig ist es sinnvoll, die Gestalt einzelner Bauteile direkt im Kontext der übergeordneten Baugruppe zu konzipieren.

6.1.1.1 Gestaltung von Bauteilen

Im Folgenden wird die Beschreibung der Gestalt am Beispiel des Systemelements Rahmen mittels 2D-Skizzen gezeigt (Bild 6-3). Hierbei gibt es zwei Gestaltungselemente: Wirkflächen und Leitstützstrukturen (vgl. Kap. 3.2.3).

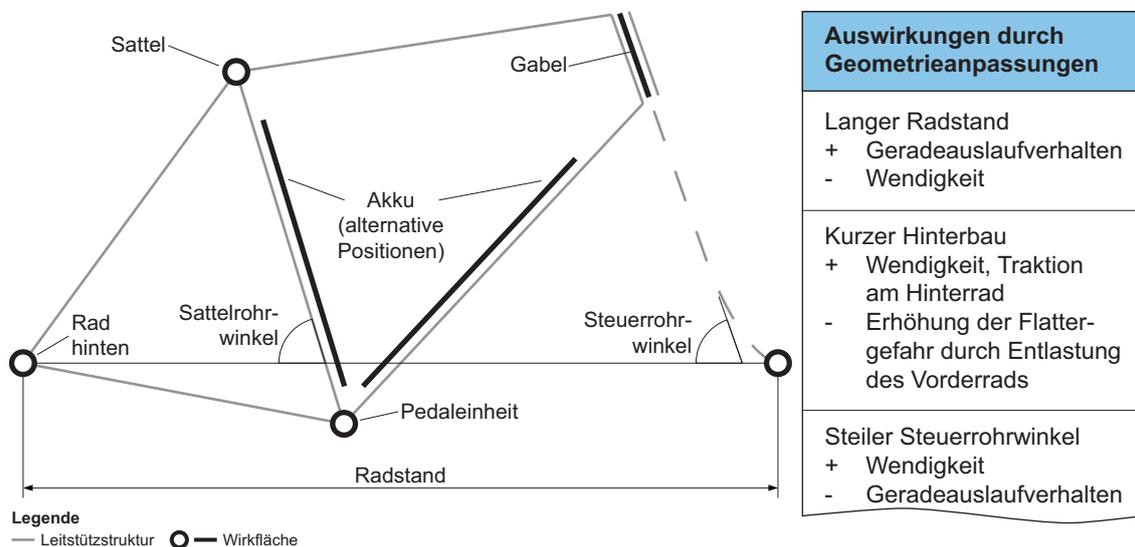


Bild 6-3: Gestalt des Systemelements Rahmen als 2D-Skizze

Die Wirkflächen des Rahmens sind bereits festgelegt. Dies sind die Aufnahmen für den Sattel und die Gabel sowie das Hinterrad und die Pedaleinheit. Für die Anbindung des Akkus gibt es zwei alternative Positionen. Der Akku kann sowohl am Sitzrohr als auch am Unterrohr befestigt werden. Die Leitstützstruktur bildet das eigentliche Bauteil Rahmen und verbindet die Wirkflächen miteinander. Im gezeigten Beispiel sind erst die

Rahmenform (Diamantrahmen) und die grundsätzlichen Abmessungen festgelegt. Diese haben einen großen Einfluss auf das spätere Fahrverhalten des Pedelecs. Zum Beispiel bestimmen der Radstand und der Vorlauf das Fahrverhalten bzgl. Geradeauslauf und Kurvenfahrt sowie die erforderlichen Lenkkräfte.

Handelt es sich bei Systemelementen um bereits etablierte Lösungen (Lösungselemente), können bestehende Modelle direkt übernommen werden. Beispiele sind Zukauf- und Normteile oder in vorangegangenen Projekten entwickelte Bauteile und Baugruppen. Für diese liegen in der Regel detaillierte Gestaltinformationen vor, z. B. in Form von 3D-CAD-Modellen, Fertigungszeichnungen oder Abmessungen aus Katalogen. Im Fall des Anwendungsbeispiels Pedelec könnte ein Nabenmotor zugekauft werden. Für das Kaufteil liegen die Geometriedaten vor (Bild 6-4 links).

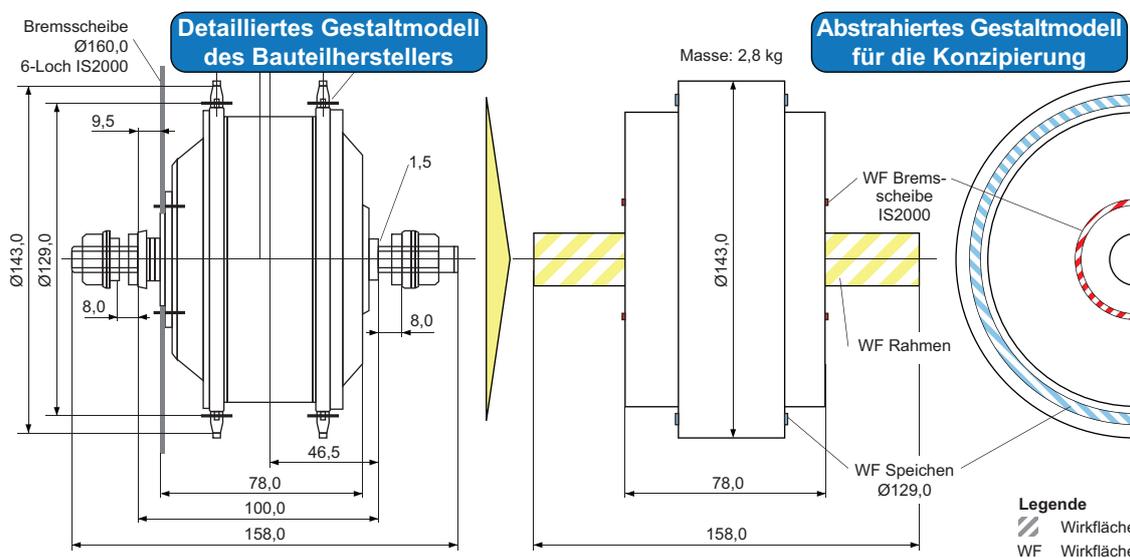


Bild 6-4: Modell eines Kaufteils und abstrahiertes Ersatzmodell der Konzipierung⁸

In der Konzipierung wird dieser Detaillierungsgrad jedoch nicht benötigt. Daher kann ein Ersatzmodell des Nabenmotors verwendet werden (Bild 6-4 rechts). Dieses enthält die relevanten Abmessungen und die Beschreibung der Wirkflächen des Bauteils. Im Fall des Nabenmotors sind Durchmesser, Breite und Masse spezifiziert. Die Welle und die Anbindung der Speichen und der Bremsscheibe sind als Wirkflächen des Bauteils festgelegt.

6.1.1.2 Gestaltung von Baugruppen

Das Ziel dieser Phase ist die Gestalt der Baugruppen. Das Vorgehen gilt gleichermaßen für die Gestaltung des Gesamtsystems. Die Gestalt einer Baugruppe ergibt sich aus der Kombination aller enthaltenen Bauteile indem die Gestaltmodelle der enthaltenen Bau-

⁸ Technische Zeichnung links nach [AG13-ol].

teile in einer Skizze der Baugruppe zusammengeführt werden. Dabei sind ihre räumliche Anordnung und somit ihre Position zueinander festzulegen. Der Kontakt zweier Bauteile erfolgt immer über zwei Wirkflächen, die ein Wirkflächenpaar bilden. Ergeben sich neue Kontaktstellen zwischen Bauteilen bzw. ändern sich bestehende Kontaktstellen sind die Gestaltmodelle der entsprechenden Bauteile anzupassen. Liegt für ein Bauteil noch kein Gestaltmodell vor, kann dieses im Kontext der Baugruppe erstellt werden. Hierfür werden die Wirkflächen des Bauteils spezifiziert und eine grobe Leitstützstruktur festgelegt. Somit wird der Bauraum definiert, in dem das Bauteil im weiteren Verlauf ausgestaltet wird. Bild 6-5 zeigt die Gestalt des Gesamtsystems Pedelec.

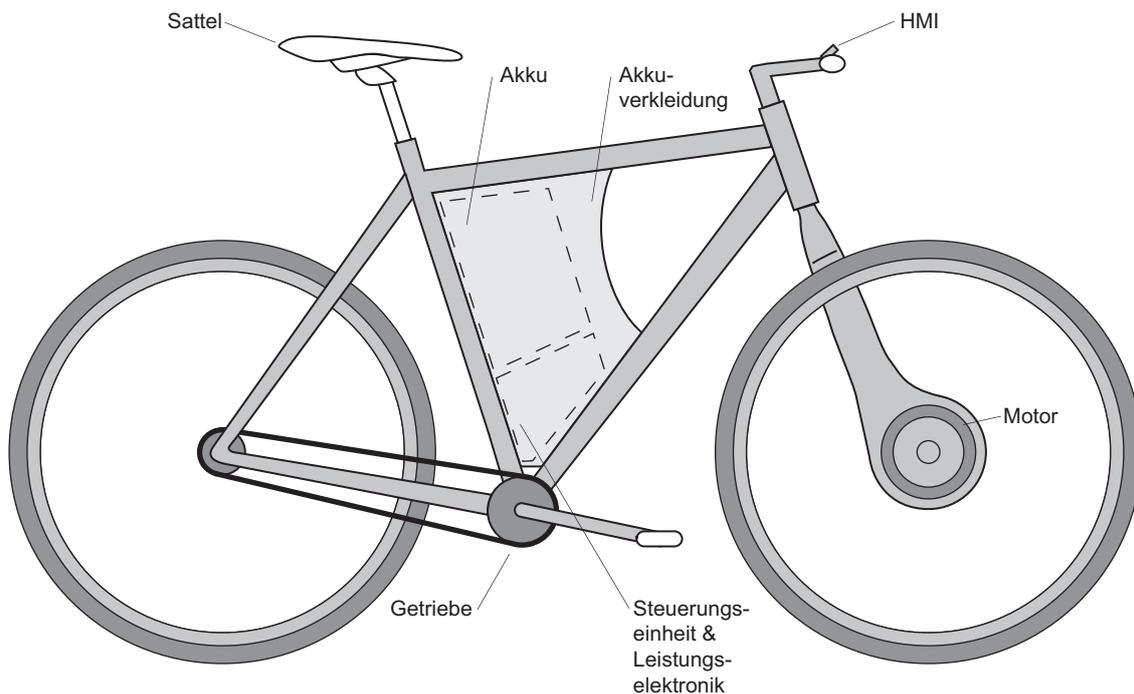


Bild 6-5: Gestalt des Gesamtsystems Pedelec

Im vorliegenden Entwicklungsstadium sind noch nicht für alle Systemelemente Gestaltmodelle festgelegt. Das zentrale Element bildet der *Rahmen*. Entsprechend der Wirkflächen ist er mit dem *Rad hinten*, der *Gabel*, dem *Sattel* der *Tretkurbelwelle* und dem *Akku* verbunden. Die Gestalt des *Akkus* ist noch nicht definiert. Die erforderliche Größe ergibt sich auf Grundlage der Leistungsdichte der Akkutechnologie und der geforderten Reichweite des Pedelecs. Sie wurde in der Konzipierung mit 1.700 ccm festgesetzt. Im Rahmen des Gesamtsystems wird der verfügbare Bauraum (Länge – Breite – Höhe) für den *Akku* festgelegt.

6.1.2 Analyse der Wirkstruktur

Die Wirkstruktur bildet das zentrale Element der Prinziplösung eines mechatronischen Systems. Das System wird in Form von Systemelementen modelliert. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse spezifizieren die Beziehungen zwischen den Elementen (vgl.

Kap. 2.6.1). Die Wirkstruktur enthält eine Vielzahl an Informationen, die für die montageorientierte Produktstrukturierung von Relevanz sind.

Montagerelevante Informationen ergeben sich aus den Energie- und Stoffflüssen. Zum Beispiel lässt die Übertragung von mechanischen Kräften und Momenten auf eine erforderliche Verbindung zwischen den Bauteilen schließen. Es ist zu überprüfen, ob diese Verbindungen im Partialmodell Gestalt spezifiziert sind. Aus der Übertragung von elektrischer Energie (z. B. Versorgungsenergie) kann auf eine notwendige Verkabelung geschlossen werden. Stoffflüsse geben Hinweise auf Führungssysteme, bspw. Kraftstoffleitungen. Aus den Eigenschaften der Flussbeziehungen resultieren Anforderungen an die Bauteilverbindungen. Beispiele sind zu übertragende Kräfte, Stoßbelastungen, zu realisierende elektrische Ströme oder die Dichtigkeit von Verbindungen. Bild 6-6 zeigt einen Ausschnitt der Wirkstruktur des Pedelec. Diese Sicht der Wirkstruktur ist auf die gestaltbehafteten Systemelemente reduziert.

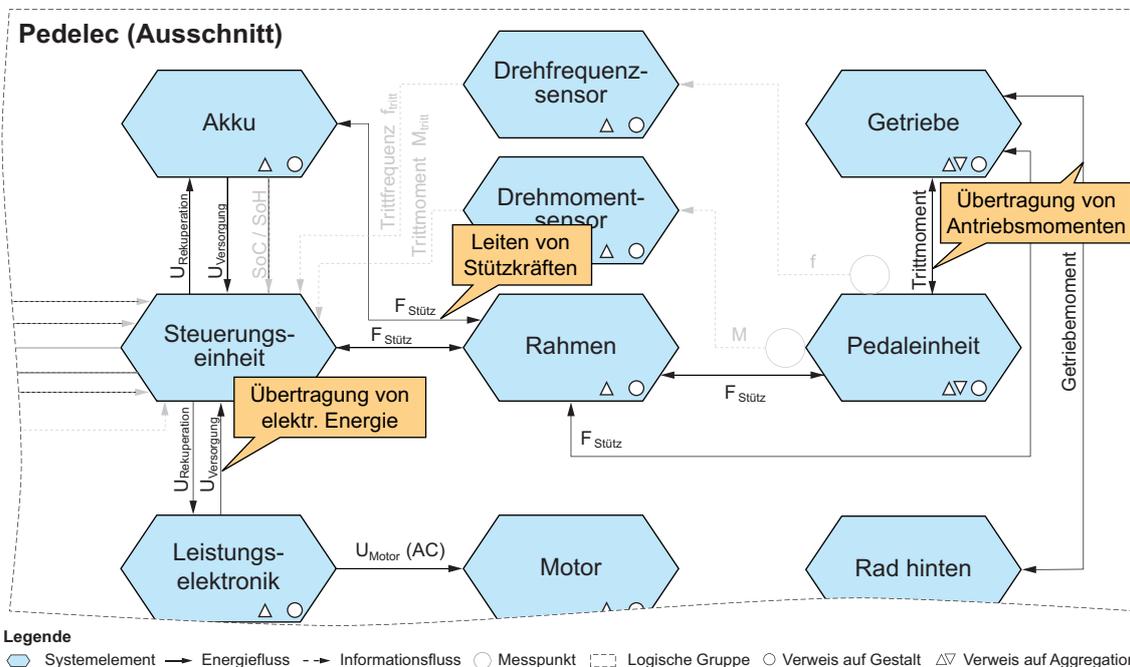


Bild 6-6: Identifikation montagerelevanter Informationen in der Wirkstruktur des Pedelecs (Ausschnitt)

Im Anwendungsbeispiel Pedelec werden Kräfte und Momente zwischen den Antriebskomponenten übertragen, bspw. von der *Pedaleinheit* über das *Getriebe* zum *Rad hinten*. Der Austausch von elektrischer Energie erfolgt bspw. zwischen dem *Akku*, der *Steuerungseinheit* und der *Leistungselektronik*. Im Mechatronic Modeller können Sichten auf die montagerelevanten Informationen gebildet werden (siehe Anhang Bild A-14). Hierzu sind bei der Erstellung der Wirkstruktur die Flussbeziehungen zu klassifizieren. Die im Kontext der Montagekonzipierung relevanten Verbindungstypen sind Kraft, Moment und Versorgungsenergie (vgl. [GBD+12, S. 119]).

6.1.3 Formalisierung der Bauzusammenhänge

Bei dem vorgestellten Ansatz der Gestaltmodellierung handelt es sich um eine semiformale Spezifikation. Über die 2D-Skizzen mit definierten Wirkflächen und Leitstützstrukturen erhalten die beteiligten Fachleute schnell ein umfassendes Verständnis über die Gestalt des zu entwickelnden Systems und die baulichen Zusammenhänge. Die komplexen Zusammenhänge zwischen der Gestalt und der Wirkungsweise des Systems können so schnell und einfach vermittelt werden [GEK01, S. 307].

Der Nachteil einer solchen Beschreibung liegt in der fehlenden IT-technischen Lesbarkeit⁹. Die Informationen aus dem Gestaltmodell können nicht automatisiert ausgelesen und weiterverarbeitet werden. Demgegenüber werden die mit dem Mechatronic Modeller erstellten Konzepte rechnerintern als zusammenhängendes formales Datenmodell abgebildet. Diese ermöglicht die Sicherstellung syntaktisch korrekter Modelle und die werkzeugtechnische Unterstützung der Entwicklungsaktivitäten [GBD+12, S. 107f.].

Für eine maschinenlesbare Abbildung der Bauzusammenhänge ist die formale Beschreibung der Bauteilverbindungen erforderlich. Jedes Wirkflächenpaar entspricht einer Verbindung oder einem Kontakt zwischen zwei Bauteilen und stellt somit einen Bauzusammenhang dar (vgl. [VDI2232, S. 4]). Die rechnerinterne Abbildung der Bauzusammenhänge erfolgt im Partialmodell Wirkstruktur über gleichnamige Flussbeziehungen. Bild 6-7 zeigt eine gestaltorientierte Sicht auf die Wirkstruktur, wobei nur die gestaltbehafteten Systemelemente und ihre Bauzusammenhänge dargestellt sind.

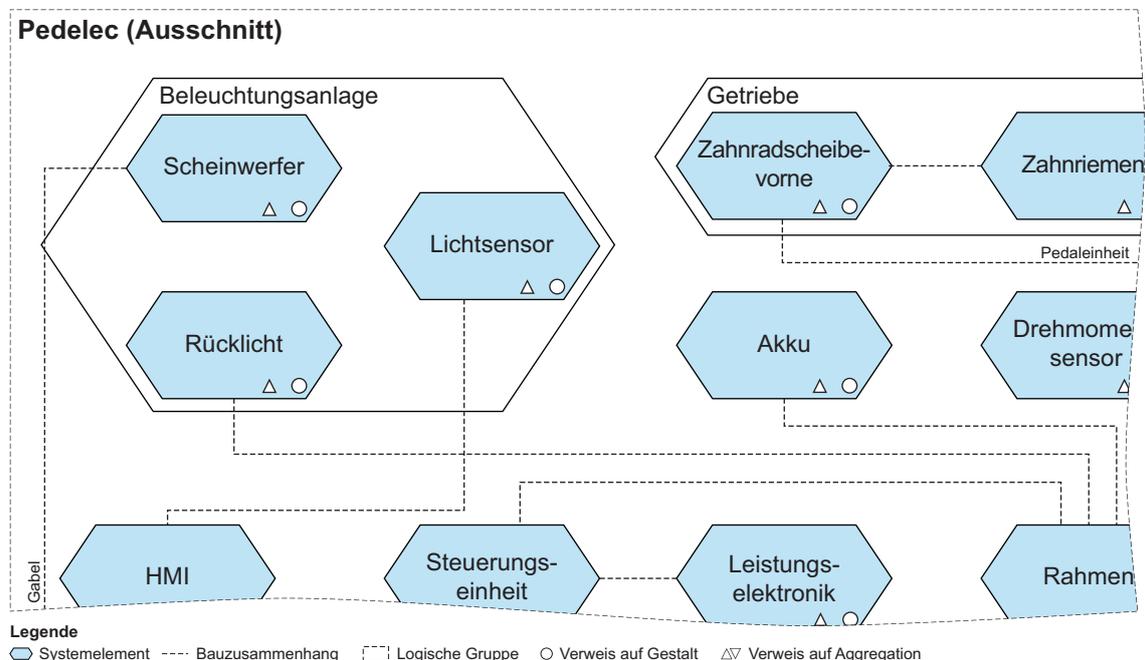


Bild 6-7: Gestaltorientierte Sicht auf die Wirkstruktur des Pedelecs (Ausschnitt)

⁹ Wird die Gestalt von Beginn an mit Hilfe von 3D-CAD- und PDM-Systemen erstellt, ist die Formalisierung nicht erforderlich und der Schritt wird übersprungen.

Im gezeigte Beispiel wird deutlich, dass die Wirkstruktur in der Regel nach funktionalen Gesichtspunkten hierarchisiert ist. Die Systemelemente sind entsprechend ihrer Funktionen in Baugruppen strukturiert. Diese entsprechen nicht den späteren Baugruppen im Montageprozess. Teilweise besitzen die Bauteile innerhalb einer Baugruppe keine Bauzusammenhänge. Ein Beispiel ist die Baugruppe *Beleuchtungsanlage*, deren Bauteile der Funktion *Fahrweg ausleuchten* zugeordnet sind, welche allerdings untereinander keine baulichen Verbindungen aufweisen. Der Grund für diese funktionsorientierte Hierarchie liegt im prinzipiellen Vorgehen der Produktkonzipierung (vgl. Kap. 2.6.2). Zunächst werden die Funktionen des zu entwickelnden Produkts beschrieben und in einer Funktionshierarchie strukturiert (Partialmodell Funktionen). Anschließend werden geeignete Lösungen zur Erfüllung der Funktionen gesucht. Diese werden in der Wirkstruktur als Systemelemente modelliert. Im Verlauf der Konzipierung werden die Systemelemente weiter dekomponiert und konkretisiert.

6.1.4 Konkretisierung der Bauzusammenhänge

Im Rahmen der Spezifikation der Gestalt wurden die baulichen Zusammenhänge zwischen den Bauteilen des Systems festgelegt. In dieser Phase werden die spezifizierten Bauzusammenhänge konkretisiert. Es werden drei Typen von Bauzusammenhängen unterschieden:

- **Verbindungsbeziehungen** kennzeichnen einen Zusammenschluss fester Körper, welcher auch unter Betriebsbedingungen bestehen bleibt. Verbindungen können Relativbewegungen der Körper erlauben oder verhindern [Rot96, S. 14], [VDI2232, S. 2]. Beispiele sind Schweißverbindungen zwischen Rahmenbauteilen oder die drehbar gelagerte Verbindung von Rahmen und Gabel.
- **Kontaktbeziehungen** beschreiben die lose Berührung zwischen Bauteilen. Diese bilden keine Verbindung und bleiben unter Betriebsbedingungen i. d. R. nicht bestehen. Beispiele sind Anschläge zwischen Bauteilen.
- **Positionsbeziehungen** stellen Abhängigkeiten in der räumlichen Ausrichtung zwischen Bauteilen dar. Ein Beispiel ist die Positionierung des Drehimpulssensors und des Signalgebers auf der Welle. Zur korrekten Übertragung der Tretfrequenz dürfen die beiden Bauteile radial eine Versatz von 15 mm nicht überschreiten, axial ist ein Bauteilabstand von 5–10 mm einzuhalten.

Die Bauzusammenhänge und ihre Eigenschaften bilden die Grundlage für die montageorientierte Strukturierung des Produkts (vgl. Kap. 6.3). Für jede Verbindungsbeziehung ist ein Set von Basiseigenschaften festzulegen¹⁰. Die Auswahl dieser Basiseigenschaften orientiert sich an der Struktur von Konstruktionskatalogen. Der Verbindungstyp und die primäre Schlussart entsprechen der Strukturierung von Verbindungen in der VDI-

¹⁰ Vgl. hierzu auch [Rot96, S. 106ff.], [VDI2232, S. 3], [Ehr09, S. 449ff.]

Richtlinie 2232 [VDI2232, S. 3] (siehe Anhang Bild A-15). Weitere Basiseigenschaften sind die Lösbarkeit der Verbindung [KHR12, S. 91], [DIN8593-0, S. 4] sowie die Art der Verbindung und die Zugänglichkeit der Verbindungstelle [Rot82, S. 190]. Die möglichen Ausprägungen der Verbindungseigenschaften sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Verbindungseigenschaften und mögliche Ausprägungen

		Ausprägungen		
Verbindungseigenschaften	Verbindungstyp	starr	beweglich	-
	Primäre Schlussart	Stoffschluss	Formschluss	Kraftschluss
	Lösbarkeit	lösbar	unlösbar	-
	Art der Verbindung (Verbindungsmittel)	mittelbar	unmittelbar	-
	Zugänglichkeit	einseitig	beidseitig	-

Die Bauzusammenhänge können durch zusätzliche Eigenschaften charakterisiert werden. Beispiele sind der Einsatz von Standardwerkzeugen oder die benötigte Kraft zur Herstellung der Verbindung. Weiterhin werden die Eigenschaften der montageorientierten Flussbeziehungen aus der Wirkstruktur ergänzt, bspw. das Abstützen bzw. Leiten von Drehmomenten und Kräften (vgl. Kap. 6.1.2). Bild 6-8 zeigt die Spezifikation einer Verbindungsbeziehung am Beispiel der Verbindung zwischen dem Motor und dem Lagersitz der Gabel.

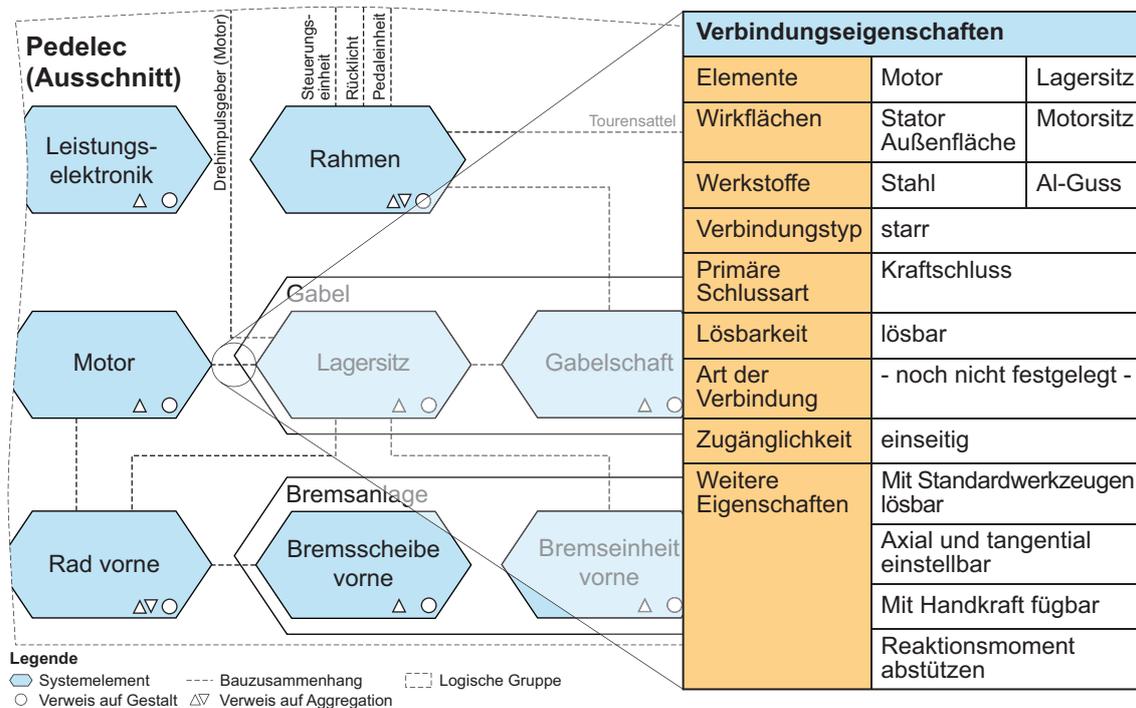


Bild 6-8: Spezifikation von Verbindungseigenschaften

Die Beschreibung umfasst die betroffenen Systemelemente und wenn bereits festgelegt, die entsprechenden Wirkflächen sowie die Materialpaarung der Verbindung. Weiterhin sind die Basiseigenschaften der Verbindung und weitere Eigenschaften spezifiziert.

Auf Grundlage der spezifizierten Verbindungsbeziehungen erfolgt die montageorientierte Strukturierung des Produkts (vgl. Kap. 6.3). Die Kontakt- und Positionsbeziehungen enthalten zusätzliche Informationen, auf deren Basis der Planer die montageorientierte Produktstruktur konkretisiert. Weiterhin wählt der Planer auf Grundlage der Verbindungseigenschaften mögliche Montageverfahren aus (vgl. Kap. 6.4.4).

6.2 Planen und Klären der Montageaufgabe

Das Ziel dieser Phase sind die Anforderungen an das Montagekonzept und die grundsätzliche Montagemethode. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Produkthanforderungen hinsichtlich ihrer Montagerrelevanz analysiert. Anschließend werden weitere montagespezifische Anforderungen ergänzt, bspw. aus der strategischen Produktionsplanung und abschließend die grundsätzliche Montagemethode festgelegt (Bild 6-9).

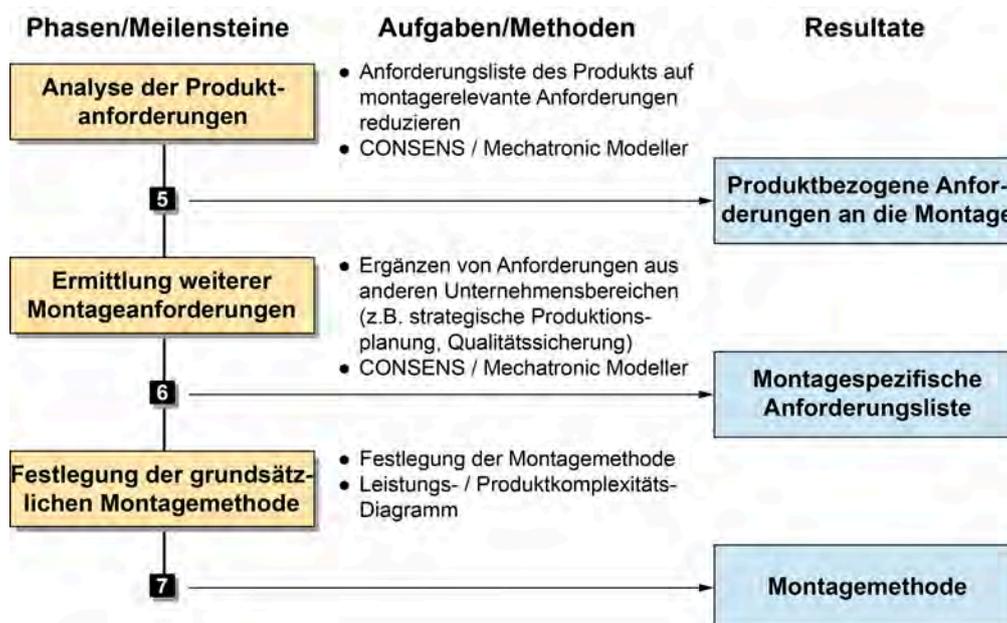


Bild 6-9: Vorgehen bei dem Planen und Klären der Aufgabenstellung

6.2.1 Analyse der Produkthanforderungen

Den Ausgangspunkt bildet die Anforderungsliste des Pedelecs. Diese wird auf die montagerelevanten Anforderungen reduziert. Beispiele für solche Anforderungen sind Angaben zur Stück- und Variantenzahl, geometrische Eigenschaften und einzusetzende Werkstoffe. Ein Auszug der reduzierten Anforderungsliste des Pedelecs ist in Bild 6-10 zu sehen.

Stand: 4. Mai 2013 ersetzt:				Anforderungsliste (Montage) Pedelec		Blatt 1	Seite 1
Änderung	F/W		Anforderungen	Verantw.	Bemerkungen		
		1	Geometrie				
26.06	F	1.1	Radgrößen: 28 Zoll	A. S.			
	F	1.2	Rahmengrößen: 48, 52, 56 cm				
	F	1.3	Max. Masse: 20 kg bei 28" / 52 cm				
	F				
		2	Kinematik				
	F	2.1	Elektr. Tretunterstützung vorsehen				
	F	2.2	Nenndauerleistung: 250 W				
	F	2.3	Drehmoment: > 40 Nm				
	F	2.4	Leistung Akku: 300 - 350 Wh				
	F	2.5	Reichweite: Stadtfahrt: 60 km / Touren: 100 km				
					
		8	Fertigung / Montage				
	F	8.1	Stückzahl pro Jahr: 5.000 Stk.				
26.07	F	8.2	Montage erfolgt intern	A. B.			
	W	8.3	Integration der Rahmenfertigung in die bestehende Rahmenfertigung				
					
	F	8.7	Montage ohne Spezialwerkzeuge				

Bild 6-10: Auszug der reduzierten Anforderungsliste des Pedelegs

Die Rad- und Rahmengröße sowie die maximale Masse geben Hinweise auf die Abmessungen der entsprechenden Bauteile. Diese sind bspw. für die Handhabungstechnik relevant. Weiterhin kann auf die Anzahl der Varianten geschlossen werden. Weitere Anforderungen sind die erwarteten Stückzahlen und die Montage im Unternehmen.

Im Anwendungsfall des Pedelegs wurden die Anforderungen direkt im Mechatronic Modeller spezifiziert. Sie sind mittels Funktionen mit den Systemelementen des Pedelegs verknüpft. Auf dieser Weise können die für ein Systemelement relevanten Anforderungen direkt identifiziert werden (vgl. [GBD+12, S. 114]).

6.2.2 Ermittlung weiterer Montageanforderungen

Die vorliegende Anforderungsliste wird um weitere montagespezifische Anforderungen ergänzt, die in der bisherigen Produktentwicklung noch nicht beachtet wurden. Hierzu werden Informationen aus Unternehmensbereichen bzw. Fachabteilungen beschafft, die einen Einfluss auf das spätere Montagesystem haben (vgl. [PL11, S. 234]). Bild 6-11 zeigt beispielhaft das Umfeld des Montagesystems und mögliche Einflüsse.

Aus der strategischen Produktionsplanung können sich Anforderungen hinsichtlich einzusetzender Technologien, Kapazitätsplanungen, Integration in bestehende Fertigungslinien oder potentieller Verlagerungen ergeben. Beispiele für Anforderungen aus der Qualitätssicherung sind Ausschussmengen und Toleranzvorgaben. Aus den baulichen Gegebenheiten können sich Anforderungen wie Flächenverfügbarkeit oder die maximal zulässige Bodenlast ergeben. Die Forderungen werden nach Möglichkeit quantifiziert, in Anforderungen übersetzt und in der montagespezifischen Anforderungsliste dokumentiert.

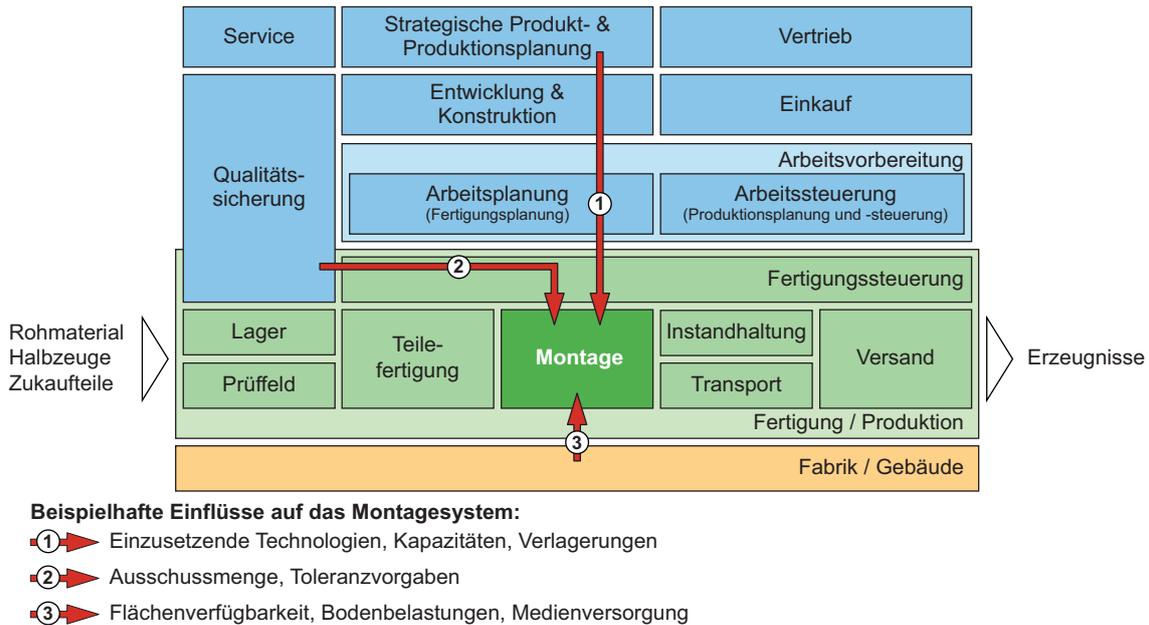


Bild 6-11: Einflüsse auf das Montagesystem in einem Industrieunternehmen

Hinweise und Hilfsmittel zur Identifikation von Anforderungen werden von GAIROLA [Gai81] und BÄSSLER [Bäß87] beschrieben. Eine Übersicht der wesentlichen Faktoren für die Bestimmung der montagerelevanten Anforderungen nach PAHL/BEITZ und ROTH ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Anhang Tabelle A-4).

6.2.3 Festlegung der grundsätzlichen Montagemethode

Bei der Entwicklung von Montagesystemen spielt der Automatisierungsgrad eine zentrale Rolle. Zum einen hat er einen großen Einfluss auf die einsetzbaren Montagetechnologien, insb. die Füge- und Handhabungstechnologien, andererseits übt der Automatisierungsgrad einen großen Einfluss auf die Produktgestaltung aus, bspw. auf die Festlegung der Produkttoleranzen [PL11, S. 234]. Bereits frühzeitig ist daher die Montagemethode festzulegen. Die Haupteinflussfaktoren sind die erforderlichen Investitionen für das Montagesystem, dessen Flexibilität und die Losgrößen bzw. Stückzahlen des herzustellenden Produkts [LS94, S. 253], [Lot06a, S. 3].

Aufgrund der fehlenden bzw. unscharfen Informationen in der Konzipierung ist häufig nur eine erste grobe Abschätzung der Montagemethode möglich. Hierfür bieten sich Leistungs-/Produktkomplexitäts-Diagramme an (Bild 6-12). Dabei wird die Montagemethode aufgrund der Produktionsmenge und der Produktkomplexität festgelegt [Hes06, S. 19f.], [WRN09, S. 187] (vgl. auch [BDK11]).

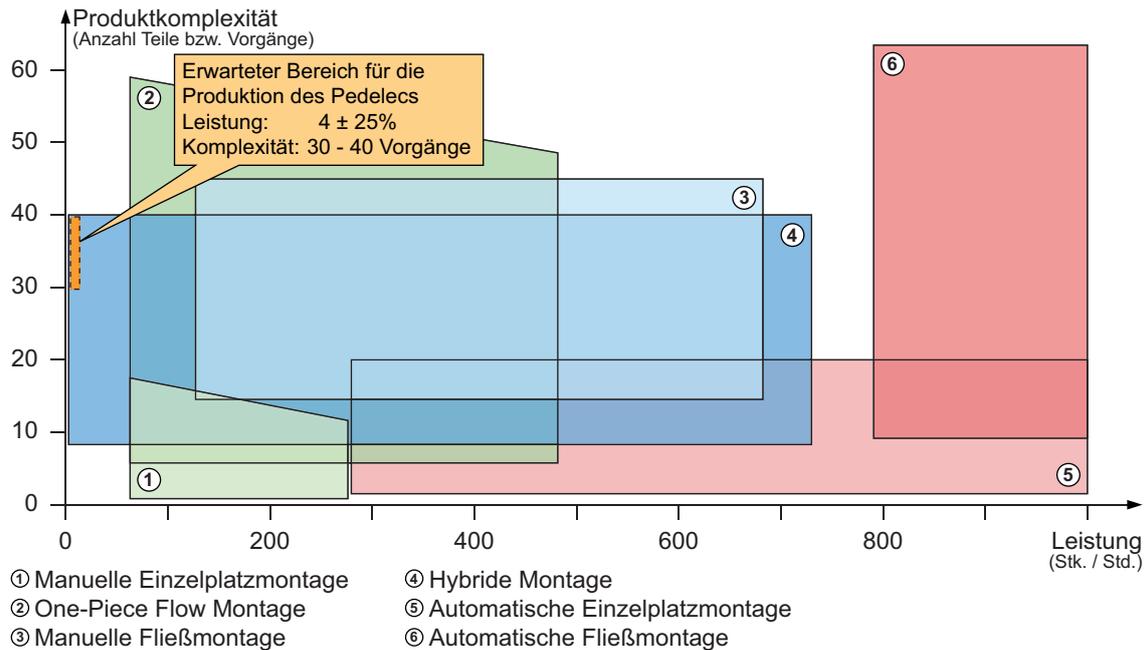


Bild 6-12: Bestimmung der grundsätzlichen Montagemethode nach LOTTER [LS94, S. 254], [Lot06b, S. 59ff.], [WRN09, S. 186]

Die geplante Produktionsmenge ergibt sich aus der Anforderungsliste und die Produktkomplexität bzw. die Anzahl der Montageteile wird auf Basis von Erfahrungswissen abgeschätzt. Diese Werte sind in der frühen Phase der Produktentwicklung meist mit einer großen Unsicherheit behaftet. Durch die Verwendung von Streubereichen zur Beschreibung der Produktionsmenge und der Produktkomplexität können diese Unsicherheiten berücksichtigt werden. Die erwartete Produktionsmenge für das zu entwickelnde Pedelec liegt bei vier Einheiten pro Stunde. Als Streubereich wird eine Abweichung von $\pm 25\%$ angenommen. Die Anzahl der Montageteile je Einheit wird mit 30 bis 40 angenommen. Somit bietet sich für die Montageform eine hybride Montage¹¹ an.

Liegen die ersten vollständigen Produkt- und Prozessinformationen vor, können auch detailliertere Methoden zum Einsatz kommen, bspw. die Methode zur Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrads nach Ross [Ros02].

6.3 Montageorientierte Produktstrukturierung

Das Ziel dieser Phase ist eine montageorientierte Erzeugnisgliederung. Diese beschreibt die montageorientierte Aggregation der Bauteile zu Baugruppen, sogenannte Montagegruppen. Hierzu wird im ersten Schritt die Wirkstruktur des Produkts analysiert und es werden Zwangsfolgen für die Montage identifiziert. Anschließend wird das Produkt mit

¹¹ Als hybride Montagesysteme werden Kombinationen aus automatisierten Stationen und manuellen Arbeitsplätzen bezeichnet. Synonym wird auch der Begriff teilautomatisierte Montagesysteme verwendet [Ric06, S. 106].

Hilfe einer Design Structure Matrix strukturiert. Das prinzipielle Vorgehen entspricht einer Umstrukturierung der zumeist funktional geprägten Hierarchie der Wirkstruktur in eine montageorientierte Hierarchie (siehe Bild 6-13).

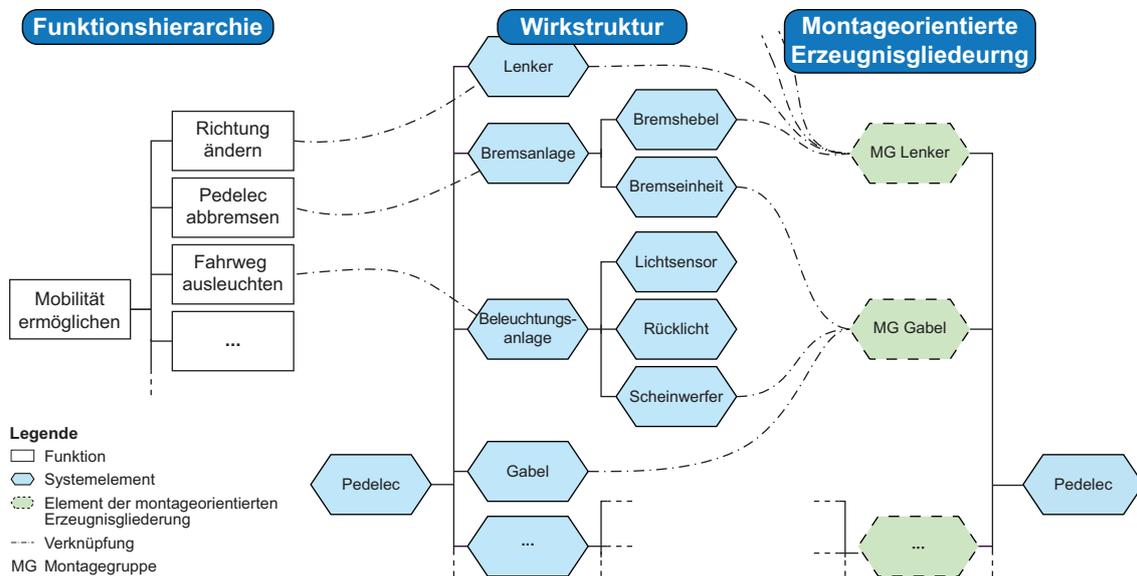


Bild 6-13: Umstrukturierung der funktionsorientierten Hierarchie der Wirkstruktur in eine montageorientierte Hierarchie

In dem gezeigten Ausschnitt ist links die Funktionshierarchie des Systems dargestellt. Teilfunktionen des Pedelecs sind *Pedelec abbremesen* und *Fahrweg ausleuchten*. Die Funktionen werden durch die Systemelemente *Bremsanlage* und *Beleuchtungsanlage* realisiert, die im Verlauf der Konzipierung in die Systemelemente *Bremshebel*, *Bremseinheit*, *Lichtsensor*, *Rücklicht* und *Scheinwerfer* detailliert werden. Im Zuge der montageorientierten Strukturierung werden aus den gestaltbehafteten Systemelementen (Bauteilen) Montagegruppen gebildet. Der *Bremshebel* bildet zusammen mit dem *Lenker* und weiteren Bauteilen die Montagegruppe *MG Lenker*. Der *Scheinwerfer* und die *Bremseinheit* werden an die *Gabel* montiert.

Die Festlegung der Montagegruppen erfolgt im Rahmen der montageorientierten Produktstrukturierung. Das Vorgehen gliedert sich in vier Schritte, die in Bild 6-14 dargestellt sind.

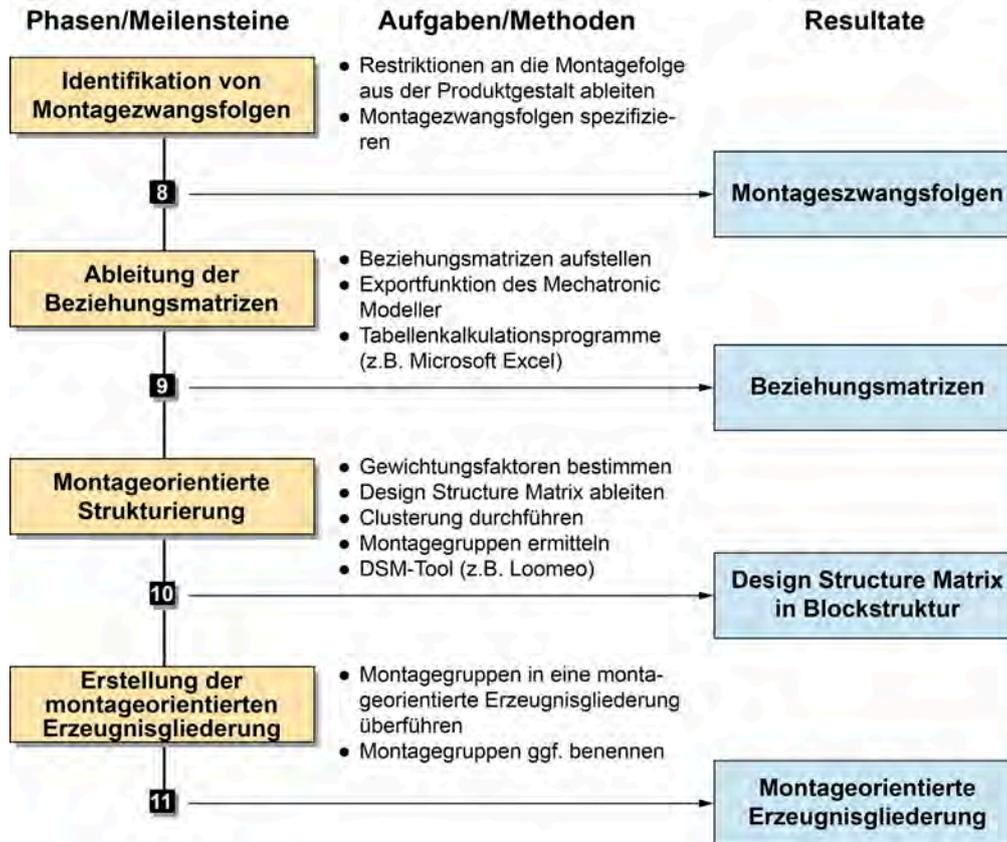


Bild 6-14: Vorgehen bei der montageorientierten Produktstrukturierung

6.3.1 Identifikation von Montagezwangsfolgen

Ein zentraler Aspekt bei der montageorientierten Produktstrukturierung ist die Identifikation von Montagezwangsfolgen. Hierbei handelt es sich um geometrisch erforderliche Abhängigkeiten in der Reihenfolge der Montageoperationen. Die Identifikation und Festlegung der Montagezwangsfolgen hat einen direkten Einfluss auf die Konzipierung der Montageprozesse sowie die Produktgestaltung. Sie muss daher in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung erfolgen. Bild 6-15 zeigt ein Beispiel.

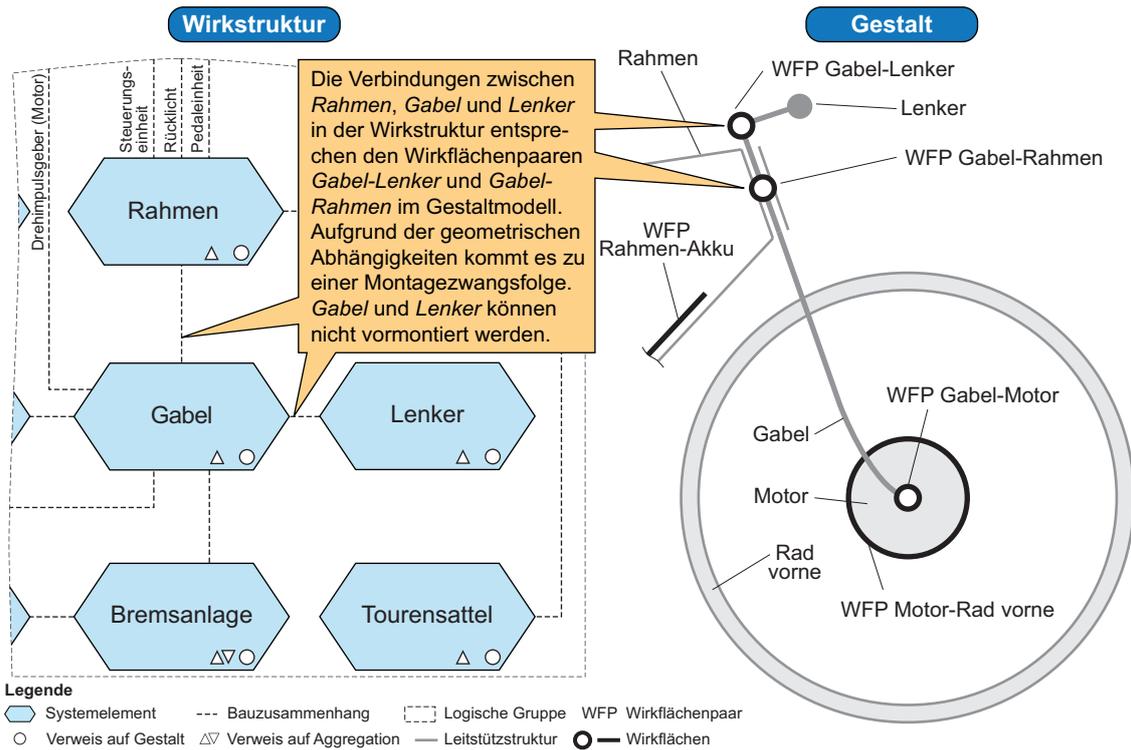


Bild 6-15: Montagezwangsfolge zwischen den Bauteilen *Rahmen*, *Gabel* und *Lenker*

Die *Gabel* besitzt Verbindungsbeziehungen zu den Systemelementen *Rahmen* und *Lenker*. Sie ist drehbar gelagert mit dem *Rahmen* verbunden. *Gabel* und *Lenker* sind fest miteinander verbunden. Aufgrund der Geometrie ist die Verbindung *Gabel-Rahmen* vor der Verbindung *Gabel-Lenker* herzustellen. Eine separate Vormontage von *Gabel* und *Lenker* ist daher nicht möglich.

Die Montagezwangsfolgen werden in Form von Steckbriefen dokumentiert. Diese umfassen eine Auflistung der betroffenen Elemente, ein generisches Prozessdiagramm der Abfolge sowie eine Kurzbeschreibung der Montagerestriktion. Zusätzlich können weitere Parameter angegeben werden, z. B. erforderliche Trocknungszeiten bei Klebeverbindungen oder Lackierprozessen. Die Steckbriefe werden über Querverweise mit den Anforderungen der betroffenen Systemelemente verknüpft. Hierdurch kann bei der Planung der Montagefolge direkt auf die systemelementspezifisch relevanten Montagezwangsfolgen zugegriffen werden. Bild 6-16 zeigt einen Ausschnitt des Steckbriefs der Montagezwangsfolge von *Rahmen*, *Gabel* und *Lenker*.

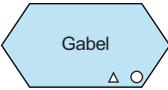
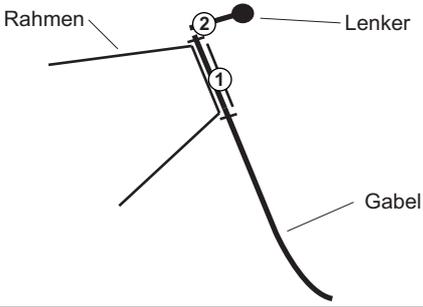
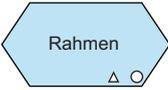
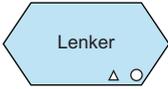
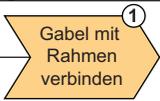
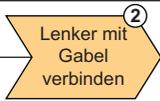
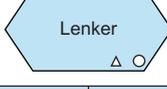
ID: MZF01		Montagezwangsfolge Gabelmontage		Datum: 12.11.2012
Betroffene Systemelemente		Skizze		Bearbeiter: G.B.
	Gabel Bestandteil von: Pedelec Besteht aus: ---			
	Rahmen Bestandteil von: Pedelec Besteht aus: ---			
	Lenker Bestandteil von: Pedelec Besteht aus: ---			
Generische Montagefolge				
				
				
Prozessbeschreibung		Restriktionen		
Die Gabel wird durch das Steuerrohr des Rahmens gesteckt und fixiert. Anschließend erfolgt die Verbindung von Gabel und Lenker. Die Demontage erfolgt gegenläufig.		Die Verbindung Gabel-Rahmen darf nicht mittelbar aus der Verbindung Gabel-Lenker hervorgehen.		
Parameter				
- nicht spezifiziert -				

Bild 6-16: Steckbrief einer Montagezwangsfolge am Beispiel der Verbindung Rahmen, Gabel und Lenker

6.3.2 Ableitung der Beziehungsmatrizen

In dieser Phase werden auf Grundlage der Prinziplösung Beziehungsmatrizen erstellt. Diese beschreiben die Zusammenhänge zwischen den Systembestandteilen nach unterschiedlichen Beziehungsaspekten. Die betrachteten Aspekte sind Stoff-, Energie- und Informationsfluss, Stoff-, Kraft-, und Formschluss sowie bewegliche Verbindungen.

Für jeden der sieben Beziehungsaspekte wird eine separate Beziehungsmatrix erstellt. In den Zeilen und Spalten sind jeweils sämtliche Bauteile des Produkts aufgetragen. Die Aspekte werden als bidirektionale Zusammenhänge abgebildet. Folglich handelt es sich bei den Beziehungsmatrizen um symmetrische Matrizen. In den Matrixfeldern werden die aspektspezifischen Zusammenhänge zwischen den Bauteilen markiert. Besteht zwischen zwei Systemelementen ein Zusammenhang, ist dies in der Matrix mit einer „1“ gekennzeichnet. Andernfalls sind die Zusammenhänge mit „0“ bewertet, wobei diese aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt werden. Die Beziehungsmatrix entspricht somit einer binären Design Structure Matrix (DSM). Da in den Zeilen und Spalten Objekte aufgeführt sind, wird sie auch als objekt-basierte DSM bezeichnet. Bild

6-17 zeigt einen Ausschnitt der Beziehungsmatrix für den Aspekt Kraftschluss am Beispiel des Pedelecs.

Beziehungsmatrix Aspekt: Kraftschluss		Systemelemente																																
0: Es besteht keine Beziehung 1: Es besteht eine Beziehung		Akku	Bremseinheit vorne	Bremshebel vorne	Bremsscheibe vorne	Motor	Drehimpulsgeber	Drehmomentsensor	Felge hinten	Felge vorne	Scheinwerfer	Gabelschaft	Zahnriemen	HMI	ZRS hinten	ZRS vorne	Unterstrebe	Kurbel rechts	Leistungselektronik	Lenker	Nabenschaltung	Nabe vorne	Oberrohr	Pedal rechts	Reifen hinten	Reifen vorne	Schalthebel	Rücklicht	Sitzrohr	Sattelstrebe	Speichen hinten			
Systemelemente	ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
Akku	1	0																																
Bremseinheit vorne	2		0																															
Bremshebel vorne	3			0																1														
Bremsscheibe vorne	4				0																1													
Motor	5					0																												
Drehimpulsgeber	6						0																											
Drehmomentsensor	7							0																										
Felge hinten	8								0																	1								
Felge vorne	9									0																1								
Scheinwerfer	10										0	1																						
Gabelschaft	11											0	1																					
Zahnriemen	12												0																					
HMI	13													0						1														
ZRS hinten	14														0																			
ZRS vorne	15															0																		
Unterstrebe	16																0																	
Kurbel rechts	17																	0																
Leistungselektronik	18																		0															
Lenker	19																				0													
Nabenschaltung	20																					0												
Nabe vorne	21																						0											
Oberrohr	22																							0										
Pedal rechts	23																								0									
Reifen hinten	24																									0								
Reifen vorne	25																										0							
Schalthebel	26																											0						
Rücklicht	27																													0				
Sitzrohr	28																														0			
Sattelstrebe	29																															0		
Speichen hinten	30																																0	

Zwischen den Bauteilen Akku und Bremseinheit vorne besteht keine kraftschlüssige Verbindung. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind die Bewertungen mit 0 in den restlichen Feldern ausgeblendet.

Die Bauteile Bremshebel vorne und Lenker sind kraftschlüssig miteinander verbunden. Somit besteht eine Beziehung.

Bild 6-17: Beziehungsmatrix zum Aspekt Kraftschluss am Beispiel Pedelec (Ausschnitt)

In der Wirkstruktur sind die Aspekte Stoff-, Energie- und Informationsfluss enthalten. Die entsprechenden Flussbeziehungen zwischen den Systemelementen werden in die zugehörigen Matrizen übertragen. Die Verbindungsbeziehungen (Stoff-, Kraft-, Formschluss und bewegliche Verbindung) sind in der Wirkstruktur als Bauzusammenhänge spezifiziert (vgl. Kap. 6.1.3). Analog zu den Flussbeziehungen werden sie in die entsprechenden Matrizen übertragen. Als Ergebnis liegt ein Set von sieben Beziehungsmatrizen vor. Werden mehrere alternative Produktkonzepte verfolgt, erhöht sich die Anzahl der Beziehungsmatrizen entsprechend der Anzahl der Konzeptalternativen.

Die manuelle Erstellung dieser Matrizen ist sehr aufwändig und fehleranfällig. Da es sich um eine reine Übertragung der in den Partialmodellen existierenden Informationen handelt, bietet sich ein automatischer Datenexport an. Wurde die Prinziplösung mit dem

Mechatronic Modeller erstellt, ist eine solche automatische Übernahme der Informationen aus den Partialmodellen möglich¹². Die benötigten Informationen sind im Partialmodell Wirkstruktur enthalten. Der Mechatronic Modeller legt die Daten in einer XML-Datenstruktur ab. Diese wird ausgelesen und in eine Matrixform überführt. Die Speicherung und weitere Bearbeitung erfolgt in einem Tabellenkalkulationsprogramm (hier Microsoft Excel).

Bei der Nutzung der Exportfunktionalität ist zu beachten, dass aus der Wirkstruktur nur Beziehungen zwischen Bauteilen übernommen werden. Beziehungen, die zwischen einem Bauteil und einer Baugruppe bzw. zwischen zwei Baugruppen spezifiziert sind werden ignoriert. Diese Einschränkung ist erforderlich, da die Baugruppen aus der Wirkstruktur nicht in die montageorientierte Erzeugnisgliederung überführt werden. Die Bauteile werden neu strukturiert und in Montagegruppen zusammengeführt. Dieser Grundsatz des Datenexports muss bereits bei der Modellierung der Wirkstruktur durch den Produktentwickler beachtet werden.

6.3.3 Montageorientierte Strukturierung

Das Resultat dieser Phase sind Montagegruppen, die im Verlauf des Montageprozesses montiert und im Erzeugnis verbaut werden. Die Eingangsinformationen dieser Phase sind die zuvor gebildeten Beziehungsmatrizen, die in einer Design Structure Matrix (DSM) zusammengeführt werden. Der Aufbau dieser Matrix entspricht dem Aufbau der Beziehungsmatrizen. In den Zeilen und Spalten sind jeweils sämtliche Bauteile des zu entwickelnden Produkts aufgetragen. Der Wert eines Matrixfeldes in der DSM ergibt sich als gewichtete Summe der Werte der äquivalenten Matrixfelder aus den Beziehungsmatrizen (Gleichung 6-1) (vgl. [Koe08]).

$$EW_{ij}^{DSM} = \sum_{a=1}^7 G_a \cdot EW_{ij}^a$$

Gleichung 6-1: Eigenschaftswert der DSM

mit

EW_{ij}^{DSM} : Eigenschaftswert der DSM im Matrixfeld i,j

G_a : Gewichtungsfaktor der Beziehungsmatrix a

EW_{ij}^a : Wert in der Beziehungsmatrix a im Matrixfeld i, j

¹² Der Mechatronic Modeller stellt Schnittstellen für den Export bereit. Informationen aus den Partialmodellen können in andere Software-Werkzeuge übertragen und weiterverwendet werden [GBD+12, S. 124f.] (vgl. [Köc12, S. 52]).

Die Herausforderung in der montageorientierten Strukturierung liegt in der Wahl geeigneter Gewichtungsfaktoren für die Beziehungsaspekte¹³. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Gewichtungsfaktoren über einen paarweisen Vergleich ermittelt (siehe Anhang Bild A-16). Das Resultat ist in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Gewichtungsfaktoren der Beziehungsaspekte

Beziehungsaspekt		Gewichtungsfaktor	
Fluss- beziehungen	Stofffluss	5 %	
	Energiefluss	5 %	
	Informationsfluss	5 %	
Verbindungs- beziehungen	Feste Verbindung	Stoffschluss	29 %
		Kraftschluss	21 %
		Formschluss	21 %
	Bewegliche Verbindung	14 %	

Das Ergebnis ist eine numerische Design Structure Matrix mit Matrixwerten zwischen 0 und 1. Auf Grundlage dieser Matrix erfolgt anschließend die sogenannte Clusterung. Dabei werden die Zeilen und Spalten der Matrix solange umsortiert, bis die stark vernetzten Bauteile nah beieinander stehen (vgl. Kap. 3.3.1). Die Matrixfelder mit stark gewichteten Zusammenhängen rücken dabei nah an die Diagonale der Matrix. Das Ergebnis der Clusterung wird als Blockstruktur bezeichnet. Diese dient als Indikator für das Zusammenfassen von Bauteilen zu Montagegruppen. Die einzelnen Blöcke (oder Cluster) stellen potentielle Montagegruppen dar [PE94, S. 7], [DKL+12, S. 693], [Kra12, S. 669f.].

Für die Clusterung der Design Structure Matrix steht eine Vielzahl an Software-Werkzeugen zur Verfügung [Lin13-ol]. Hierbei handelt es sich sowohl um Erweiterungen für Standard-Software als auch um dedizierte Software-Werkzeuge. In der vorliegenden Arbeit kommt das Software-Werkzeug LOOME0 der TESEON GmbH zum Einsatz [Tes13-ol]. Bild 6-18 zeigt einen Ausschnitt der resultierende Blockstruktur.

¹³ Die ermittelten Gewichtungsfaktoren wurden am Anwendungsbeispiel Pedelec validiert und an den Demonstratoren des Verbundprojekts VireS angewendet.

Design Structure Matrix		Systemelemente																																			
Werte sind in % dargestellt		Lichtsens	HMI	Bremshebel vorne	Schalthebel	Bremshebel hinten	Lenker	Pedal rechts	Kurbel rechts	Drehmomentsensor	ZRS vorne	Welle	Kurbel links	Pedal links	Steuerung	Leistungselektronik	Akku	E-Träger	Unterrohr	Steuerrohr	Oberrohr	Unterstrebe	Tretlager	Sitzrohr	Sattelstrebe	Rücklicht	Bremseinheit hinten	Tourensattel	Bremsschreibe hinten	Zahnriemen	ZRS hinten						
Systemelemente	ID	44	13	3	26	38	19	23	17	7	15	36	40	41	33	18	1	43	35	32	22	16	42	28	29	27	37	34	39	12	14						
Lichtsens	44	21													5																						
HMI	13	21				21									5	5																					
Bremshebel vorne	3					21									5																						
Schalthebel	26					21									5																						
Bremshebel hinten	38					21									5													5									
Lenker	19	21	21	21	21																																
Pedal rechts	23							14																													
Kurbel rechts	17						14					21																									
Drehmomentsensor	7											21			5																						
ZRS vorne	15											21																						21			
Welle	36							21	21	21		21												14													
Kurbel links	40											21	14																								
Pedal links	41												14																								
Steuerung	33	5	5	5	5	5			5									5	10	21																	
Leistungselektronik	18														5	5	5	21																			
Akku	1		5												10	5	21										5										
E-Träger	43														21	21	21	21	21																		
Unterrohr	35																	21	29	29			29														
Steuerrohr	32																		29	29	29																
Oberrohr	22																			29	29			29													
Unterstrebe	16																							29	29												
Tretlager	42											14								29			29	29	29												
Sitzrohr	28																				29		29	29	29	29							21				
Sattelstrebe	29																						29	29	29	21	21										
Rücklicht	27															5									21	21											
Bremseinheit hinten	37					5																			21												
Tourensattel	34																							21													
Bremsschreibe hinten	39																																				
Zahnriemen	12										21																										21

Bild 6-18: Ausschnitt der Design Structure Matrix des Pedelecs nach der Clusterbildung (Blockstruktur)

Die resultierende Blockstruktur gibt dem Montageplaner Hinweise auf potentielle Montagegruppen. Der Planer hat die Möglichkeit, die Matrix in einem manuellen Vorgehen noch umzustrukturieren. In der Blockstruktur der DSM gibt es Strukturmerkmale, welche für die Bildung der Montagegruppen hilfreich sind (vgl. [LM06, S. 52], [Mau07, S. 197ff.]). Diese werden im Folgenden erläutert.

6.3.3.1 Cluster

Cluster sind Gruppen von Elementen, bei denen die Verbindungen vorrangig innerhalb der Gruppe existieren und die Anzahl der Beziehungen zu Bauteilen außerhalb der Gruppe gering ist. Sie geben Hinweise auf potentielle Montagegruppen. Die endgültige Entscheidung, ob aus einem Cluster eine Montagegruppe wird, liegt beim verantwortlichen Planer. Je nach Art der Vernetzung innerhalb der Cluster lassen sich grundsätzlich

drei Typen unterscheiden: Cluster mit Basiselement, stark vernetzte Cluster und schwach vernetzte Cluster (siehe Bild 6-19).

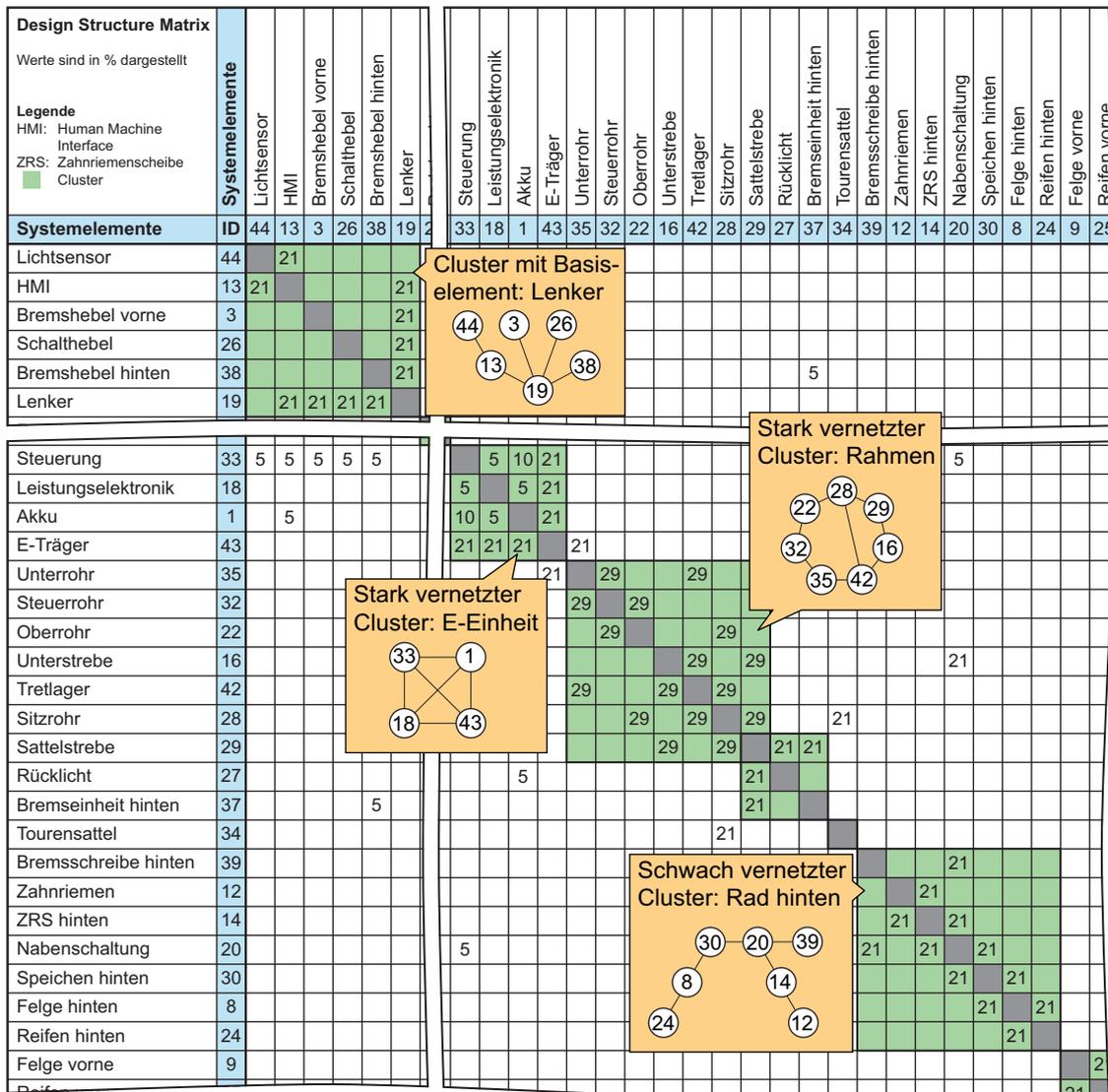


Bild 6-19: Cluster mit Darstellung als Graph am Beispiel Pedelec

Cluster mit Basiselement¹⁴: Cluster, die in der Blockstruktur der DSM eine Winkelform aufweisen, basieren auf einem Basiselement mit Anbauteilen. Die Anbauteile sind untereinander nicht oder nur schwach vernetzt. Ein Beispiel ist der Cluster *Lenker*. An das Basisbauteil *Lenker* werden die *Schalthebel* und *Bremshebel* sowie das *Frontlicht* und das *HMI* angebaut. Diese besitzen Verbindungen zum *Lenker*, sie sind untereinander jedoch nicht vernetzt.

Stark vernetzte Cluster: In solchen Clustern besitzen die Bauteile untereinander in der Regel mindestens zwei Verbindungen zu anderen Bauteilen (siehe Cluster *Rahmen* und

¹⁴ Solche Cluster werden auch als Hierarchie bezeichnet [LM06, S. 52].

E-Einheit). Dabei sind die Verbindungen in der Matrix häufig nicht in direkter Nachbarschaft der Diagonalen angeordnet sondern verteilen sich innerhalb des Clusters. In der Darstellung als Graph ist in einem solchen Cluster keine eindeutige Struktur zu erkennen. Montagetechnische Aussagen können nicht ohne weiteres getroffen werden.

Schwach vernetzte Cluster: Der Cluster *Rad hinten* ist ein Beispiel für einen schwach vernetzten Cluster. Die clusterinternen Verbindungen sind fast ausschließlich an der Diagonalen angeordnet. In der Darstellung als Graph bildet der Cluster somit eine Kette. Aus Sicht der Montage kann eine solche Montagebaugruppe schrittweise aufgebaut werden, wobei die Montagefolge der Reihenfolge in der Graph-Darstellung entspricht. Dabei wird von einem Basisbauteil ausgehend immer das zu montierende Bauteil an das zuletzt montierte Bauteile angebaut.

6.3.3.2 Brücken und freie Elemente

Als **Brücken** werden Beziehungen bezeichnet, die eine einzige Verbindung zwischen zwei Teilbereichen der DSM herstellen. Sie bilden die Schnittstellen zwischen den Clustern der Matrix (siehe auch [LM06, S. 52], [Mau07, S. 203]). Ein Beispiel ist in Bild 6-20 zu sehen. Die beiden Cluster *Rahmen* und *E-Einheit* stehen nur über eine einzige Verbindung miteinander in Beziehung. Diese Verbindung zwischen den Bauteilen *E-Träger* und *Unterrohr* stelle somit eine Brücke dar.

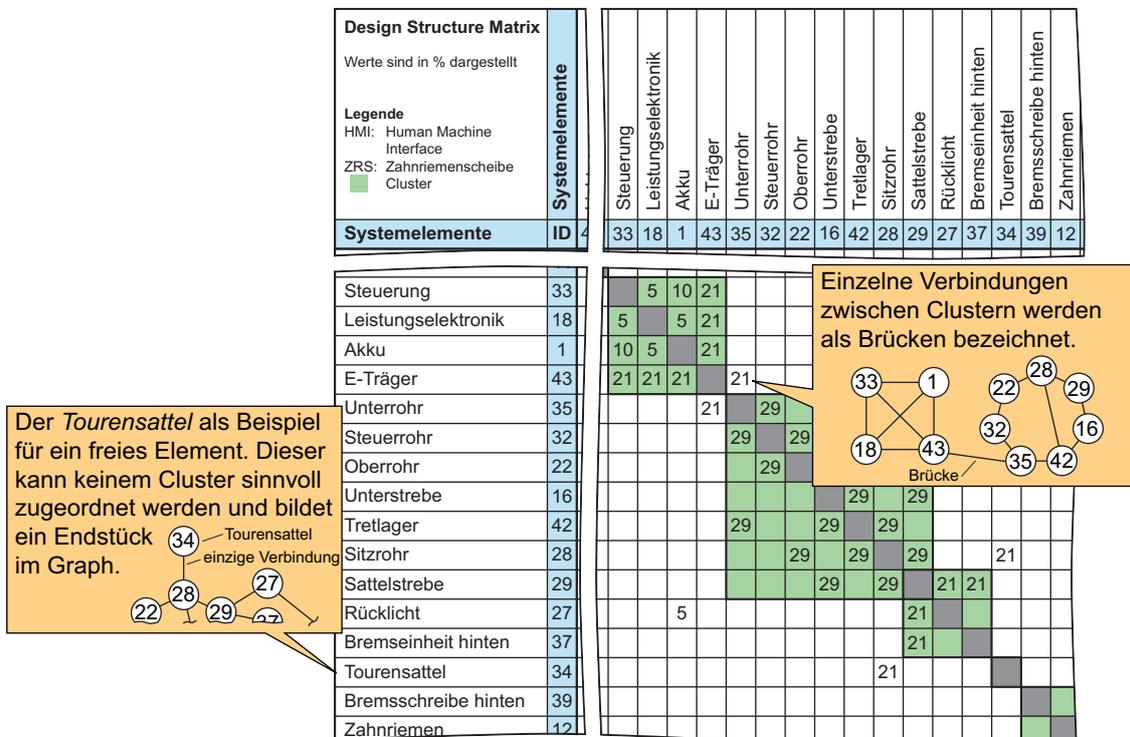


Bild 6-20: Brücken und freie Elemente am Beispiel Pedelec

Als **freie Elemente** werden Bauteile bezeichnet, die keinem Cluster zugeordnet sind und sich auch nicht sinnvoll integrieren lassen. In Bild 6-20 ist ein freies Element am

Beispiel des Bauteils *Tourensattels* dargestellt. Dieser besitzt nur eine Beziehung zum *Sitzrohr* bzw. zum Cluster *Rahmen*. In der Darstellung als Graph bilden solche Elemente in der Regel „Endstücke“, die nur über eine einzelne Verbindung mit dem Gesamtsystem verbunden sind (vgl. [Mau07, S. 210]).

6.3.3.3 Clusterüberlappung

In der Blockstruktur der DSM kann es zu einer Überlappung von Clustern kommen (vgl. [Mau07, S. 201]). In diesem Fall ist ein Bauteil zwei Clustern zugeordnet. Bild 6-21 zeigt eine solche Clusterüberlappung.

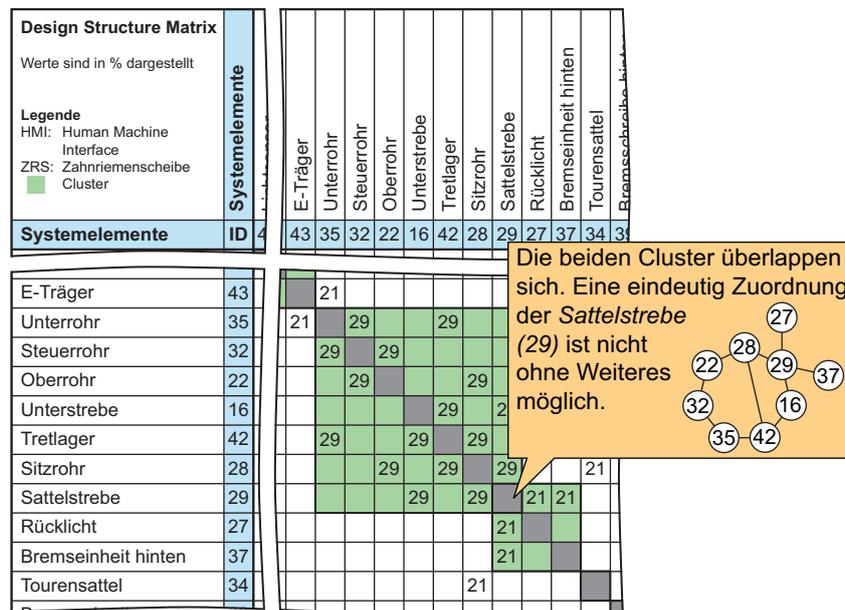


Bild 6-21: Clusterüberlappung am Beispiel Pedelec

Im gezeigten Fall ist die *Sattelstrebe* (Element ID 29) zwei Clustern zugeordnet. Der Montageplaner muss entscheiden, wie aus den Clustern die Montagegruppen gebildet werden. Hierbei bestehen die folgenden drei Möglichkeiten:

Sequenz und Vormontagegruppe: Die Bauteile *Rücklicht* und *Bremseinheit hinten* bilden zusammen mit der *Sattelstrebe* eine Montagegruppe. Anschließend wird diese mit den restlichen Bauteilen zu der übergeordneten Montagegruppe *MG Rahmen* zusammengebaut. Die Montage erfolgt in zwei sequentiellen Schritten (Bild 6-22).

Design Structure Matrix		Systemelemente										
Werte sind in % dargestellt		Unterrohr	Steuerrohr	Oberrohr	Unterstrebe	Tretlager	Sitzrohr	Sattelstrebe	Rücklicht	Bremseinheit hinten		
Legende HMI: Human Machine Interface ZRS: Zahnriemenscheibe Cluster												
Systemelemente	ID	35	32	22	16	42	28	29	27	37		
Unterrohr	35	■	29			29						
Steuerrohr	32	29	■	29								
Oberrohr	22		29	■								
Unterstrebe	16				■	29	29					
Tretlager	42	29			29	■	29					
Sitzrohr	28			29		29	■	29				
Sattelstrebe	29				29		29	■	21	21		
Rücklicht	27								21	■		
Bremseinheit hinten	37									21	■	

Bildung einer Vormontagegruppe mit sequenzieller Montage

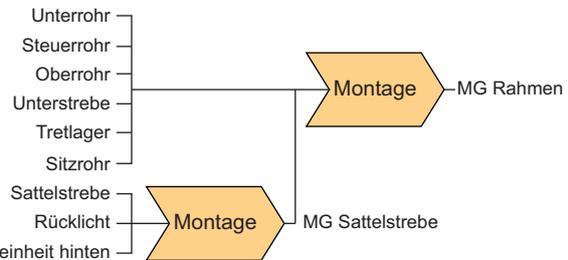


Bild 6-22: Bildung einer Vormontagegruppe

Parallelisierung: Es werden zwei Vormontagegruppen gebildet. Diese werden parallel montiert und sind zu diesem Zeitpunkt noch voneinander unabhängig. Anschließend werden die beiden Vormontagegruppen zu der übergeordneten Montagegruppe *MG Rahmen gesamt* montiert (Bild 6-23).

Design Structure Matrix		Systemelemente										
Werte sind in % dargestellt		Unterrohr	Steuerrohr	Oberrohr	Unterstrebe	Tretlager	Sitzrohr	Sattelstrebe	Rücklicht	Bremseinheit hinten		
Legende HMI: Human Machine Interface ZRS: Zahnriemenscheibe Cluster												
Systemelemente	ID	35	32	22	16	42	28	29	27	37		
Unterrohr	35	■	29			29						
Steuerrohr	32	29	■	29								
Oberrohr	22		29	■								
Unterstrebe	16				■	29	29					
Tretlager	42	29			29	■	29					
Sitzrohr	28			29		29	■	29				
Sattelstrebe	29				29		29	■	21	21		
Rücklicht	27								21	■		
Bremseinheit hinten	37									21	■	

Bildung von zwei Vormontagegruppen mit paralleler Montage

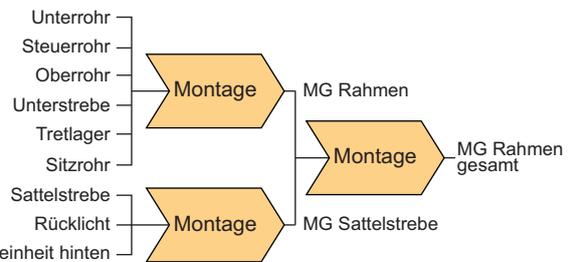


Bild 6-23: Parallelisierung durch zwei Vormontagegruppen

Bündelung von Arbeitsinhalten: In der Montagegruppe *MG Rahmen* werden die stoffschlüssig zu verbindenden Bauteile zusammengefasst. Die Bauteile *Rücklicht* und *Bremseinheit hinten* können keine separate Montagegruppe bilden, da sie untereinander keine Verbindungen aufweisen. Sie werden stattdessen als Arbeitsinhalt zusammengefasst und in einem gemeinsamen Montageschritt an die Montagegruppe *MG Rahmen* angebaut (Bild 6-24).

Design Structure Matrix
Werte sind in % dargestellt

Legende
HMI: Human Machine Interface
ZRS: Zahnriemenscheibe
Cluster

Systemelemente	ID	Systemelemente									
		35	32	22	16	42	28	29	27	37	
Unterrohr	35	■	■			■					
Steuerrohr	32	■	■	■							
Oberrohr	22		■								
Unterstrebe	16				■		■	■			
Tretlager	42	■			■	■	■				
Sitzrohr	28			■	■	■	■	■			
Sattelstrebe	29				■	■	■	■	■	■	■
Rücklicht	27								■	■	■
Bremseinheit hinten	37								■	■	■

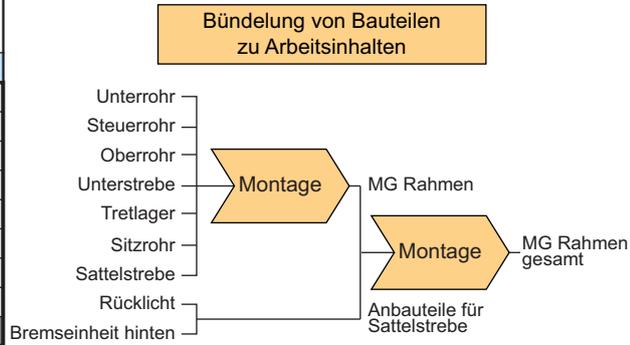


Bild 6-24: Bündelung von Bauteilen zu einem Arbeitsinhalt

Aus montagetechnischer Sicht ist bei diesem Beispiel der dritte Fall zu bevorzugen. Die höheren Eigenschaftswerte der Verbindungen innerhalb der so entstehenden Cluster sind ein weiterer Hinweis auf diese Struktur. Auf Grundlage der gezeigten Muster und der individuellen Erfahrungswerte strukturiert der Montageplaner die restlichen Elemente des Produkts. Dabei legt er fest, welche Montagegruppen gebildet werden. Es besteht auch die Möglichkeit, Cluster über mehrere Hierarchiestufen zu bilden. Die finale Blockstruktur mit den identifizierten Clustern ist im Anhang zu finden (siehe Anhang Bild A-17).

6.3.4 Erstellung der montageorientierten Erzeugnisgliederung

Das Ziel dieser Phase ist eine montageorientierte Erzeugnisgliederung des Produkts. Diese wird auf Grundlage der in der Blockstruktur identifizierten Montagegruppen und deren Hierarchisierung gebildet. Bild 6-25 zeigt einen Ausschnitt der montageorientierten Erzeugnisgliederung in Form eines Dendogramms. Die gesamte montageorientierte Erzeugnisgliederung ist im Anhang zu finden (siehe Anhang Bild A-18).

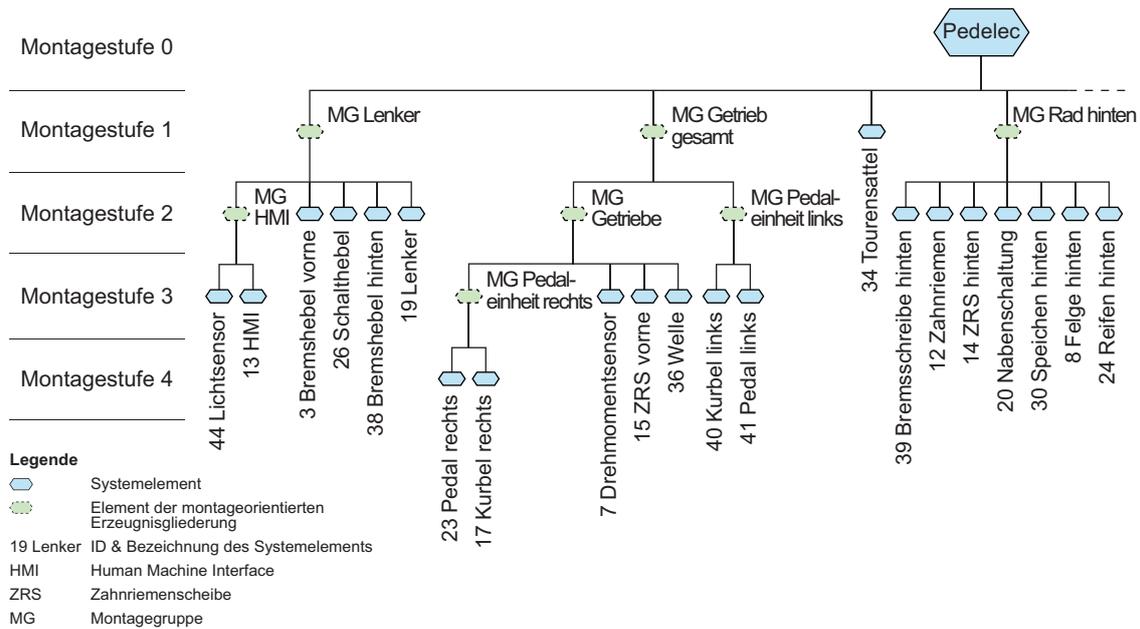


Bild 6-25: Montageorientierte Erzeugnisgliederung des Pedelecs (Ausschnitt)

Auf Grundlage der identifizierten Cluster wurden insgesamt zwölf Montagegruppen gebildet. Diese verteilen sich über vier Hierarchieebenen, die sog. Montagestufen. Die Strukturierung der Systembestandteile ist in diesem Beispiel sehr heterogen. Montagegruppen wie *MG Lenker* oder *MG Getriebe gesamt* sind über drei bzw. vier Montagestufen strukturiert. Bei der Montagegruppe *MG Rad hinten* erfolgte hingegen keine Unterteilung in weitere Vormontagegruppen.

6.4 Konzipierung des Montageprozesses

In dieser Phase wird der Montageprozess auf Basis der montageorientierten Erzeugnisgliederung entwickelt. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Schritte. Zunächst wird die montageorientierte Erzeugnisgliederung in eine Prozessfolge überführt und im Unternehmen bekannte Montageprozesse werden ergänzt. Anschließend erfolgt die Hierarchisierung und Detaillierung des Montageablaufs. Dabei werden die Montageprozessschritte in eine zeitliche und logische Abfolge gebracht. Im folgenden Schritt sind geeignete Montageverfahren zu identifizieren und den Prozessschritten zuzuweisen. Hierdurch ergeben sich alternative Prozessketten. Abschließend werden auf Grundlage der Prozesskette und der geplanten Montageverfahren montagetechnische Restriktionen für das Produktkonzept abgeleitet. Diese fließen in die weitere Produktentwicklung ein. Das Vorgehen ist in Bild 6-26 dargestellt.

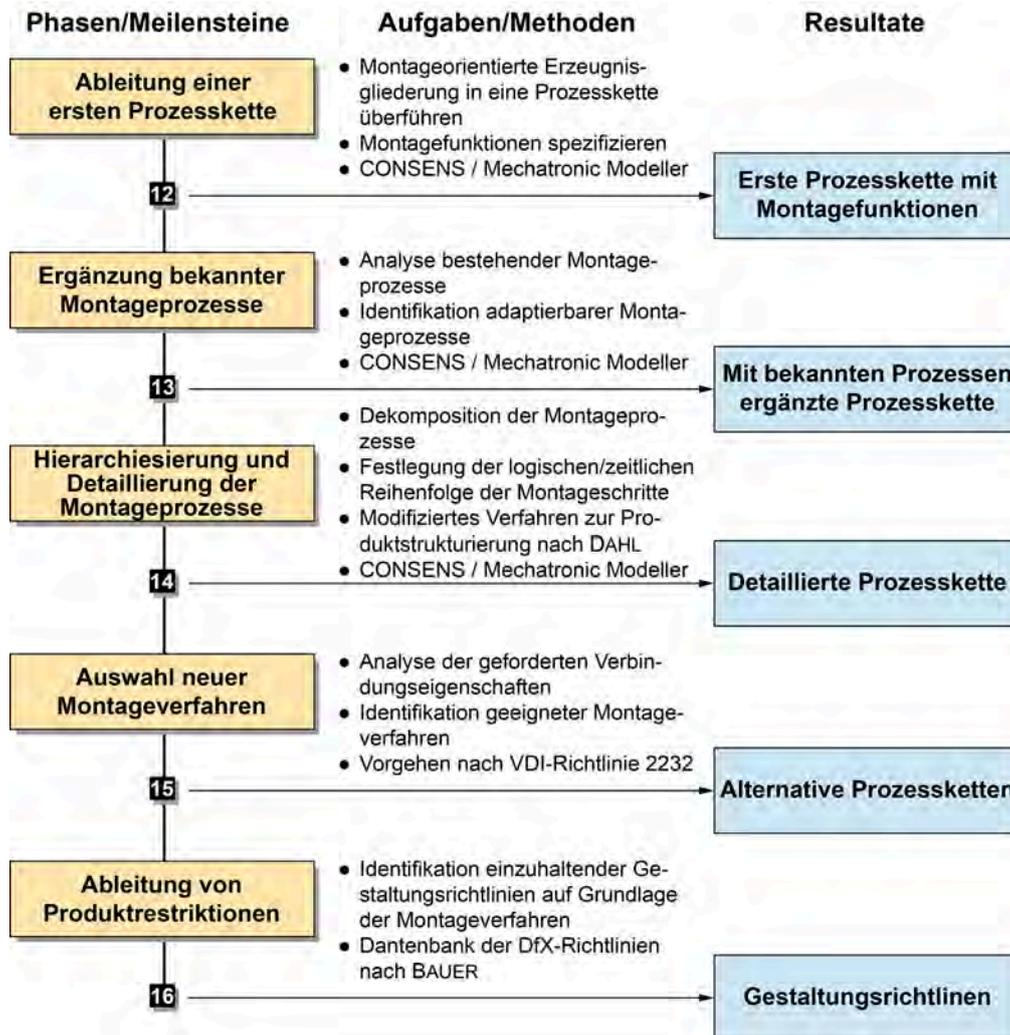


Bild 6-26: Vorgehen bei der Konzipierung des Montageprozesses

6.4.1 Ableitung einer ersten Prozesskette

Auf Grundlage der montageorientierten Erzeugnisgliederung wird eine erste Prozesskette erzeugt. Hierbei wird für jede im Rahmen der Produktstrukturierung erzeugte Montagegruppe ein zugehöriger Montageprozess erstellt. Die Spezifikation der Montageprozesse erfolgt hierbei auf Funktionsebene¹⁵, bspw. *Bauteile fügen* oder *Bauteile ausrichten*. Die Montageprozesse sind innerhalb der Montagestufen parallel angeordnet und noch nicht in einer logischen oder zeitlichen Reihenfolge angeordnet. In Bild 6-27 ist die erste Prozesskette der Montage des Pedelecs zu sehen.

¹⁵ Eine Übersicht von Montagefunktionen nach LOTTER [Lot06a, S. 2] findet sich im Anhang (siehe Anhang Bild A-19)

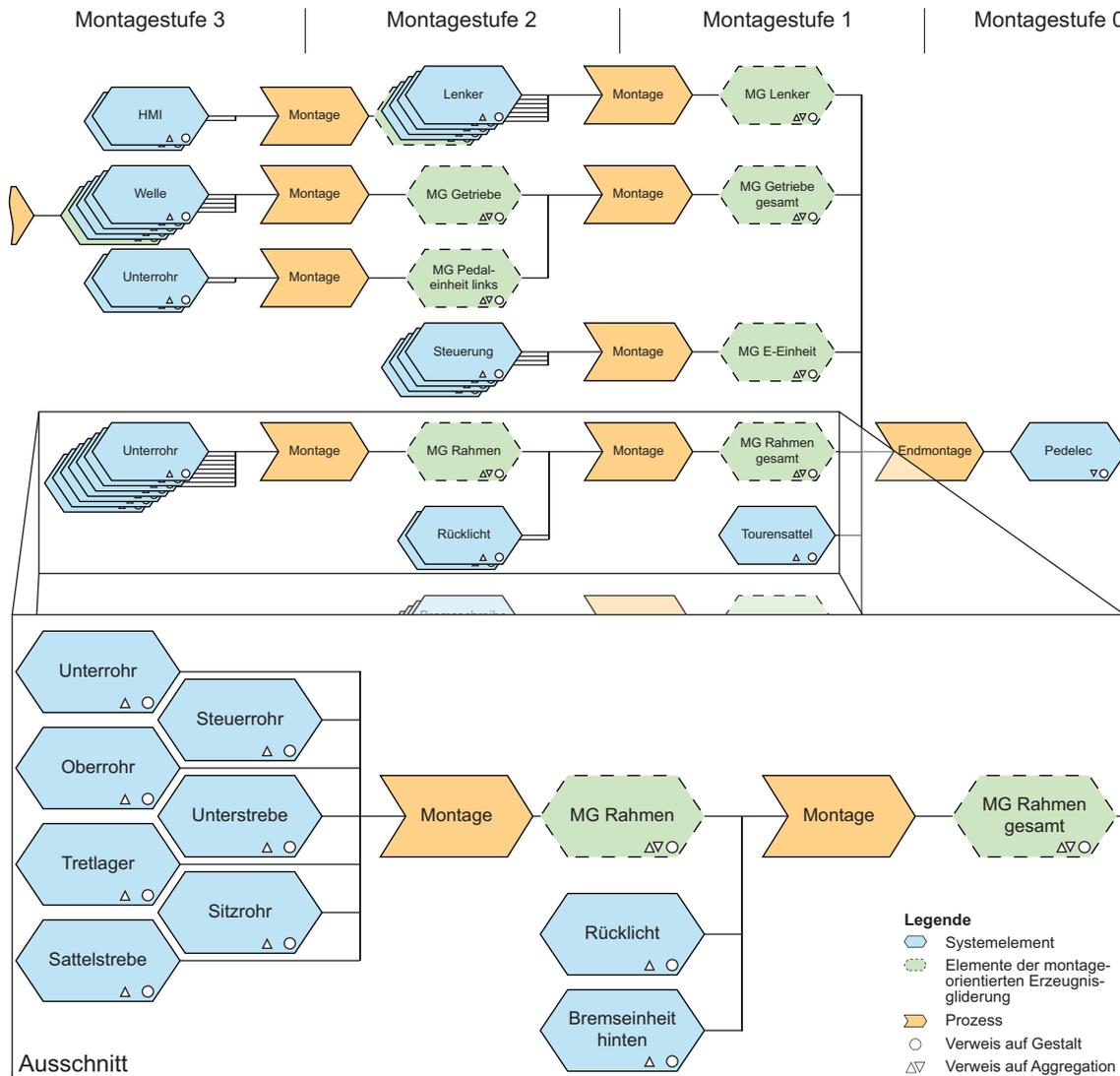


Bild 6-27: Erste Prozesskette der Montage des Pedelecs (Ausschnitt)

6.4.2 Ergänzung bekannter Montageprozesse

In diesem Schritt werden Montageprozesse ergänzt, die bereits im Unternehmen bekannt sind (vgl. [Nor12, S. 119f.]). Werden Montagegruppen in gleicher Form und mit vergleichbarer Stückzahl im Unternehmen montiert, können diese Arbeitsabläufe übernommen werden. Das gilt auch, wenn sich einzelne Bauteile innerhalb der Montagegruppe unterscheiden, hierdurch aber keine Änderungen im Montageprozess erforderlich sind. Ein Beispiel ist die Montagegruppe *MG Rad hinten* des Pedelecs. Der Aufbau des Montageprozesses unterscheidet sich nicht zum Hinterrad des Tourenrades. Bild 6-28 zeigt die Übernahme des Montageablaufs.

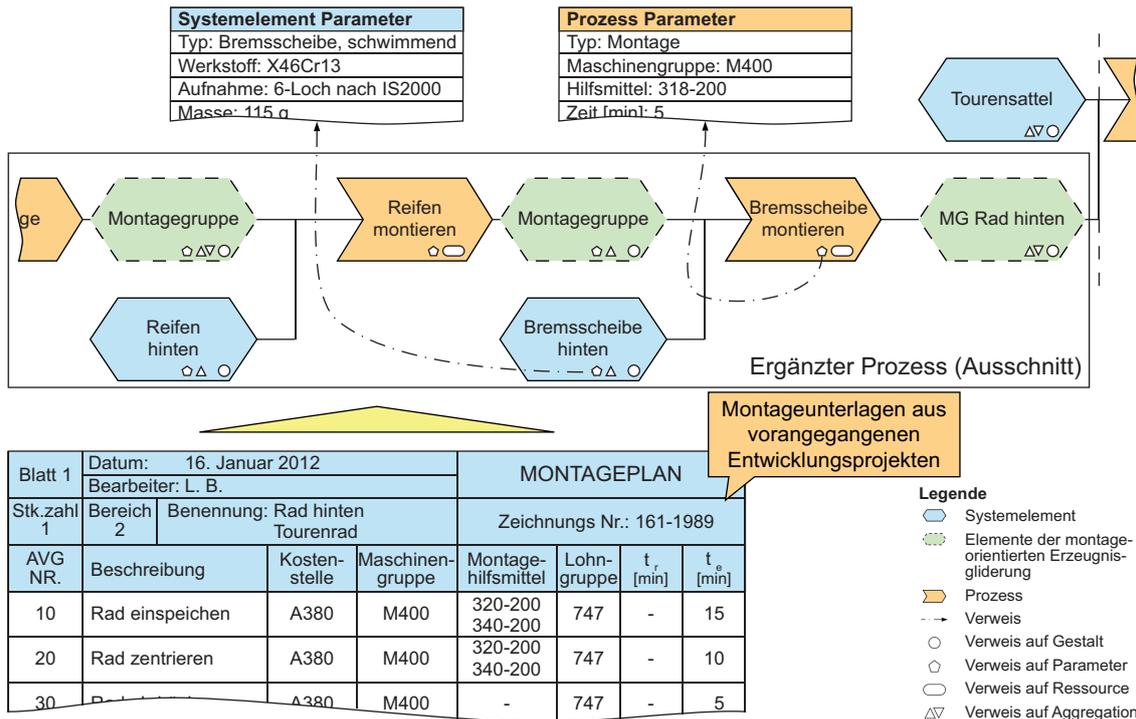


Bild 6-28: Ergänzung des Prozesses für die Montage des Hinterrads

Aus dem bestehenden Montageplan für das Hinterrad des Tourenrads kann die Abfolge der Montageschritte 1:1 übertragen werden. Weiterhin werden die Parameter der Prozessschritte aus dem Montageplan übernommen und den Prozessschritten über Verweise zugeordnet. Beispiele sind die benötigten Zeiten und die einzusetzenden Montagehilfsmittel. Die Arbeitsplätze und Montagehilfsmittel zur Durchführung der Prozessschritte werden im Partialmodell Ressourcen abgebildet und ebenfalls den Prozessschritten zugewiesen.

6.4.3 Hierarchisierung und Detaillierung der Montageprozesse

In dieser Phase erfolgt die Hierarchisierung und Detaillierung der Montageprozesse, die bisher nur als erste grobe Prozesskette vorliegen. Die Hierarchie in der Prozesskette entspricht den Montagestufen in der montageorientierten Erzeugnisgliederung (vgl. Kap. 6.3.4). Im Fall des Pedelecs bestehen die Montagegruppen aus bis zu sieben einzelnen Bauteilen. Das Ziel dieses Schrittes ist die Reihenfolge, in der die Bestandteile innerhalb der Montagegruppen schrittweise zusammengebaut werden. Hierfür wird zunächst ein Basisbauteil bestimmt, welches den Ausgangspunkt für den schrittweisen Aufbau der Montagegruppe darstellt. Anschließend wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die Bestandteile der Montagegruppe zusammengebaut werden.

Für die Strukturierung der Montageprozesse wird das im Stand der Technik vorgestellte Verfahren zur Produktstrukturierung nach DAHL [Dah90] eingesetzt¹⁶. Es wird modifiziert und auf die Gegebenheiten der montageorientierten Strukturierung angepasst. Die Bauteile innerhalb der Montagegruppen werden in eine Rangfolge gebracht, wobei die Strukturierung top-down geschieht und den Montagestufen der montageorientierten Erzeugnisgliederung folgt (siehe Bild 6-25). Die Grundlage für die Bildung der Rangfolge ist die Bewertungssumme. Diese wird für jedes Bauteil aus dessen gewichteten Eigenschaftswerten errechnet, welche aus der Blockstruktur der Design Structure Matrix entnommen werden (vgl. Anhang Bild A-17). Bei der Berechnung der Bewertungssumme muss zwischen Bauteilen und Baugruppen differenziert werden.

Die **Bewertungssumme für ein Bauteil** ergibt sich als die Summe aller gewichteten Eigenschaftswerte des Bauteils innerhalb der übergeordneten Montagegruppe. In der Design Structure Matrix entspricht die Bewertungssumme somit der Zeilensumme¹⁷ des Bauteils (Gleichung 6-2).

$$BS_i^{BT} = \sum_{j=a}^b EW_{ij}^{DSM}$$

Gleichung 6-2: Bewertungssumme für ein Bauteil

mit

BS_i^{BT} : Bewertungssumme des Bauteils BT in der Zeile i

a / b : Erste/letzte Spalte bzw. Zeile der übergeordneten Montagegruppe

EW_{ij}^{DSM} : Eigenschaftswert im Matrixfeld i,j der DSM

Die **Bewertungssumme für eine Montagegruppe** ergibt sich als die Summe der Bewertungssummen der enthaltenen Elemente. Die Verbindungen innerhalb der Montagebaugruppe, d. h. zwischen den detaillierenden Elementen, fließen nicht in die Bewertungssumme ein. Aus diesem Grund sind die montagegruppeninternen Verbindungswerte von der Bewertungssumme der Montagegruppe abzuziehen (Gleichung 6-3).

$$BS_{mn}^{MG} = \sum_{i=m}^n \left(\sum_{j=a}^b EW_{ij}^{DSM} - \sum_{j=m}^n EW_{ij}^{DSM} \right)$$

Gleichung 6-3: Bewertungssumme für eine Montagegruppe

¹⁶ Die prinzipielle Eignung des Verfahrens nach DAHL für die Strukturierung mechatronischer Systeme wurde von NORDSIEK gezeigt [Nor12, S. 108ff.].

¹⁷ Aufgrund der Symmetrie der DSM sind Zeilen- und Spaltensumme identisch.

mit

BS_{mn}^{MG} : Bewertungssumme der Montagegruppe MG in den Zeilen m bis n

m / n : Erste/letzte Spalte bzw. Zeile der Montagegruppe

a / b : Erste/letzte Spalte bzw. Zeile der übergeordneten Montagegruppe

EW_{ij}^{DSM} : Eigenschaftswert im Matrixfeld i,j der DSM

Das Element mit der höchsten Bewertungssumme in einer Montagegruppe bildet das Basisbauteil¹⁸. In einem ersten Montageschritt wird es mit dem Element mit der zweithöchsten Bewertung verbunden. Anschließend folgen die weiteren Elemente entsprechend ihrer Rangfolge. Bild 6-29 zeigt beispielhaft die Bildung der Bewertungssumme für die Elemente *MG E-Einheit* und *Tourensattel* der Montagestufe 1. Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist zusätzlich ein Ausschnitt der montageorientierten Erzeugnisgliederung abgebildet.

Innerhalb der Montagestufe 1 sind die Elemente *MG Lenker*, *MG Getriebe gesamt*, *MG E-Einheit*, *MG Rahmen gesamt*, *Tourensattel*, *MG Rad hinten*, *MG Rad vorne*, *MG Gabeleinheit* in eine Reihenfolge zu bringen. Die übergeordnete Montagegruppe ist das *Pedelec*. Bei der Berechnung der Bewertungssumme werden daher alle Spalten der DSM berücksichtigt. Die Bewertungssumme für die *MG E-Einheit* ergibt sich als Summe aller Eigenschaftswerte der Montagegruppe (Zeilensumme gesamt), abzgl. der montagegruppeninternen Werte (Zeilensumme intern). Die montagegruppeninternen Verbindungen bestehen zwischen den Bauteilen *Steuerung*, *Leistungselektronik*, *Akku* und *E-Träger*. Es ergibt sich eine Bewertungssumme für die *MG E-Einheit* von 81. Im Fall des Elements *Tourensattel* entspricht die Bewertungssumme der Zeilensumme des Bauteils. Der *Tourensattel* besitzt lediglich eine Verbindung zum *Sitzrohr*. Die Bewertungssumme ist somit 21. Für die weiteren Bauteile der Montagestufe 1 ergeben sich die Bewertungssummen analog. In Tabelle 6-3 ist das Resultat der Bewertung aufgeführt

Tabelle 6-3: Bewertungssummen innerhalb der Montagestufe 1

		Bewertungssumme BS			Bewertungssumme BS
Bauteil / Montagegruppe	MG Rahmen gesamt	101	MG Rad hinten		47
	MG Gabeleinheit	90	MG Getriebe gesamt		40
	MG E-Einheit	81	MG Rad vorne		35
	MG Lenker	61	Tourensattel		21

¹⁸ Vgl. Konstruktionsprinzip des Basisteils als Start- oder Grundgefügeteil. Alle weiteren Montageschritte bauen auf diesem Bauteil auf [PL11, S. 238].

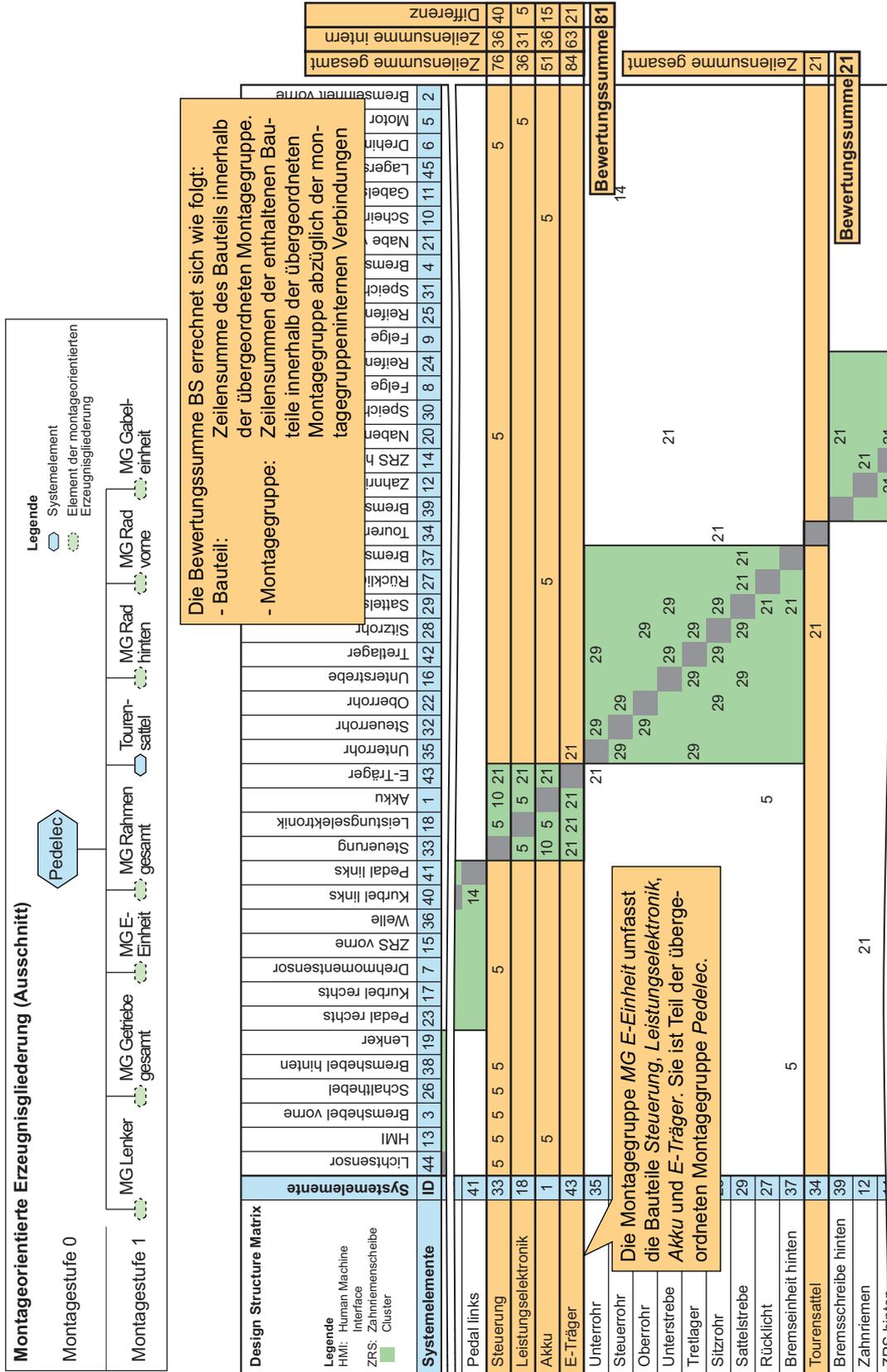


Bild 6-29: Berechnung der Bewertungssumme an den Beispielen MG E-Einheit und Tourensattel

Bild 6-30 zeigt das Ergebnis der Strukturierung. Der Prozessschritt Endmontage wurde dekomponiert und in sechs Teilschritte untergliedert. Diese sind entsprechend ihrer Rangfolge in eine Reihenfolge gebracht.

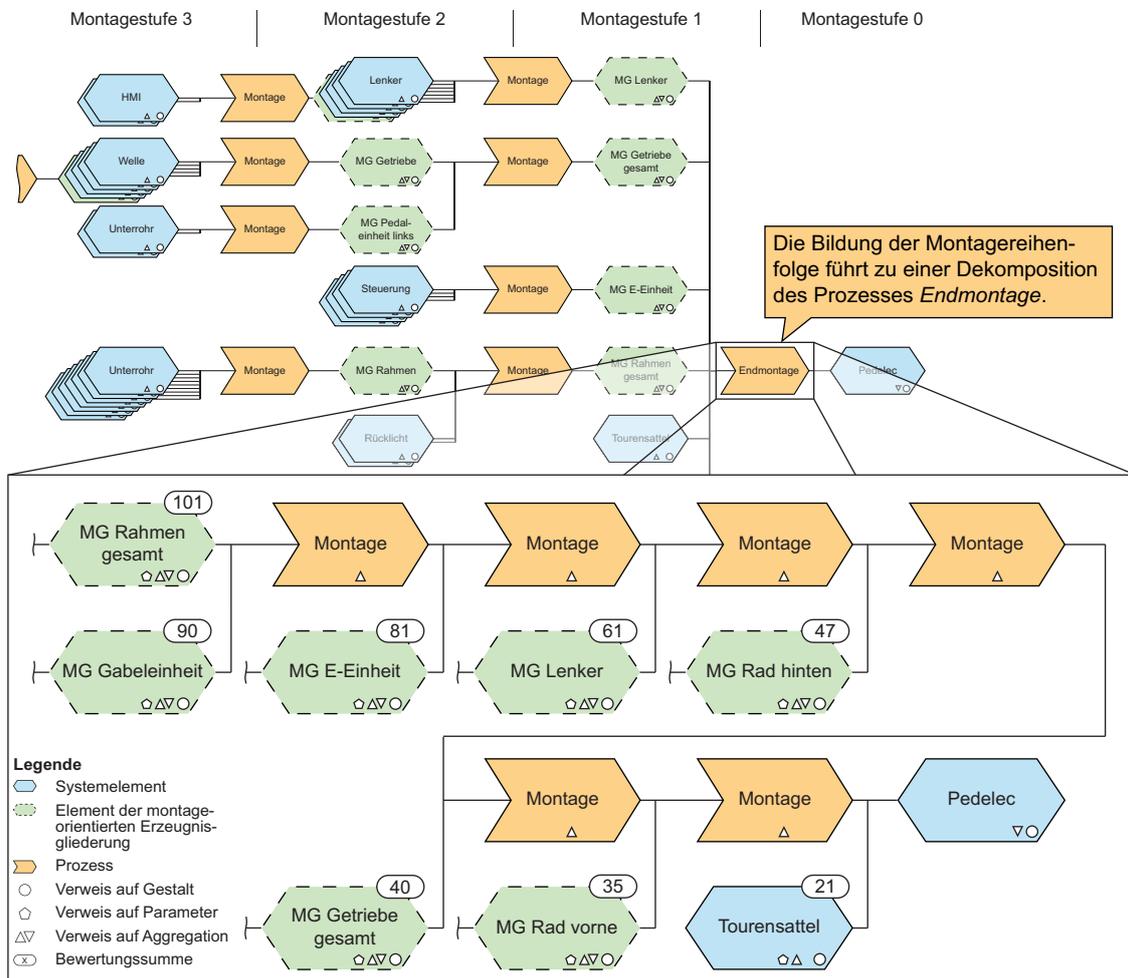


Bild 6-30: Montageprozess nach der Strukturierung am Beispiel der Endmontage des Pedelecs

Innerhalb der Montagestufe 1 der montageorientierten Erzeugnisgliederung (vgl. Bild 6-25) ergibt sich für die Montagegruppe *MG Rahmen gesamt* die höchste Bewertungssumme. Die Montagegruppe bildet somit innerhalb dieser Hierarchieebene das Basisbauteil und wird im ersten Montageschritt mit dem Element mit der zweithöchsten Bewertung verbunden. Dies ist die Montagegruppe *MG Gabeleinheit*. Die weiteren Bauteile und Montagegruppen der Montagestufe 1 folgen entsprechend ihrer Bewertungssumme.

Das Vorgehen zur Bildung der Reihenfolge wird auf die Montagegruppen aller Montagestufen des zu fertigenden Systems angewendet. Es endet, wenn keine sinnvolle Reihenfolgebildung mehr möglich ist. Beispiele für die Berechnung der Bewertungssumme auf den niedrigeren Montagestufen finden sich im Anhang (siehe Anhang Kap. A4.8).

6.4.4 Auswahl neuer Montageverfahren

Das Ziel dieser Phase sind geeignete Montageverfahren¹⁹ für die Prozessschritte, die im Unternehmen noch nicht existieren. Aufgrund der Vielfalt verfügbarer Verfahren und möglicher Bauteilgeometrien ist eine automatische Auswahl bis heute kaum möglich [SS94, S. 151]. Auch der schnelle Fortschritt im Bereich der IKT, z. B. semantische Netze, konnte bisher keinen Durchbruch erzielen. Nur für einzelne Technologiefelder konnten automatische Zuordnungen realisiert werden (siehe [EKS+05, S. 170ff.]). Die Verfahren erfordern jedoch eine detaillierte Beschreibung der Aufgabe.

In der frühen Phase der Produktentwicklung sind die hierfür erforderlichen Informationen noch nicht verfügbar. Es liegen lediglich erste Skizzen, Hüllflächen und -volumina, Kontaktbereiche und grobe Verbindungseigenschaften vor. Sie bilden die verfügbaren Eingangsinformationen für die Auswahl der Montageverfahren. In dieser Phase werden daher erste potentiell geeignete Montageverfahren bzw. Klassen von Montageverfahren ausgewählt und der Lösungsraum eingeschränkt. Hieraus resultieren neue Erkenntnisse und Restriktionen, die in die weitere Entwicklung des Produkts und des zugehörigen Produktionssystems einfließen.

Die Auswahl des Montageverfahrens durch den Montageplaner ist stark von dessen Erfahrungswissen abhängig. Somit kann es leicht zu einer subjektiv getroffenen Auswahl kommen [Spu96, S. 11-3]. Um die Gefahr einer solchen Vorfixierung zu reduzieren, ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich. Für die Auswahl geeigneter Montageverfahren wird im Rahmen der entwickelten Systematik in Anlehnung an das Verfahren zur Verbindungsauswahl der VDI-Richtlinie 2232 [VDI2232, S. 10f.] vorgegangen²⁰. Das Vorgehen ist in Bild 6-31 dargestellt.

Das Vorgehen umfasst die fünf Schritte: *Formulierung der Verbindungsanforderungen*, *Identifikation geeigneter Montageverfahren*, *Bewertung und Auswahl*, *Konkretisierung der Prozesskette* und *Anpassung der Prinziplösung bzw. Verfahrensentwicklung*. Diese werden im Folgenden am Beispiel der Verbindung der Bauteile *Sitzrohr* (Bestanteil der Montagegruppe *MG Rahmen*) und *E-Träger* (Bestanteil der Montagegruppe *MG E-Einheit*) erläutert.

¹⁹ Als Montageverfahren werden die Tätigkeiten Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen wie Reinigen und Erwärmen verstanden (vgl. [Lot06a, S. 2]). Der Fokus in der frühen Phase liegt hierbei auf der Auswahl der Fügeverfahren. Diese sind bereits frühzeitig relevant, da sie einen erheblichen Einfluss auf das Produktkonzept und insb. die Produktgestalt haben.

²⁰ Vgl. Verfahren zur Auswahl von Fertigungstechnologien nach FALLBÖHMER [Fal00, S. 46ff.].

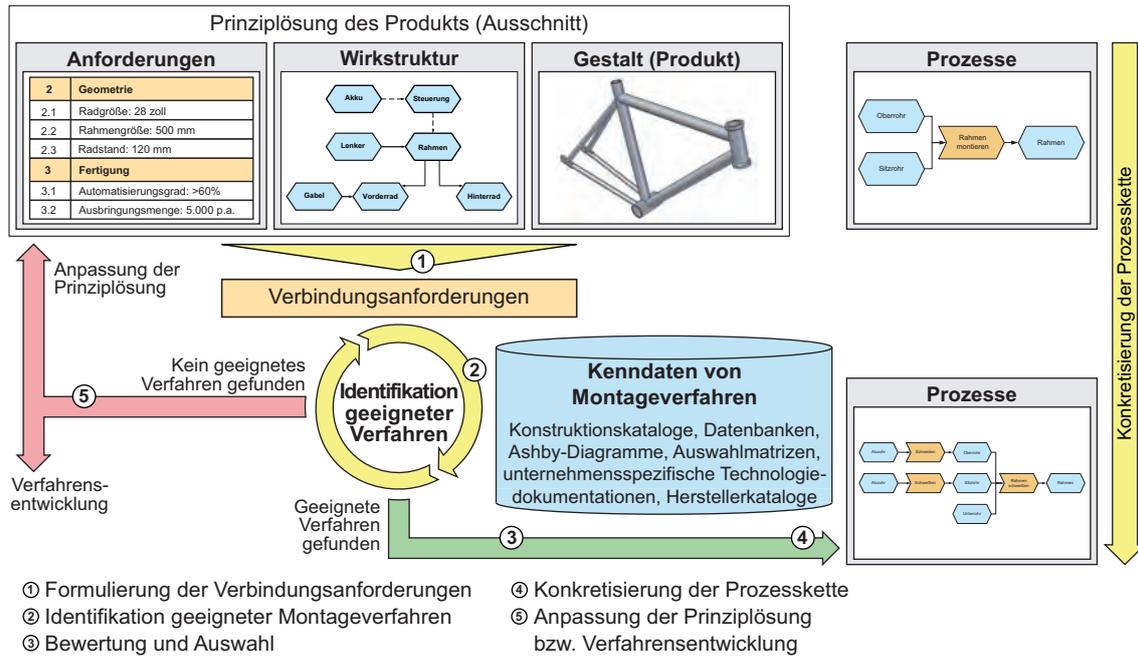


Bild 6-31: Auswahl von Montageverfahren in Anlehnung an [VDI2232, S. 10f.]

6.4.4.1 Formulierung der Verbindungsanforderungen

Den Ausgangspunkt bildet der betrachtete Prozessschritt aus dem Partialmodell Prozess des Produktionssystemkonzepts. Dieser ist über die zu erfüllende Montagefunktion beschrieben (vgl. Kap. 6.4.1). Die von der Bauteilverbindung an den Prozessschritt gestellten Anforderungen leiten sich aus den Partialmodellen Anforderungen, Wirkstruktur und Gestalt der Prinziplösung des Produkts ab (vgl. Kapitel 2.6.1). Den Kern bilden die Verbindungseigenschaften (vgl. Kap. 6.1.4), die im Partialmodell Wirkstruktur oder Gestalt spezifiziert sind²¹. Die aus den Verbindungseigenschaften resultierenden Anforderungen werden durch weitere Anforderungen aus dem gleichnamigen Partialmodell ergänzt. Beispiele sind Angaben zur Taktzeit, der Verbindungsqualität, den zulässigen Montagekosten oder der Mitarbeiterqualifikation. Für die Ermittlung weiterer Anforderungen an die Verbindung existieren Checklisten²². Diese beschreiben verbindungsrelevante Faktoren, die ggf. zu ergänzen sind. Als Resultat liegen die gestellten Verbindungsanforderungen vor. Bild 6-32 zeigt diese am Beispiel der Verbindung von *Sitzrohr* und *E-Träger*.

²¹ Dies ist von der Art der verwendeten Gestaltbeschreibung abhängig (vgl. Kap. 6.1.2).

²² Eine Übersicht verfügbarer Checklisten gibt [VDI2232, S. 15] (siehe Anhang Tabelle A-1).

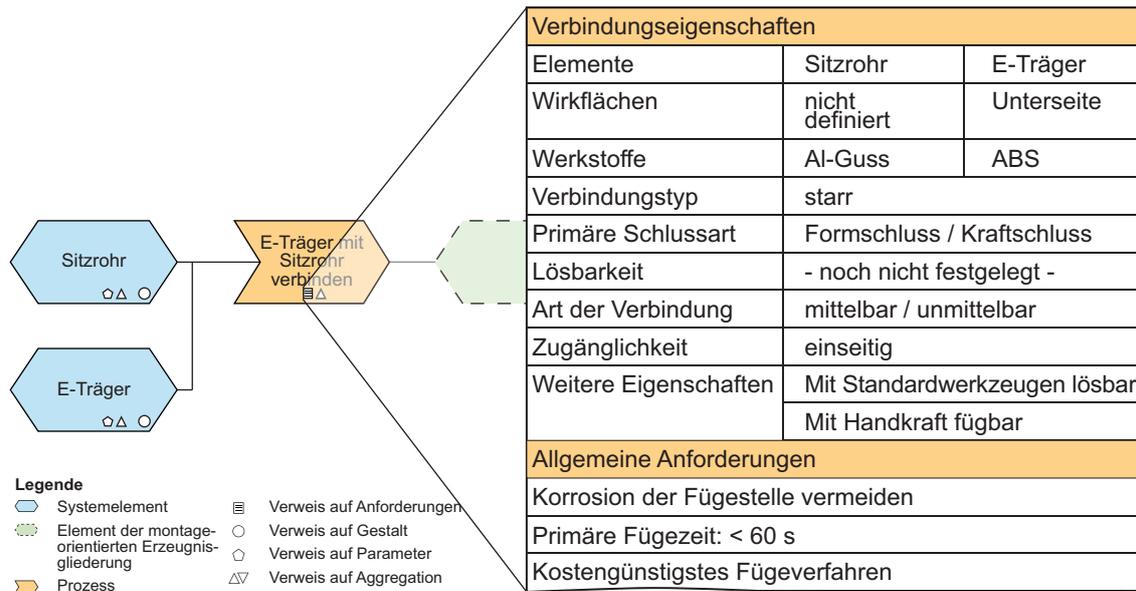


Bild 6-32: Verbindungsanforderungen der Verbindung Sitzrohr – E-Träger

6.4.4.2 Identifikation geeigneter Montageverfahren

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes sind geeignete Montageverfahren zur Erfüllung der gestellten Anforderungen. Den Verbindungsanforderungen werden die Eigenschaften vorhandener Montageverfahren gegenübergestellt [VDI2232, S. 7f.]. Der Abgleich der geforderten und der realisierbaren Eigenschaften ermöglicht die Identifikation geeigneter Montageverfahren bzw. Verfahrensklassen. Geeignete Hilfsmittel sind Konstruktionskataloge z. B. nach ROTH [Rot01] und zugehörige Datenbanken, Prozessauswahlmatrizen und -diagramme nach ASHBY [Ash07, S. 197ff.], Auswahlmatrizen für Fügeverfahren nach SWIFT/BOOKER [SB03, S. 31ff.] sowie Schrifttum [VDI2232, S. 8f.]. Einige Beispiele sowie eine Übersicht verfügbarer Konstruktionskataloge sind im Anhang erläutert (siehe Anhang Kap. A2). Die Auswahl kann durch unternehmensspezifische Technologiedokumentationen und Recherchen (Internet, Herstellerkataloge, Messen) ergänzt werden.

Eine effiziente Zuordnung von Montageverfahren zu Montageprozessen bzw. Bauteilverbindungen wird erst durch eine IT-technische Unterstützung möglich. Die Montageverfahren werden in einer hierarchischen Gliederung strukturiert. Hierbei wird für Fügeverfahren auf die Gliederung der DIN 8593 [DIN8593-0, S. 5] (siehe Anhang Bild A-20), für Verfahren des Handhabens und des Kontrollierens auf die Gliederung der VDI-Richtlinie 2860 [VDI2860, S. 4] (siehe Anhang Bild A-21) sowie für die Justierverfahren auf die Gliederung nach SPUR ET AL. [SH86, S. 592] (siehe Anhang Bild A-22) zurückgegriffen. Analog zu den Verbindungseigenschaften (vgl. Kap. 6.1.4) werden den einzelnen Montageverfahren Eigenschaften zugeordnet. Die Verknüpfung von Montageverfahren und Verbindungseigenschaften kann über semantische Beziehungen erfolgen und bspw. in Form einer Ontologie umgesetzt werden. In der Ontologie werden die

in einer Datenbank gespeicherten Informationen strukturiert. Hierdurch werden die Informationen maschinenlesbar und der Montageplaner kann bei der Auswahl geeigneter Montageverfahren unterstützt werden²³ [GBK10, S. 349f.]. Weiterhin ist eine Anbindung bestehender Datenbanken möglich²⁴. Bild 6-33 zeigt beispielhaft die Zusammenhänge von Montageverfahren und Verbindungseigenschaften.

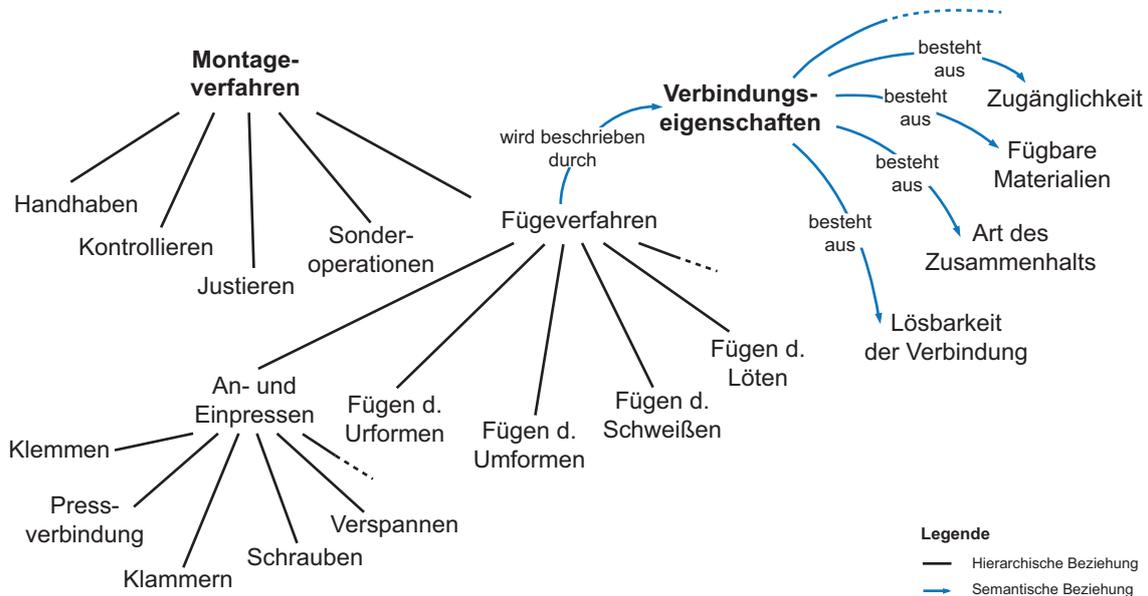


Bild 6-33: Beispielhafte Darstellung der Zusammenhänge von Montageverfahren und Verbindungseigenschaften [GBK10, S. 350]

Beispiele für Verbindungseigenschaften sind geeignete Materialien, *Art des Zusammenhalts*, *Zugänglichkeit der Fügestelle*, *Reproduzierbarkeit*, *Automatisierbarkeit*, *Fügedauer*, *Fügeenergie* oder *Verbindungskosten* (vgl. [Gai81, S. 32f.]). Weiterhin werden den Montageverfahren technologisch bedingte Vor- und Nachbehandlungen zugeordnet, z. B. die Reinigung vor einem Klebprozess oder Vorlochoperationen bei Zugdornnietverbindungen. Die Montageverfahren werden in Form von Steckbriefen beschrieben. Der Aufbau orientiert sich an den Technologiesteckbriefen für Fertigungstechnologien nach ASHBY [Ash07, S. 210] und wurde auf die Gegebenheiten von Montageverfahren angepasst. Bild 6-34 zeigt den Ausschnitt eines Steckbriefs. Der gesamte Steckbrief ist in Anhang zu finden (Anhang Bild A-24).

Es kann vorkommen, dass nicht alle Verbindungsanforderungen durch ein einzelnes Montageverfahren erfüllt werden. Ein Beispiel ist die Dichtheit einer lösbaren Verbindung. Abdichtende Verfahren wie Schweißen und Kleben kommen nicht in Frage. Mögliche Lösungen sind das Einbringen einer Dichtmasse im Fügeprozess oder die kon-

²³ Vgl. Arbeiten im Verbundprojekt ENTIME [GSA+11]

²⁴ Eine Übersicht verfügbarer Datenbanken und Datensammlungen im Bereich fester Verbindungen ist in [VDI2232, S. 71] gegeben.

struktive Integration eines Dichtelements. Die zusätzlich erforderlichen Prozessschritte werden zu einer Technologiekette ergänzt. In Abhängigkeit der gewählten Kerntechnologie ergeben sich alternative Technologieketten [Fal00, S. 59].

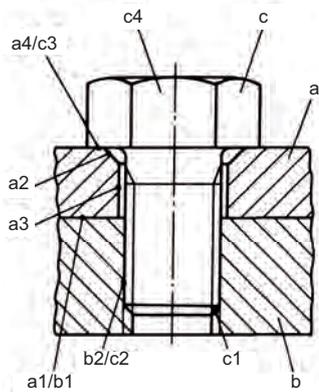
Schrauben (Anschrauben, Einschrauben, Verschrauben, Festschrauben)		
Beschreibung	Prinzipiskizze	
Fügen durch Anpressen mittels selbsthemmenden Gewindes.	 <ul style="list-style-type: none"> • Zu verbindende Teile: Verbindungspartner a, b • Verbindungsmittel: Schraube c • Wirkflächen <ul style="list-style-type: none"> - c4 für Werkzeug zur M&D - a2, c1 Fase zum leichten Fügen - b2, c2 Bewegungsgewinde bei M&D • Wirkflächenpaare 	
Verfahrensklasse nach [DIN8580], [DIN8593]		
<ul style="list-style-type: none"> • Hauptgruppe 4 Fügen • Gruppe 4.3 Anpressen / Einpressen • Untergruppe 4.3.1 Schrauben 		
Werkstoffklassen		Gestaltklassen
<ul style="list-style-type: none"> • Metalle • NE-Metalle • Kunststoffe • Holz 		<ul style="list-style-type: none"> • Prismatisch • Blech • 3-dimensional
Verbindungseigenschaften		
<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungstyp starr • Primäre Schlussart Kraftschluss 		

Bild 6-34: Technologiesteckbrief für ein Montageverfahren nach ASHBY [Ash07, S. 210]²⁵ (Ausschnitt)

6.4.4.3 Bewertung und Auswahl

Nach der Identifikation geeigneter Montageverfahren liegt meist nicht eine einzelne mögliche Lösung vor. In der Regel ergeben sich verschiedene alternative Lösungskonzepte, die sich hinsichtlich Prozessreihenfolge und den eingesetzten Montageverfahren unterscheiden. Bild 6-35 zeigt beispielhaft zwei verschiedene Prozessketten für die Montage der Bauteile *E-Träger* und *Sitzrohr*. Je nach Anzahl der alternativen Prozesskombinationen ist eine Einschränkung des Lösungsraums ratsam. Hierdurch können die Komplexität und der Aufwand im weiteren Verlauf der Produktentstehung reduziert werden. Alternativ ist es natürlich auch möglich, die maximale Anzahl der Prozessalternativen weiter zu verfolgen.

²⁵ Vgl. auch [VDI2232, S. 4.], [DIN8593-3, S. 3].

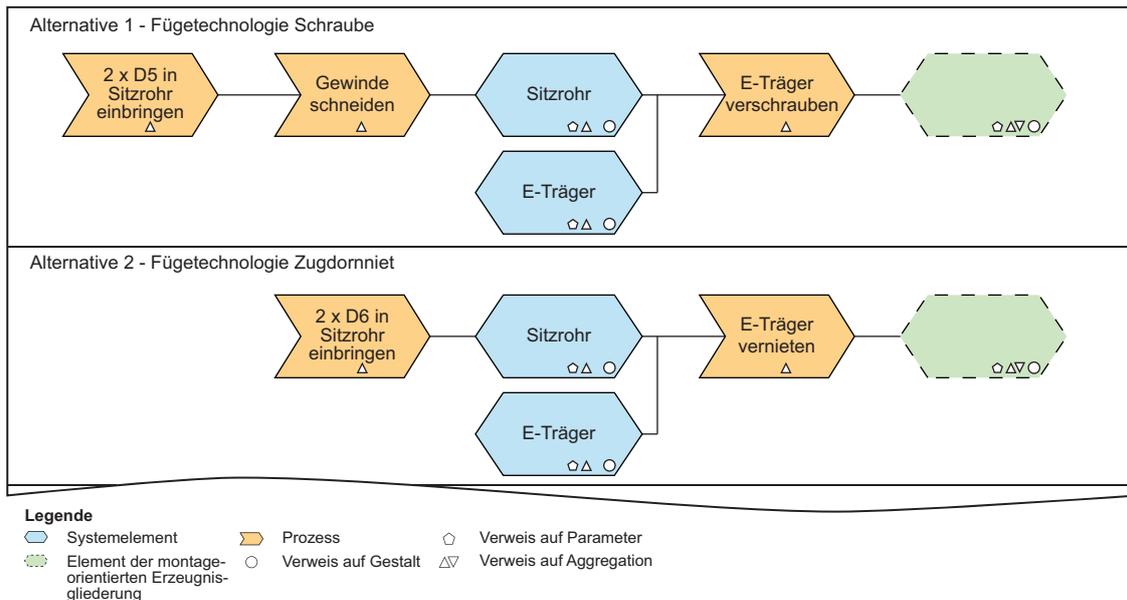


Bild 6-35: Alternative Prozesskombinationen am Beispiel der Montage des E-Trägers

Die Bewertung und Auswahl der alternativen Montageprozesse orientiert sich am Vorgehen zur Bewertung prinzipieller Lösungsvarianten mittels der Nutzwertanalyse nach PAHL/BEITZ [PBF+07, S. 268ff.] (vgl. [Nor12, S. 130]). Alle entwickelten Konzepte erfüllen die rein technischen Anforderungen. Für die Bewertung sind daher auch nicht-technische Kriterien heranzuziehen (z. B. Kosteneffekte, erforderliche Mitarbeiterqualifikationen). Ein geeignetes Mittel für die Bewertung in der frühen Phase der Produktentstehung sind die Methoden und Werkzeuge der strategischen Technologieplanung, bspw. Technologie-Roadmaps oder Technologieportfolios. Hierdurch wird sichergestellt, dass Produkt und Montageprozess entsprechend der langfristigen Technologiestrategie des Unternehmens entwickelt werden. Die strategische Technologieplanung steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Entsprechende Vorgehensweisen sowie Methoden und Werkzeuge finden sich in der einschlägigen Fachliteratur²⁶. Weitere Methoden zur Bewertung der Prozessalternativen sind das Methods-Time Measurement (MTM), die Montagekostenbewertung nach BOOTHROYD ET AL. [PL11, S. 232] oder die Herstellkostenbewertung nach LANZA ET AL. Die detaillierte Beschreibung der Methoden findet sich in der zugehörigen Fachliteratur²⁷.

Die Auswahl des Fügeverfahrens muss in enger Abstimmung erfolgen, da ein direkter Einfluss auf die Produktentwicklung besteht. Die gewonnenen Informationen fließen in die Produktentwicklung ein, in deren Rahmen die Verbindung detailliert und ausgelegt wird. Weiterhin werden die notwendigen Formelemente definiert.

²⁶ Siehe z. B. [AG05], [Ger05], [MI05], [GPW09], [SK10]

²⁷ Siehe MTM: [AHK69] / Montagekosten: [BDK11] / Herstellkosten: [NGL+10, S. 1ff.], [LBP12, S. 153ff.]

6.4.4.4 Konkretisierung der Prozesskette

In den vorangegangenen Schritten wurden für die Prozessschritte geeignete Montageverfahren ausgewählt. Hierbei kann es sich um einzelne Verfahren oder erste Prozessketten handeln. In diesem Schritt wird das Partialmodell Prozesse ergänzt. In Bild 6-36 ist dies am Beispiel der Montage des *E-Trägers* dargestellt.

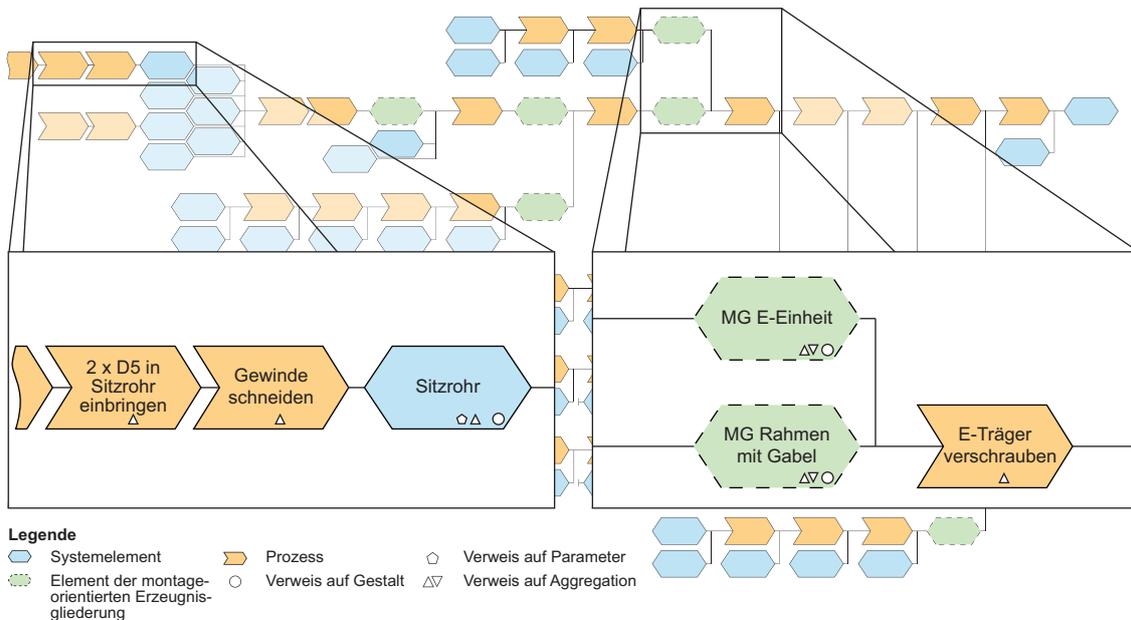


Bild 6-36: Konkretisierung des Montageprozesses am Beispiel des *E-Trägers*

Wie im gezeigten Beispiel zu sehen ist, kann es zu einer Aufteilung der Prozesskette kommen. Als Fügeverfahren wurde das Schrauben gewählt. Dies erfordert eine Vorlochoperation und die Erzeugung eines Gewindes. Das Gewinde wird in das *Sitzrohr* der Montagegruppe *MG Rahmen* eingebracht. Dies erfolgt jedoch nicht direkt vor dem Schraubprozess sondern im Rahmen der Bearbeitung des Sitzrohrs vor dem Fügevorgang des Rahmens.

6.4.4.5 Anpassung der Prinziplösung / Verfahrensentwicklung

Bei der Suche nach Montageverfahren kann es durchaus vorkommen, dass zu den gestellten Verbindungsanforderungen kein geeignetes Montageverfahren gefunden wird. Es ist zu prüfen, ob Anpassungen der Prinziplösung möglich sind und ob dadurch bestehende Montageverfahren genutzt werden können. Weiterhin ist abzuschätzen, ob der Anstoß einer Verfahrensentwicklung unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist.

6.4.5 Ableitung von Produktrestriktionen

Durch die Auswahl der Montageverfahren und die Bildung von Prozessketten ergeben sich Restriktionen für das zu entwickelnde Produkt. Dies gilt insb. für die Wahl der Fügeverfahren, die bspw. einen großen Einfluss auf die Materialpaarung und die Gestalt der Fügestelle haben. Zum Beispiel besteht die Montagegruppe *MG Rahmen* aus mehreren Bauteilen, welche durch ein einheitliches Fügeverfahren verbunden werden sollen. Als Rahmenwerkstoff stehen Aluminium, Stahl und faserverstärkter Kunststoff zur Auswahl. Die möglichen Fügeverfahren sind Schweißen, Löten und Kleben. Das Fügeverfahren hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Produktgestalt. Beim Löten werden die Rohre gerade abgelängt und mit Hilfe von Muffen verbunden. Im Fall des Schweißens werden die Rohre im Stumpfstoß gefügt. Die Rohrenden müssen entsprechend der Stoßkontur ausgeschnitten werden. Der Einsatz eines Klebeverfahrens erfordert Klebeflächen, welche bzgl. Dimensionierung und Ausrichtung auf die Belastung anzupassen sind. Im gezeigten Beispiel kommt das Schweißen zum Einsatz.

Die aus der Fertigung und Montage resultierenden Restriktionen an das Produkt werden heute in Form generischer Gestaltungsrichtlinien dokumentiert. Diese Hinweise für die Produktentwicklung werden in der Regel als Kombination aus bildhaften und semantischen Informationen beschrieben (Bild 6-37). Für die füge- und montagegerechte Gestaltung²⁸ existiert in der Fachliteratur eine Vielzahl von Arbeiten. Da die montagegerechte Gestaltung des Produkts nicht im Fokus dieser Arbeit steht, sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur²⁹ verwiesen.

Gestaltungsregeln Kleben		
ungünstig	günstig	Beschreibung
<p>Zugbelastung Klebschicht reißt auf</p>	<p>Abscherung</p>	<p>Klebeverbindungen sollten stets flächig und im Idealfall überlappend ausgeführt sein. Die Überlappungslänge sollte mindestens das 5-fache der Fügeteildicke betragen. Stumpfe Verbindungen sind als ungünstig zu bewerten.</p>

Bild 6-37: Gebräuchliche Darstellung von Richtlinien zur montagegerechten Gestaltung [KPP+06, S. 485]

²⁸ Auch als Design for Assembly (DfA) bezeichnet oder unter Design for Manufacture and Assembly (DfMA) subsummiert.

²⁹ Siehe z. B. [Gai81], [AKL85], [Hes94], [BDK11], [HB11].

Die effiziente Nutzung und Bereitstellung der Gestaltungsrichtlinien erfordert eine Rechnerunterstützung. Die Richtlinien müssen an die Montageverfahren gekoppelt werden, so dass dem Entwickler in Abhängigkeit von dem gewählten Verfahren bedarfsgerecht die passenden Richtlinien zur Verfügung gestellt werden. Ein geeignetes Mittel für die Identifikation und Bereitstellung der Gestaltungsrichtlinien ist die von BAUER entwickelte Datenbank [Bau07, S. 6f.], [Bau09, S. 103f.] (vgl. Kap. 3.5.2). Die Kopplung von Montageverfahren und Gestaltungsrichtlinien erfolgt über die definierten Merkmale der Gestaltungsrichtlinien. Hierbei kann es sich bspw. um ein konkretes Verfahren bzw. eine Verfahrensklasse, betroffene Werkstoffe oder die Lösbarkeit einer Verbindung handeln. Die Kopplung kann durch eine Erweiterung der Ontologie realisiert werden (vgl. Kap. 6.4.4.2). Wird für einen Montageprozess ein Montageverfahren ausgewählt, ermöglicht die Datenbank auf Basis der Merkmale die Identifikation der zugehörigen Gestaltungsrichtlinien. Die Bereitstellung der identifizierten Gestaltungsrichtlinien erfolgt über eine Zuordnung zu den Bauteilen und Baugruppen in der Prinziplösung. Bild 6-38 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

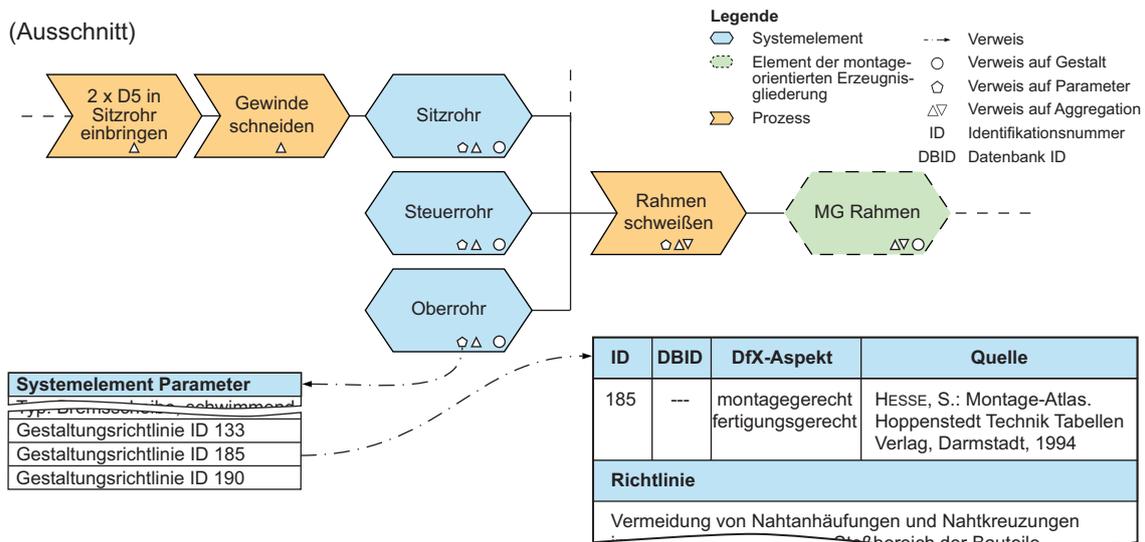


Bild 6-38: Zuordnung von Gestaltungsrichtlinien zu den Bauteilen und Baugruppen der Prinziplösung

Im gezeigten Beispiel wurde als Rahmenwerkstoff Aluminium und als Fügeverfahren WIG-Schweißen gewählt. Für die Verfahrensklasse Schweißen liegt eine Vielzahl von Gestaltungsrichtlinien vor. Diese werden über einen Querverweis mit den betroffenen Systemelementen der Prinziplösung verknüpft. Hierdurch wird eine bedarfsgerechte Bereitstellung der Gestaltungsrichtlinien im weiteren Entwicklungsprozess ermöglicht. Der Produktentwickler bekommt bei der Konkretisierung eines Systemelements bzw. von dessen Gestalt die zugewiesenen Gestaltungsrichtlinien angezeigt. Weiterhin wird eine transparente Nachverfolgbarkeit der Entscheidungen hinsichtlich Gestalt und Montageverfahren ermöglicht. Wird ein Montageverfahren geändert, werden die verknüpften Gestaltungsrichtlinien automatisch aktualisiert. Änderungsbedarfe in der Gestaltfestlegung können so einfacher aufgezeigt werden.

6.5 Konzipierung des Montagesystems

Im Anschluss an die Konzipierung des Montageprozesses erfolgt die Konzipierung des zugehörigen Montagesystems. Unter Montagesystem werden hierbei die Ressourcen verstanden, d. h. die Arbeitsmittel und das Personal, welche für die Ausführung der Prozesse benötigt werden [DIN69901-5, S. 17]. Durch die Auswahl von Ressourcen kann bereits in der Konzipierung eine grobe Vorstellung des Produktionssystems erzeugt werden, bspw. über Materialflüsse, Raumbedarfe und Anordnungen. Weiterhin kann die Integration des Produktionssystems in bestehende Produktionsbereiche geplant und abgeschätzt werden. Das Vorgehen erfolgt in zwei Schritten und ist in Bild 6-39 beschrieben. Zunächst werden geeignete Betriebsmittel und Personal ausgewählt und den einzelnen Prozessschritten zugewiesen. Dies erfolgt im Partialmodell Ressourcen. Anschließend werden Gestaltinformationen (z. B. Abmessungen, Arbeitsräume) und die Anordnung der Ressourcen im Partialmodell Gestalt spezifiziert (vgl. Kap. 2.6.1).

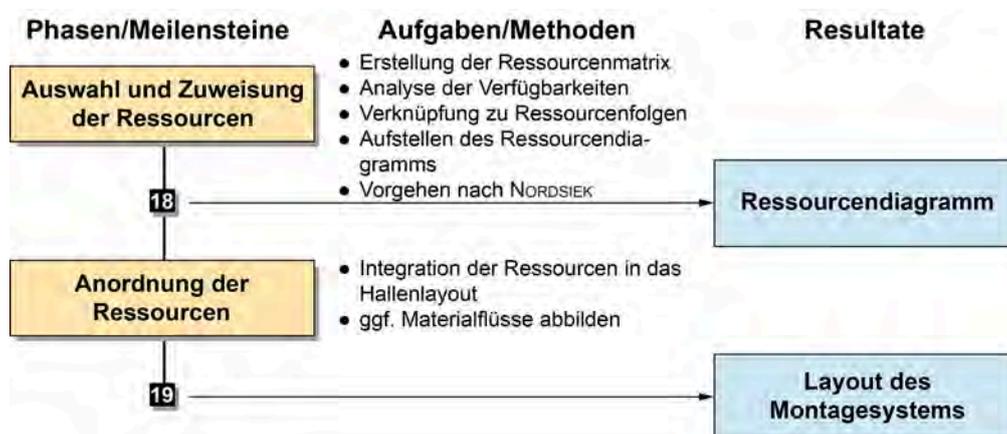


Bild 6-39: Vorgehen zur Konzipierung des Montagesystems

6.5.1 Auswahl und Zuweisung der Ressourcen

Das Vorgehen zur Auswahl und Zuweisung der Ressourcen eines Montagesystems unterscheidet sich nicht von dem Vorgehen bei der Auswahl von Fertigungseinrichtungen. Aus diesem Grund kommt in der vorliegenden Arbeit das Vorgehen zur Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK zum Einsatz [Nor12, S. 131ff.]. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Schritte, die im Folgenden am Anwendungsbeispiel kurz beschrieben werden. Ein Phasen-Meilenstein-Diagramm der Teilschritte findet sich im Anhang (siehe Anhang Bild A-25), eine detaillierte Beschreibung in [Nor12, S. 131ff.].

6.5.1.1 Analyse der Eingangsinformationen

Im ersten Schritt werden die erforderlichen Informationen ermittelt. Diese gliedern sich nach TROMMER in die Klassen Bauteil, Produktionsaufgabe und Produktionsumgebung [Tro01, S. 50f.]. Informationen zum **Bauteil** sind Angaben zu Abmessungen, dem Werkstoff oder der Masse. Sie werden aus dem Partialmodell Gestalt entnommen. Die

Produktionsaufgabe beschreibt die einzusetzenden Technologien und Verfahren. Diese Informationen werden aus dem Prozessdiagramm entnommen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass während der Konzipierung häufig mehrere Technologiealternativen betrachtet werden. Die Klasse **Produktionsumgebung** umfasst sämtliche Informationen über die verfügbaren Ressourcen, d. h. die im Unternehmen zur Verfügung stehenden Betriebsmittel und das Personal. In den eingesetzten Enterprise Resource Planning (ERP) oder Manufacturing Execution System (MES) sind diese Informationen im Unternehmen vorhanden.

Die Zusammenhänge sind in Bild 6-40 dargestellt. Der Ressourcenbedarf wird über die Klassen Bauteil und Produktionsaufgabe beschrieben. Die Produktionsumgebung stellt das Ressourcenangebot dar. Auf Basis dieser Eingangsinformationen sind der Bedarf und das Angebot aufeinander abzustimmen.

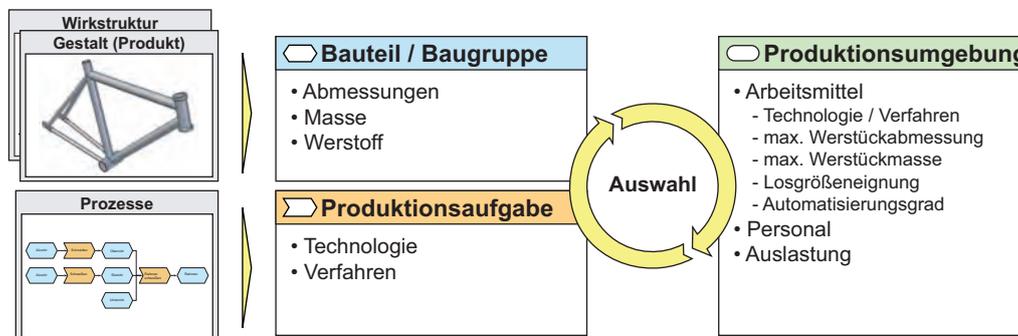


Bild 6-40: Eingangsinformationen für die Ressourcenzuordnung nach [Nor12, S. 133]

6.5.1.2 Erstellen von Ressourcenmatrizen

Auf Grundlage der Eingangsinformationen wird eine Morphologie von Ressourcen aufgebaut. In Anlehnung an TROMMER erfolgt die Abbildung in Matrixform [Tro01, S. 60]. Für jeden Prozessschritt im Arbeitsablauf werden geeignete Ressourcen identifiziert und in der Matrix aufgenommen (Bild 6-41). Kann zu einem Prozessschritt keine geeignete Ressource identifiziert werden, muss eine Abstimmung mit der Produktentwicklung erfolgen. Es wird geprüft, ob der Prozessschritt oder die Bauteile so angepasst werden können, dass eine Ressource aus der Produktionsumgebung genutzt werden kann. Ist dies nicht möglich, muss der entsprechende Prozessschritt ausgelagert werden oder es ist in neue Ressourcen zu investieren.

6.5.1.3 Analyse der Verfügbarkeit

In der vorangegangenen Erstellung der Ressourcenmatrix wurde nur die technologische Eignung der Ressourcen betrachtet. In diesem Schritt wird die Verfügbarkeit in die Betrachtung mit einbezogen. Dieser ergibt sich aus der bisherigen Auslastung und dem zu erwartenden Produktionsprogramm des neuen Produkts. In Folge der Verfügbarkeits-

analyse kann es zu einer Reduzierung der Anzahl der alternativen Ressourcen in der Ressourcenmatrix kommen.

6.5.1.4 Verknüpfung zu Ressourcenfolgen

Für die einzelnen Prozessschritte werden aus der Menge der geeigneten und verfügbaren Ressourcen in der Ressourcenmatrix ausgewählt (Bild 6-41). Ihre Verkettung wird als Ressourcenfolge bezeichnet. Die grundsätzlichen Ziele sind hierbei kurze Materialflusswege, eine geringe Anzahl von Werkstückübergaben und ein hoher Automatisierungsgrad [Tro01, S. 60f.].

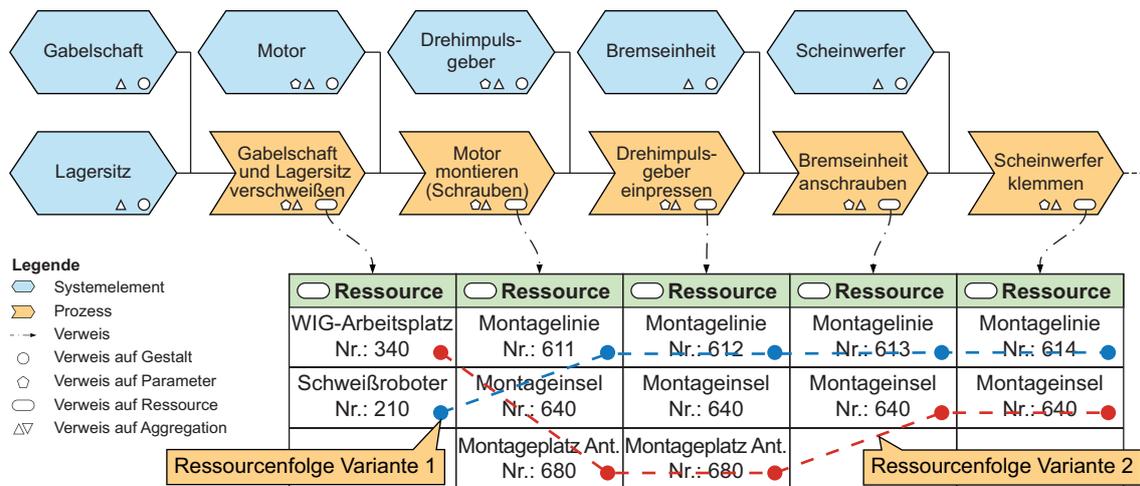


Bild 6-41: Bildung von Ressourcenfolgen

6.5.1.5 Aufstellen des Ressourcendiagramms

Auf Basis der getroffenen Auswahl wird das Partialmodell Ressourcen erstellt. In diesem werden die Ressourcen spezifiziert und durch Materialflüsse verknüpft. Die Materialflüsse zwischen den Ressourcen ergeben sich aus der Abfolge der Prozessschritte. In Bild 6-42 ist ein Ausschnitt des Ressourcendiagramms für das Anwendungsbeispiel Pedelec dargestellt. Im Verlauf der weiteren Konzipierung des Produktionssystems wird das Ressourcendiagramm detailliert und konkretisiert.

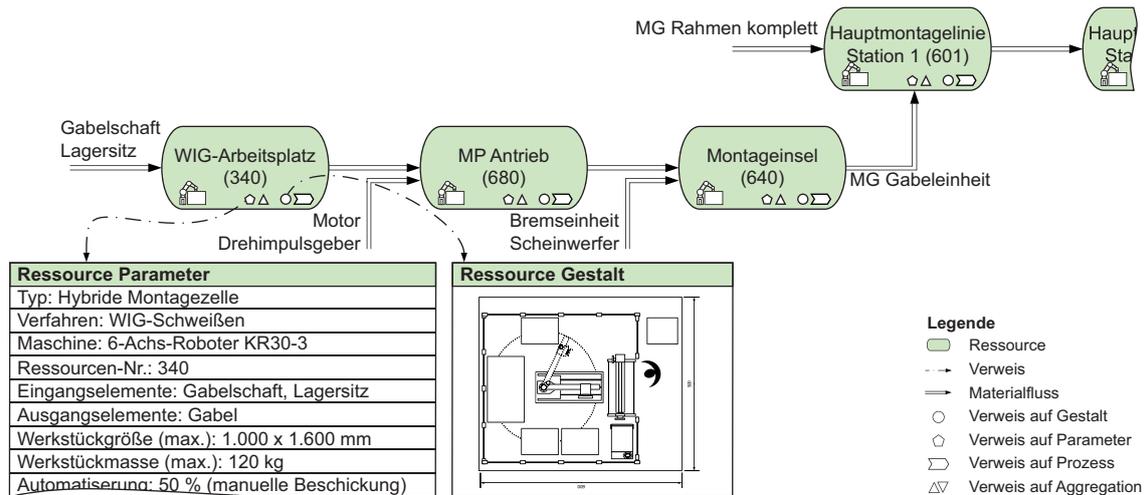


Bild 6-42: Ressourcendiagramm des Produktionssystems für das Pedelec (Ausschnitt)

6.5.2 Anordnung der Ressourcen

Das Ziel dieser Phase ist ein Groblayout des Montagesystems. Den Ausgangspunkt bilden die Gestaltinformationen der einzusetzenden Ressourcen. Häufig ist das Montagesystem in ein bestehendes Fabrikgebäude bzw. ein bestehendes Produktionssystem zu integrieren. In diesem Fall sind die Ressourcen im Hallenlayout anzuordnen. Restriktionen bestehen hierbei bspw. durch Betriebsmittel anderer Produktionssysteme, bestehende Fahrwege und Lagerflächen oder die Medienversorgung.

Der Detaillierungsgrad der Gestaltinformationen der Ressourcen ist in der frühen Phase noch sehr unterschiedlich. Werden bestehende Ressourcen genutzt bzw. handelt es sich bei neu zu beschaffenden Ressourcen um „Standard“-Maschinen (z. B. Werkzeugmaschinen) liegen detaillierte Gestaltinformationen vor. Im Fall von produktspezifisch anzufertigenden Betriebsmitteln (z. B. ein Roboterkarussell für die vollautomatische Rahmenfertigung) können Gestaltinformationen wie Platzbedarf und Arbeitsraum in der frühen Phase meist nur sehr grob abgeschätzt werden. Andererseits kann auch aus dem Hallenlayout der maximal zur Verfügung stehende Raum für solche Betriebsmittel abgeleitet werden. Die Ressourcen werden im Hallenlayout positioniert. Die rechnerinterne Abbildung der Gestaltinformationen erfolgt im Partialmodell Gestalt (Produktionssystem) (vgl. Kap. 2.6.1). Bild 6-43 zeigt einen Ausschnitt des Groblayouts.

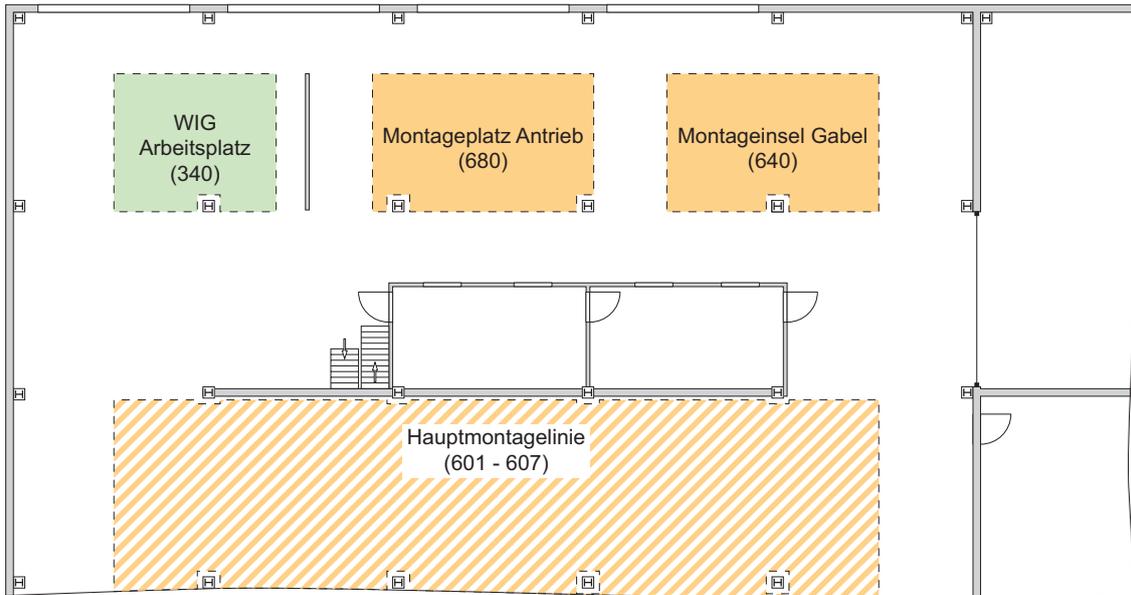


Bild 6-43: Layout des Montagebereichs des Pedelecs (Ausschnitt)

In den Arbeitsstationen im oberen Teil des Bildes erfolgt die Montage der Montagegruppe MG Gabeleinheit. Gabelschaft und Lagersitz werden am *WIG Arbeitsplatz (340)* verschweißt. Die Arbeitsumfänge der Ressource *Montageplatz Antrieb (680)* sind die Montage des Motors und des Drehimpulsgebers. Anschließend werden die Bremseneinheit und der Scheinwerfer an der *Montageinsel Gabel (640)* montiert. Die grundsätzlichen Abmessungen der Stationen sind aus der Montage konventioneller Laufräder bekannt. In der unteren Bildhälfte ist die Aufstellfläche für die *Hauptmontagelinie (601 – 607)* zu sehen. Für diese stehen noch keine detaillierteren Gestaltinformationen zu Verfügung. Auf Basis des Hallenlayouts wurde die maximal zur Verfügung stehende Fläche ermittelt.

Das so entstehende Groblayout lässt Rückschlüsse auf Materialflüsse zu. Hieraus können die notwendigen Handhabungsschritte und die dafür notwendigen Betriebsmittel abgeleitet werden. Weiterhin bildet das Groblayout den Ausgangspunkt für die Arbeitsmittel- und Arbeitsstättenplanung.

6.6 Bewertung der Anforderungserfüllung der Systematik

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist der Lückenschluss zwischen der Produktkonzipierung und der Konzipierung des Produktionssystems. Hierzu wurde eine *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* erarbeitet. Die Systematik erfüllt die an sie gestellten Anforderungen (vgl. Kap. 2.8) vollumfänglich. Im Folgenden wird dies erläutert.

A1) Anwendbarkeit in der Mechatronik: Den Ausgangspunkt der Methodik bildet die Prinziplösung des mechatronischen Systems. Bei der montageorientierten Strukturierung werden sowohl bauliche Beziehungen als auch Informations- und Energieflüsse berücksichtigt (vgl. Kap. 6.3.2). Die integrierten Methoden für die Bestimmung der Montagetechnologien sowie die zugrunde liegenden Datenbanken sind allgemein anwendbar und erweiterbar. Somit findet auch die für die Mechatronik wichtige Aufbau- und Verbindungstechnik Berücksichtigung (vgl. Kap. 6.4.4).

A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme: Die Systematik beginnt mit der Konzipierung der Produktgestalt und somit im Rahmen der Konzipierung auf Systemebene. Parallel und in enger Abstimmung zur weiteren Konkretisierung des Produktkonzepts erfolgt die Konzipierung des Montagesystems. Aus diesem ergeben sich Restriktionen an die Produktgestalt, welche in den Produktentwicklungsprozess eingebracht werden (vgl. Kap. 5.3). Weiterhin nutzt die Systematik die Spezifikationstechnik CONSENS für die fachdisziplinübergreifende Beschreibung der Konzepte von Produkt und Produktionssystem (vgl. Kap. 2.6.1). Somit fügt sich die entwickelte Systematik nahtlos in die Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme ein.

A3) Prinziplösung als Ausgangspunkt: Die Systematik setzt bereits in der Phase der Konzipierung auf Systemebene ein (vgl. Kap. 5.3) und ermöglicht die Konzipierung der Produktgestalt (vgl. Kap. 6.1.1). Somit wird bereits die Erstellung der Prinziplösung unterstützt. Die enthaltenen Informationen bilden den Ausgangspunkt für die anschließende Konzipierung der Montage.

A4) Frühzeitige Spezifikation der Produktgestalt: Die Prinziplösung umfasst bereits erste geometrische Festlegungen. Für die Spezifikation der Produktgestalt bietet die Systematik ein allgemeinverständliches Beschreibungsmittel (vgl. Kap. 6.1.1). Weiterhin wird die Formalisierung von Bauzusammenhängen (vgl. Kap. 6.1.3) sowie deren detaillierte Beschreibung unterstützt (vgl. Kap. 6.1.4), welche die Eingangsinformationen für die montageorientierte Produktstrukturierung bilden.

A5) Frühzeitige montageorientierte Produktstrukturierung: Den Ausgangspunkt für die Konzipierung der Montage bildet die montageorientierte Produktstruktur. Das Montagekonzept ist in der Regel nach entwicklungsrelevanten Aspekten strukturiert, daher umfasst die Systematik eine Methode für die montageorientierte Produktstrukturierung (vgl. Kap. 6.3). Diese nutzt die in der Wirkstruktur und Gestalt enthaltenen Informationen für die Gliederung des Systems in (Vor-)Montagegruppen. Aufgrund der formalen Beschreibung der Partialmodelle im Mechatronic Modeller ist eine Teilautomatisierung des Vorgehens möglich. Hierdurch kann die Strukturierung sehr effizient und aufwandsarm durchgeführt werden.

A6) Auswahl von Montagetechnologien: Die Systematik stellt eine Methode für die frühzeitige Auswahl von Montageverfahren und -technologien zur Verfügung (vgl. Kap. 6.4.4). Diese ermöglicht ausgehend von Verbindungsanforderungen die Identifika-

tion und Auswahl geeigneter Verfahren. Die Datenbasis bilden bestehende Kataloge und Datenbanken sowie Auswahl diagramme und -matrizen.

A7) Berücksichtigung montagetechnischer Restriktionen: Bei der integrativen Konzipierung der Montage müssen die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Montage beidseitig berücksichtigt werden. Die Systematik unterstützt daher die Ableitung von Restriktionen an das Produktkonzept. Diese ergeben sich auf Grundlage der gewählten Montageverfahren und werden in Form von Gestaltungsrichtlinien dem Produktentwickler bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt (vgl. Kap. 6.4.5).

A8) Ganzheitliche Konzipierung der Montage: Die Systematik ermöglicht die ganzheitliche Konzipierung der Montage. Hierfür wird die Montageablaufstruktur in Form von Montageprozessketten beschrieben (vgl. Kap. 6.4). Methoden ermöglichen die Identifikation und Auswahl geeigneter Montageverfahren (vgl. Kap. 6.4.4) und die Grobbeschreibung des Montagesystems erfolgt auf Basis des Ressourcendiagramms (vgl. Kap. 6.5). Es werden somit alle relevanten Aspekte berücksichtigt.

A9) Nutzung eines disziplinübergreifenden Beschreibungsmittels: Im Rahmen der Systematik wird die Spezifikationstechnik CONSENS für die fachdisziplinübergreifende Beschreibung von Produkt- und Montagekonzept verwendet (vgl. Kap. 5.4.2). Somit wird in den Bereichen Produktentwicklung und Montageplanung eine einheitliche Notation verwendet. Hierdurch wird die Kooperation der beteiligten Fachleute unterstützt und die Koordination der durchzuführenden Tätigkeiten verbessert.

A10) Systematische Vorgehensweise: Der Kern der Systematik ist ein detailliertes Vorgehensmodell, welches als Leitfaden für die integrative Konzipierung der Montage dient (vgl. Kap. 5.3 und 5.4.1). Die Hauptphasen sind *Konzipierung der Produktgestalt* (vgl. Kap. 6.1), *Planen und Klären der Montageaufgabe* (vgl. Kap. 6.2), *montageorientierte Produktstrukturierung* (vgl. Kap. 6.3), *Konzipierung des Montageprozesses* (vgl. Kap. 6.4) und *Konzipierung des Montagesystems* (vgl. Kap. 6.5). Den Ausgangspunkt bildet ein erstes Produktkonzept auf Systemebene. Auf dieser Grundlage wird die Produktgestalt spezifiziert und die Bauzusammenhänge werden konkretisiert. Sie bilden die Grundlage für die montageorientierte Strukturierung des Produkts in Montagegruppen. Anschließend wird das Montagekonzept auf Prozessebene erarbeitet und es werden geeignete Montageverfahren ausgewählt. Aus den Montageprozessen und -verfahren ergeben sich Restriktionen, die in die Produktentwicklung zurückgespielt werden. Abschließend werden Betriebsmittel zur Realisierung der Prozesse ausgewählt und zum Montagesystem kombiniert. Das Vorgehen folgt somit einer zunehmenden Konkretisierung und Detaillierung. Am Beispiel der integrativen Entwicklung eines Pedelecs wurde die Anwendbarkeit des Vorgehens demonstriert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Heutige technische Erzeugnisse sind in der Regel mechatronische Systeme. Durch die Integration von Mechanik, Elektronik sowie Software- und Regelungstechnik ergeben sich weitreichende Möglichkeiten in der Gestaltung dieser Produkte. Beispiele sind die Miniaturisierung der Produkte, die Integration neuer Funktionen, autonomes Verhalten oder die Interaktion mehrerer Systeme. Gleichzeitig steigt jedoch die Komplexität dieser Produkte und der eingesetzten Produktionstechnologien. Durch die Vielzahl der beteiligten Fachdisziplinen kommt es weiterhin zu einer Steigerung der Komplexität und des Umfangs der zugrunde liegenden Entwicklungsprozesse.

Ein möglicher **Lösungsansatz** ist die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, bei der die Entwicklung fachdisziplinübergreifend, aufeinander abgestimmt und im engen Wechselspiel erfolgt. Dies gilt bereits für die frühe Phase der Konzipierung. Die integrative Vorgehensweise birgt die folgenden **Nutzenpotentiale**:

- Bereits in der Konzipierung wird die spätere Herstellung des Produkts berücksichtigt. Restriktionen und Gestaltungsmöglichkeiten durch Produktionstechnologien fließen frühzeitig in das Produktkonzept ein.
- Das abgestimmte Vorgehen reduziert das Risiko unnötiger Iterationsschleifen im weiteren Verlauf der Produktentstehung. Ein Beispiel sind Konstruktionsanpassungen infolge einer nicht montage- oder fertigungsgerechten Produktgestaltung. Kosten- und zeitintensive Produktanpassungen können somit vermieden werden.

Ein geeigneter Ausgangspunkt für die Erstellung des Produktionssystemkonzepts ist das erste Produktkonzept, die sog. Prinziplösung. Bereits in dieser frühen Phase können und müssen die Restriktionen durch die Produktionstechnik berücksichtigt werden. Die Schnittstelle zwischen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung bildet die Konzipierung der Montage, deren wesentlichen Bestandteile die montageorientierte Produktstruktur auf Seiten des Produkts sowie die darauf basierende Montageablaufstruktur als Teil des Produktionssystemkonzepts sind. Dieser Übergang ist bisher nur unzureichend konkretisiert. Die **Herausforderungen** liegen somit in der Verknüpfung der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme mit der Systematik zur Produktionssystemkonzipierung sowie die methodische Unterstützung dieses Übergangs.

Es wurde überprüft, ob bestehende Ansätze dieser Herausforderung gerecht werden. Defizite bestehen hier besonders bei der frühzeitigen Spezifikation der Produktgestalt, welche die wesentlichen Informationen für die Konzipierung der Montage enthält, sowie der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Montagekonzept. Häufig fokussieren die Ansätze lediglich Teilaufgaben der Montagekonzipierung. Die Analyse des Stands der Technik hat den **Handlungsbedarf** aufgezeigt, eine *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* zu entwickeln.

Die entwickelte **Systematik** schließt die Lücke zwischen der Produktkonzipierung und der Konzipierung des Produktionssystems. Hierbei bildet das Montagekonzept die Schnittstelle. Die Systematik erweitert die Entwicklungsmethodik für die integrative Konzipierung mechatronischer Systeme nach GAUSEMEIER ET AL. sowie die Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK. Für die Lösung von Teilaufgaben nutzt sie einige der untersuchten Ansätze, die auf die Besonderheiten der integrativen Montagekonzipierung angepasst und in die Systematik integriert wurden. Produktentwickler und Montageplaner werden bei der frühzeitigen und abgestimmten Entwicklung eines Montagekonzepts unterstützt, wobei jedoch nicht der Anspruch besteht, den gesamten Entwicklungsprozess zu automatisieren. Häufig wiederkehrende Tätigkeiten sollen teilautomatisiert unterstützt werden (z. B. die Vorauswahl geeigneter Montageverfahren), wodurch eine Fokussierung der beteiligten Fachleute auf die kreativen Tätigkeiten angestrebt wird. Die Bestandteile der Systematik sind ein Vorgehensmodell, Methoden und Werkzeuge sowie eine Spezifikationstechnik:

- Das **Vorgehensmodell** beschreibt detailliert die durchzuführenden Tätigkeiten bei der integrativen Konzipierung der Montage. Es verknüpft die erforderlichen Eingangsinformationen sowie die erzeugten Ausgangsinformationen und steuert den Einsatz der Methoden und Werkzeuge im Entwicklungsprozess.
- Für die Lösung von Teilaufgaben stehen **Methoden** und **Werkzeuge** bereit. Die zu unterstützenden Aufgaben im Rahmen der integrativen Konzipierung der Montage sind die montageorientierte Strukturierung und die Ableitung einer montageorientierten Erzeugnisgliederung, die Spezifikation von Verbindungseigenschaften, die Auswahl geeigneter Montageverfahren, die Erstellung einer Montageablaufstruktur sowie die Auswahl der benötigten Ressourcen.
- Für die frühzeitige integrative Beschreibung des Montagekonzepts kommt die **Spezifikationstechnik** CONSENS zum Einsatz. Sie ist auf die Besonderheiten der Montagekonzipierung angepasst und um die notwendigen Konstrukte erweitert.

Die Anwendbarkeit der Systematik wurde exemplarisch demonstriert. Als Beispiel diente die Entwicklung eines Elektrofahrrads, eines sog. Pedelecs. Das Vorgehen wurde vollständig durchlaufen und die entsprechenden Methoden und Werkzeuge eingesetzt. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Systematik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Der wesentliche **weitere Forschungsbedarf** liegt in der softwaretechnischen Unterstützung der entwickelten Systematik. Es bedarf IT-Werkzeuge zur effizienten Ausführung der Methoden sowie der Informationsspeicherung und -bereitstellung. Der wesentliche Handlungsbedarf besteht in folgenden Bereichen:

- **Erweiterung des Mechatronic Modeller:** Das im Verbundprojekt VireS entwickelte Modellierungswerkzeug setzt die Spezifikationstechnik CONSENS um und beschreibt die Prinziplösung rechnerintern als zusammenhängendes, formales Da-

tenmodell. Defizite weist der Mechatronic Modeller im Bereich der Produktionssystemkonzipierung auf. Die benötigten Informationen für die montageorientierte Produktstrukturierung sind im Datenmodell enthalten. Es besteht der Bedarf, die entsprechenden Methoden in den Mechatronic Modeller zu implementieren.

- **Planungssystem für die Auswahl neuer Montageverfahren:** Die effiziente Auswahl neuer Montageverfahren erfordert eine softwaretechnische Unterstützung. Mit Datenbanken, Normen, Katalogen etc. steht eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung, jedoch bedarf es eines Systems zur Unterstützung des Montageplaners bei der Identifikation und Auswahl geeigneter Verfahren auf Grundlage der Verbindungseigenschaften. Ein möglicher Ansatz sind wissensbasierte Systeme (WBS), die aus einer Wissensbasis zur Speicherung und Strukturierung von Fach- und Erfahrungswissen sowie einer Inferenzmaschine zur Verarbeitung des Wissens bestehen. Das WBS ermöglicht somit die Teilautomatisierung wiederkehrender Tätigkeiten in der Montagekonzipierung.
- **Methoden für die frühzeitige Analyse und Bewertung:** Die in der Konzipierungsphase vorliegenden Informationen sind in der Regel mit einer Unsicherheit behaftet. Diese kann nicht vernachlässigt werden und ist bei der Analyse und Bewertung von alternativen Lösungskonzepten zu berücksichtigen. Es bedarf daher Methoden für eine frühzeitige Analyse und Bewertung, die auf die Besonderheiten der integrativen Konzipierung der Montage angepasst sind und sich in die entwickelte Systematik integrieren. Beispiele sind die Bewertung der Montagezeiten, der Leistungsfähigkeit sowie die Abschätzung der Auswirkungen durch Konzeptänderungen.
- **Durchgängigkeit der Werkzeuge:** Die effiziente Anwendung der entwickelten Systematik kann nur durch eine durchgehende softwaretechnische Prozesskette erreicht werden. Die in den einzelnen Modellen enthaltenen Informationen müssen automatisiert ausgeleitet und für andere Methoden bereitgestellt werden. Daher sind geeignete Schnittstellen zwischen den Werkzeugen zu entwickeln, die eine Übernahme der Informationen und somit einer Teilautomatisierung der Methoden ermöglichen

Das Übergeordnete Ziel ist eine neue Schule des Entwurfs technischer Systeme, die den Herausforderungen in der Entwicklung moderner maschinenbaulicher Erzeugnisse begegnet. Dies soll dadurch erreicht werden, dass Produkt und Produktionssystem bereits von Beginn an integrativ entwickelt werden. Die entwickelte Systematik liefert einen Baustein auf dem Weg zu diesem Ziel.

8 Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
abzgl.	abzüglich
AWF	Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung (ehemals: Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung e.V.)
BF	Begrenzungsfläche
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
C&CM	Contact and Channel Model
CAD	Computer-Aided Design
CAP	Computer-Aided Planning
CAPP	Computer-Aided Process Planning
CDM	C&CM Dependency Matrix
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
d. h.	das heißt
DfA	Design for Assembly
DfM	Design for Manufacturing
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSM	Design Structure Matrix
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera
evtl.	eventuell

FEM	Finite-Elemente-Methode
FK	Funktionskontakt
ggf.	gegebenenfalls
i. d. R.	in der Regel
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
insb.	insbesondere
IT	Informationstechnik
Kap.	Kapitel
km/h	Kilometer pro Stunde
LSS	Leitstützstruktur
METUS	Methodische Unterstützung der Systembildung
MG	Montagegruppe
MID	Moulded Interconnect Devices
MIG	Module Interface Graph
Min.	Minuten
MKM	Münchener Konkretisierungsmodell
MTM	Methods-Time Measurement
NA	Normausschuss
NC	Numerical Control
Nr.	Nummer
PDM	Produktdatenmanagement
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PRIMA	Process Information Map
PS	Produktionssystem
PVA	Produkt, Vorgang, Anlage
RC	Robot Control
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (ehemals Verband für Arbeitsstudien e.V.)
RS	Reststruktur

sog.	sogenannt
Stck.	Stück
TS	Tragstruktur
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
W	Watt
WBS	Wissensbasiertes System
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

9 Literaturverzeichnis

Publikationen

- [ADFC09] ALLGEMEINER DEUTSCHER FAHRRAD-CLUB (BUNDESVERBAND) E.V.: ADFC-Information zu Pedelecs und E-Bikes – Was Sie wissen sollten und Sie ein gutes Elektro-Fahrrad finden. ADFC Bundesgeschäftsstelle, Bremen, 2009
- [AG05] ALBERS, S.; GASSMANN, O. (Hrsg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2005
- [AG13-01] ALIBABA GROUP: 24V 250W Nabenmotor für ein elektrisches Fahrrad. Unter: <http://de.aliexpress.com/item/24v-250w-mini-rear-hub-motor-for-electric-bicycle/511205741.html>, 10. Juni 2013
- [AHK69] ANTIS, W.; HONEYCUTT, J. M.; KOCH, E. N.: Die MTM-Grundbewegungen. Maynard, Düsseldorf, 1969
- [AKL83] ANDREASEN, M. M.; KÄHLER, S.; LUND, T.: Design for Assembly. IFS Publications Ltd, Springer-Verlag, Berlin, 1983
- [AKL85] ANDREASEN, M. M.; KÄHLER, S.; LUND, T.: Montagegerechtes Konstruieren. Springer-Verlag, Berlin, 1985
- [Ald09] ALDINGER, L. A.: Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes. Dissertation, Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2009
- [AM02] ALBERS, A.; MATTHIESEN, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Band 54 (2002), Nr. 7/8, 2002
- [Amm85] AMMER, E.-D.: Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung. Springer-Verlag, Berlin, 1985
- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [AR68] AWF – AUSSCHUSS FÜR WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG E.V.; REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil I – Arbeitsplanung. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin, 1968
- [ARV+12] ANDERL, R.; ROLLMANN, T.; VÖLZ, D.; NATTERMANN, R.; MALTZAHN, S.; MOSCH, C.: Virtuelle Produktentstehung. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Ash07] ASHBY, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design – Das Original mit Übersetzungshilfen. Elsevier, München, 2007
- [BA12] BRACHT, U.; ARNHOLD, D.: Produktionsprozessplanung auf Basis unscharfer Bedarfsprognosen – Robuste Produktionsplanung bei unsicheren und variantenreichen Produktausprägungen. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 102, Ausgabe 4, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2012
- [BA92] BOOTHROYD, G.; ALTING, L.: Design for Assembly and Disassembly. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 41, Issue 2, Elsevier, Oxford, 1992

- [BAD+86] BULLINGER, H. J. (Hrsg.); Ammer, D.; Dungs, K.; Seidel, U. A.; Weller, B.: Systematische Montageplanung – Handbuch für die Praxis. Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [Bar87] BARTHELMÄß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozessgestaltung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Springer-Verlag, Berlin, 1987
- [Bä87] BÄSSLER, R.: Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozess. Dissertation, Fakultät Fertigungstechnik, Universität Stuttgart, Springer-Verlag, 1987
- [Bau07] BAUER, S.: Konzept und Umsetzung eines Systems zur strukturierten Sammlung und Bereitstellung von DfX-Richtlinien. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X: Beiträge zum 18. Symposium. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2007
- [Bau09] BAUER, S.: Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009
- [BB05] BLEY, H.; BOSSMANN, M.: Standardisierte Produktmodelle für die automatisierte Montageplanung – Featurebasierte Montageplanung unterstützt den Simultaneous-Engineering-Prozess. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95, Ausgabe 9, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [BBJ+12] BRÖKEL, K.; BÖHME, C.; JONUSCHIES, I.; KLIEWE, C.; KLOß, E.; KNOPP, A.; KREJA, S. U.; RAHN, R.; STERNBERG, G.; WEGMANN, R.: Maschinenelemente. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [BD13-ol] BOOTHROYD DEWHURST INC.: DFMA. Unter: <http://www.dfma.com>, 19. August, 2013
- [BD87] BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.: Product Design for Assembly. Boothroyd Dewhurst, Inc. Wakefield, 1987
- [BD93] BRÖHL, A.-P.; DRÖSCHEL, W.: Einführung in das V-Modell. In: Bröhl, A.-P.; Dröschel, W. (Hrsg.): Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg Verlag, München, 1993
- [BDK11] BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. A.: Product Design for Manufacture and Assembly. CRC Press, London, New York, 2011
- [BEW+05] BRECHER, C.; EVERSHEIM, W.; WECK, M.; ASSMUS, D.; YAMASAKI, Y.: Parametrische Konstruktion. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, M.; HUSS, S.; WALDSCHMIDT, K.: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1996
- [BGN+09] BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.; NORDSIEK, D.; REYES-PEREZ, M.: A Holistic Approach for the Conceptual Design of Production Systems regarding the Interaction between Product and Production System. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). October 5-7 2009, Munich, Germany, 2009
- [BGW11] BRACHT, U.; GECKLER, D.; WENZEL, S.: Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [Bic00] BICHELMAIER, C.: Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 2009
- [Bir80] BIRKHOFFER, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. VDI-Verlag Fortschritts-Bericht VDI-Z, Reihe 1, Nr. 70, 1980

- [BJK10] BLEES, C.; JONAS, H.; KRAUSE, D.: Development of Modular Product Families. In: Proceedings of the DSM'10 – 12th International Dependency and Structure Modelling Conference. July 22-23 2010, Cambridge, UK, 2010
- [BK08] BLEES, C.; KRAUSE, D.: On the Development of Modular Product Structures: A Differentiated Approach. In: Proceedings of the Design 2008 - 10th International Design Conference. May 19-22 2012, Dubrovnik, Croatia, 2008
- [BK12] BAUDZUS, B.; KREBS, M.: Manuelle Montageprozesse im wandlungsfähigen Produktionssystem – Szenariobasierte Gestaltung rekonfigurierbarer Prozessmodule. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 107 (2012) 5, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Ble11] BLEES, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2011
- [Bög83] BÖGEL, G.: Konstruktionskatalog "Schraubenverbindungen". VDI-Bericht 493, VDI Verlag, Düsseldorf, 1983
- [Bos07] BOSSMANN, M.: Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. Dissertation, Naturwissenschaftliche Technische Fakultät III – Chemie, Pharmazie und Werkstoffwissenschaften, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007
- [Bot87] BOOTHROYD, G.: Design for Assembly – The Key to Design for Manufacture. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag, London, 1987
- [Bra05] BRAB, E.: Konstruieren mit CATIA V5 – Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenmodellierung. Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2005
- [Bre97] BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997
- [Bul95] BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): Arbeitsgestaltung – Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. B. G. Teubner, Stuttgart, 1995
- [CF92] CLARK, K.; FUJIMOTO, T.: Automobilentwicklung mit System: Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA. Campus Verlag, Frankfurt a.M., 1992
- [Cui00] CUIPER, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2000
- [Dah90] DAHL, B.: Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1990
- [Dan03] DANGELMAIER, W.: Produktion und Information – System und Modell. Springer-Verlag, Berlin, 2003
- [Dan99] DANGELMAIER, W.: Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [Deu89] DEUTSCHLÄNDER, A.: Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung. Carl Hanser Verlag, München, 1989
- [DGJ+12] DUMITRESCU, R.; GAUKSTERN, T.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: Pattern-Based Integrative Design of Molded Interconnect Devices (MID). In: Proceedings of the Design 2012 - 12th International Design Conference. May 21-24 2012, Dubrovnik, Croatia, 2012
- [DH02] DAENZER, W. F.; HUBER, F. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 11. Auflage, 2002
- [Die06] DIESTEL, R.: Graphentheorie. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2006

- [DK81] DIEKHÖNER, G. W.; KOPOWSKI, E.: Konstruktionskataloge über Nietverbindungen – Ein weiterer Schritt zur Systematisierung in der Verbindungstechnik. VDI-Z, Band 123 (1981) 8, Sonderheft, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981
- [DKL+12] DEUBZER, F.; KREIMEYER, M.; LINDEMANN, U.; MAURER, M.: Design Structure Matrix. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Dud10] DUDEN: Das Fremdwörterbuch. Dudenverlag, Mannheim, 10. aktualisierte Auflage, 2010
- [Dud13b-ol] DUDEN: Systematik. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Systematik>, 27. Mai 2013
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, 2011
- [Dyl90] DYLLA, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 1990
- [ECW+98] EPPINGER, S. D.; CARRASCOSA, M.; WHITNEY, D. E.: Using the Design Structure Matrix to Estimate Product Development Time. In: Proceedings of the DECT'98 – ASME Design Engineering Technical Conference. Atlanta, USA, 1998
- [EE11] EICHERT, J.; ECKSTEIN, H.: Montageorientiertes Produktreifegradmodell – Ein Modell zur Erhöhung der Montgereife während der Produktkonstruktion. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 101, Ausgabe 3, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2011
- [EEW10] ECKSTEIN, H.; EICHERT, J.; WAIDMANN, J.: Prozessmodell zur Integration von Konstruktion und Montageplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 105 (2010) 3, Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2009
- [EKS+05] EVERSHEIM, W.; KLOCKE, F.; SCHUH, G.; KNOCH, K.; WILLMS, H.: Einsatzplanung von Fertigungstechnologien. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [ELP+05] EVERSHEIM, W.; LUCZAK, H.; PFEIFER, T.; SCHUH, G.; KABEL, T.; KUBOSCH, A.; SIMON, M.; WITTE, V.: Management integrierter Produktentstehungen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [EMP+96] EVERSHEIM, W.; MÄßBERG, W.; PRITSCHOW, G.; TÖNSHOFF, H. K.: Prozessgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management – Betriebshütte. Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [Eng12] ENGELKEN, G.: Technisches Zeichnen. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Eri98] ERIXON, G.: Modular Function Deployment – A Method for Product Modularisation. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Schweden, 1998
- [ESA05] EVERSHEIM, W.; SCHUH, G.; ASSMUS, D.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 4 – Fertigung und Montage. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [Eve96] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 1 – Grundlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 3. Auflage, 1996
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 3 – Arbeitsvorbereitung. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1997

- [EWS+94] EPPINGER, S. D.; WHITNEY, D.; SMITH, R.; GEBALA, D.: A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development. In: Research in Engineering Design, March 1994 (6), Springer-Verlag, London, 1994
- [Fal00] FALLBÖHMER, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [Fel97] FELDMANN, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [FGK+04] FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [FKM00] FLATH, M.; KESPOHL, H.; MÖHRINGER, S.; OBERSCHELP, O.: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Lückel, J. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000
- [Fra03] FRANKE, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik. Dissertation, Naturwissenschaftliche-Technische Fakultät III – Chemie, Pharmazie und Werkstoffwissenschaften, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2003
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiöser selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fri89] FRIEDMANN, T.: Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnerunterstützte Verfahren. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1989
- [Fuc05] FUCHS, D. K.: Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2005
- [Gab13-ol] GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon – Produktion. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13462/produktion-v8.html>, 19. August 2013
- [Gai81] GAIROLA, A.: Montagegerechtes Konstruieren – Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Dissertation, Fachbereich Nachrichtentechnik, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1981
- [Gau06] GAUSEMEIER, J.: Einführung. In: Gausemeier, J.; Feldmann, K. (Hrsg.): Integrative Entwicklung räumlich elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GB12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.: Anwendungsbeispiel Pedelec. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GBD+12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; DOROCIAC, R.; MÜLDER, A.; NYBEN, A.; TERFLOTH, A.: Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GBK10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; KAISER, L.: Auswahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.):

7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 18.-19. März 2010 HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010
- [GBN+10] GÜNTHER, T.; BRANDIS, R.; NORDSIEK, D.; PETERS, S.; RÜHL, J.: Frühzeitige und qualifizierte Kostenprognose für Produktionssysteme – Praxisbeispiel anhand einer mechatronischen Baugruppe. In: Projektträger Karlsruhe (PTKA) (Hrsg.): 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010 – Produktion in Deutschland hat Zukunft. 9.-10. März 2010, Karlsruhe, 2010
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems. In: Proceedings of the Design 2010 – 11th International Design Conference. May 17-20 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [GD10] GAUSEMEIER, J.; DEYTER, S.: Spezifikation der Prinziplösung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GDG10] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; GAUKSTERN, T.: Integrative Konzipierung von MID-Produkt und MID-Produktionssystem. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GDK+11] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; KAHL, S.; NORDSIEK, D.: Integrative development of product and production system for mechatronic products. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 (2011), Elsevier, Oxford, 2011
- [GDL13-ol] GRANTA DESIGN LTD.: CES material and process selection software "CES selector". Unter: <http://www.grantadesign.com/products/ces/>, 17. Juli 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [Ger05] GERPOTT, T. J.: Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2. Auflage, 2005
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K. (Hrsg.): Integrative Entwicklung räumlich elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design, Vol. 20, No. 4, Springer-Verlag, London, 2009
- [GFR+05] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; REDENIUS, A.; STEFFEN, D.: Domänenübergreifende Spezifikation der Prinziplösung von mechatronischen Systemen mit einer inhärenten Teilintelligenz. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Wallaschek, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente Mechatronische Systeme. 17.-18. März 2005, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005
- [GK06] GIENKE, H.; KÄMPF, R.: Ressourcen. In: Gienke, H.; Kämpf, R. (Hrsg.): Praxishandbuch Produktion – Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHARDT, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [GLS04] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; SCHUH, G. (Hrsg.): Planung der Produkte und Fertigungssysteme für die Märkte von morgen – Ein praktischer Leitfaden für mittelständische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. VDMA Verlag, Frankfurt am Main, 2004

- [GN12] GAUSEMEIER, J.; NORDSIEK, D.: Einführung. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Göp98] GÖPFERT, J.: Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dissertation, Universität München, Gabler Verlag, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1998
- [GPW09] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [GRS09] ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISEL, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖVKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, 2009
- [Gru02] GRUNDWALD, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 2006
- [Gru06] GRUNDIG, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik, Methoden, Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2006
- [GS00] GÖPFERT, J.; STEINBRECHER, M.: Modulare Produktentwicklung leistet mehr – Warum die Produktarchitektur und die Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen. Harvard Business manager, 3/2000, 22. Jahrgang, Hamburg, 2000
- [GS12] GLATZEL, U.; SCHERM, F.: Metallische Werkstoffe. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. 19.-20. Mai 2011, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [GW11] GAUSEMEIER, J.; WIENDAHL, H.-P.: Deutschland braucht Wertschöpfungswachstum – Einführung. In: Gausemeier, J.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland. Acatech DISKUTIERT, Springer-Verlag, Berlin, 2011
- [Hac02] HACKER, W.: Denken in der Produktentwicklung. Rainer Hampp Verlag, Zürich, 2002
- [Hac12] HACKENSCHMIDT, R.: Konstruieren mit CAD. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- [HB11] HABERHAUER, H.; BODENSTEIN, F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, 16. Auflage, 2011
- [Hes06] HESSE, S.: Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H. P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [Hes94] HESSE, S.: Montage-Atlas – Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren. Hoppens- tedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt, 1994
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics – „What Is It, Why and How? An Editorial. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 1, No. 1, 1996
- [Hub76] HUBKA, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktionstätigkeiten. Springer-Verlag, Berlin, 1976

- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; WECK, O. DE; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli Verlag, Zürich, 12. Auflage. 2012
- [Ise99] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [KHR12] KRAUSE, W.; HOLFELD, A.; RÖHRS, G.: Grundlagen der Konstruktion – Elektronik – Elektrotechnik – Feinwerktechnik – Mechatronik. Carl Hanser Verlag, München, 9. Auflage, 2012
- [Kin05] KINKEL, S.: Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen – Wie verändern sich Variantenzahlen, Losgrößen, Materialeinsatz, Genauigkeitsanforderungen und Produktlebenszyklen tatsächlich? Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung, Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, Nummer 37, Karlsruhe, 2005
- [Kip12] KIPP, T.: Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. Dissertation, Technischer Universität Hamburg-Harburg, TuTech Verlag, Hamburg, 2012
- [KJ77] KÄUFER, H.; JITSCHI, M.: Katalog schnappbarer Formschlußverbindungen an Kunststoffteilen und beispielhafte Konstruktion linienförmiger Kraftschlußverbindungen. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Band 29 (1977), Nr. 10, 1977
- [Kno04] KNOCHE, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2004
- [KNT09] KAISER, L.; NORDSIEK, D.; TERFLOTH, A.: Softwaregestützte Konzipierung komplexer mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme. In: ATZ Elektronik, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [Köc12] KÖCHLING, D.: Frühzeitige Absicherung des dynamischen Verhaltens von mechatronischen Systemen auf Basis der Prinziplösung. Diplomarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2012
- [Koe08] KOEPPEN, B.: Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Shaker Verlag, Aachen, 2008
- [Kol98] KOLLER, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [Kop84] KOPOWSKI, E.: Analyse und Konstruktionskataloge fester Verbindungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 1984
- [KPP+06] KALWEIT, A.; PAUL, C.; PETERS, S.; WALLBAUM, R. (Hrsg.): Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [KR11] KIEF, H. B.; ROSCHI WAL, H. A.: CNC-Handbuch 2011/2012. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [Kra12] KRAUSE, D.: Modulare Produktstrukturierung. In Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Kre08] KRENZ, A.: Konzeptionsentwicklung in Kindertagesstätten – professionell, konkret, qualitätsorientiert. Bildungsverlag EINS GmbH, Troisdorf, 2008
- [Lan00] LANGLLOTZ, G.: Ein Beitrag zur Funktionsstrukturentwicklung innovativer Produkte. Forschungsberichte aus dem Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion RPK der Universität Karlsruhe, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [LBP12] LANZA, G.; BEHMANN, B.; PETERS, S.: Bewertung von Herstellkosten. In: Gausemeier, J.; Lanza, G.; Lindemann, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren

- Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Lem09] LEMBURG, J. P.: Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2009
- [Lew85] LEWANDOWSKI, K.: Instandhaltungsgerechte Konstruktion. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985
- [Lin07] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Systeme – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2007
- [Lin13-ol] LINDEMANN, U.: The Design Structure Matrix. Unter: <http://www.dsmweb.org>, 19. August 2013
- [LKS00] LÜCKEL, J.; KOCH, T.; SCHMITZ, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung, Produktion, Vertrieb (Hrsg.): Mechatronik – Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, Wiesloch, 29.-30. März 2000, VDI-Verlag, 2000
- [LM06] LINDEMANN, U.; MAURER, M.: Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [Lot06a] LOTTER, B.: Einführung. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [Lot06b] LOTTER, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [Lot86] LOTTER, B.: Wirtschaftliche Montage – Ein Handbuch für Elektrogerätetechnik, Bau- und Feinwerktechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986
- [LS94] LOTTER, B.; SCHLILLING, W.: Manuelle Montage: Planung Rationalisierung Wirtschaftlichkeit. VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- [Mat02] MATTHIESEN, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002
- [Mau07] MAURER, M.: Structural Awareness in Complex Product Design. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Dr. Hut Verlag, München, 2007
- [Mei07] MEIER, J.: Produktarchitekturtypen globalisierter Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2007
- [MEL+09] MÜLLER, E.; ENGELMANN, J.; LÖFFLER, T.; STRAUCH, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [MI05] MÖHRLE, M. G.; ISERMANN, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping – Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2005
- [Mic06] MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, 2006
- [MO86] MIYAKAWA, S.; OHASHI, T.: The Hitachi Assemblability Method (AEM). In: Proceedings of the International Conference on Product Design for Assembly. Troy Conferences, Rochester, Michigan, USA, 1986
- [Möh04] MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitationsschrift, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004

- [Möh05] MÖHRINGER, S.: Gibt es ein gemeinsames Vorgehen in der Mechatronik? Bestandsaufnahme gängiger Entwicklungsmethodiken und Handlungsempfehlungen. In: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Mechatronik 2005, VDI-Berichte Nr. 1852, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [Mor04] MORYSON, R.-D.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2004
- [MR96] MILBERG, J.; REINHART, G.: Produktionssystemplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte Produktion und Management – Teil 2. Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 1996
- [Muc05] MUCKENHIRN, R.: Konfigurierbares Leitsystem für modulare Montagezellen am Beispiel Festplatten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005
- [Mül04] MÜLLER, M.: Entwicklung eines innovativen Klapprades und Betrachtung von Produktmodellen. Semesterarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentstehung, 2004
- [Mül08] MÜLLER, J.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2008
- [Mül90] MÜLLER, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften – Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [MWB+12] MEERKAMM, H.; WARTZACK, S.; BAUER, S.; KREHMER, H.; STOCKINGER, A.; WALTER, M.: Design for X (DFX). In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [NBG13] NORDSIEK, D.; BRANDIS, R.; GAUSEMEIER, J.: Integrative Produktionssystemkonzipierung in der Mechatronik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 108 (2013) 9, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [Neu02] NEUDÖRFER, A.: Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte – Methoden und systematische Lösungssammlung zu EG-Maschinenrichtlinie, Springer-Verlag, Berlin, 2002
- [NGL+10] NORDSIEK, D.; GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; PETERS, S.: Early Evaluation of Manufacturing Costs within Integrative Design of Product and Production Systems. In: Proceedings of APMS 2010 International Conference Advances in Production Management Systems. October 11-13 2010, Cernobbio, Como, Italy, 2010
- [NHR+08] NYHUIS, P.; HEINEN, T.; REINHART, G.; RIMPENAU, C.; ABELE, E.; WÖRN, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98, Ausgabe 1/2, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipienlösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [NWD+08] NYHUIS, P.; WULF, S.; DENKENA, B.; EIKÖTTER, M.: Integrative Fabrik-, Technologie- und Produktplanung – Auf Basis eines Systemmodells. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98, Ausgabe 5, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2008
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, E.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [PE94] PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D.: Integration analysis of product decompositions. In: Proceedings of the DTM'94 – ASME Design Theory and Methodology. September 11-14 1994, Minneapolis, Minnesota, USA, 1994

- [PL11] PONN, J.; LINDEMANN, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2011
- [Pro10] PROSTEP iViP (Hrsg.): Moderne Produktionsplanungsprozesse – Ein Referenzprozess verbindet Konstruktion und Produktion. ProSTEP iViP White Paper, Darmstadt, 2010
- [PSD+09] PETZELT, D.; SCHALLOW, J.; DEUSE, J.; FERSTL, H.: Produktionsgerechte Produkte durch technische Mitgestaltung aus der Produktionsplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104 (2009) 11, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Rap99] RAPP, T.: Produktstrukturierung. Dissertation. Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), Universität St. Gallen, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1999
- [Ref90] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1990
- [Ref91] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Steuerung Teil I. Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [Ref93a] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Arbeitsgestaltung in der Produktion. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1993
- [Ref93b] REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Lexikon der Betriebsorganisation. Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [Rey11] REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Conceptual Design of Manufacturing Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011
- [Ric06] RICHTER, M.: Gestaltung der Montageorganisation. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [Ros02] ROSS, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. Dissertation, Technische Universität München, München, 2002
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1: Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2000
- [Rot01] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 2: Kataloge Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2001
- [Rot82] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Systematisierung und zweckmäßige Aufbereitung technischer Sachverhalte für das methodische Konstruieren. Springer-Verlag, Berlin, 1982
- [Rot96] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 3: Verbindungen und Verschlüsse Lösungsfindung. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1996
- [Rud06] RUDOLF, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität München, München, 2006
- [SB03] SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D.: Process Selection – From Design to Manufacture. Elsevier, Oxford, 2003
- [Sch05a] SCHUH, G.: Produktkomplexität managen – Strategien Methoden Tools. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2005

- [Sch05b] SCHWANINGER, M.: Systemorientiertes Design – ganzheitliche Perspektive in Innovationsprozessen. In: Schäppi, B.; Andreasen, M. M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [Sch92] SCHUSTER, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [Sch93] SCHMITT, M.: Rechnerunterstützte Tolerierung der Produktgestalt von mechanischen Bauteilen auf der Basis eines integrierten Produktmodellierers. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993
- [Sed10] SEDCHAICHARN, K.: Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2010
- [Sei98] SEIDEL, U. A.: Verfahren zur Generierung und Gestaltung von Montageablaufstrukturen komplexer Serienerzeugnisse. Dissertation, Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1998
- [Sel11] SELIGER, G.: Montage und Demontage. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, 23. Auflage, 2011
- [SH86] SPUR, G.; HELWEG, H.-J.: Montieren. In: Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik – Band 5 Fügen Handhaben Montieren. Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [SK10] SCHUH, G.; KLAPPERT, S.: Technologiemanagement – Handbuch Produktion und Management 2. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2010
- [SL09b] SPATH, D.; LENTES, J.: Ontologiegestützte kontinuierliche Produktionssystemplanung. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 99, Ausgabe 3, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009
- [SLB09] SCHOLZ-REITER, B.; LÜTJEN, M.; BRENNER, N.: Technologieinduzierte Wirkzusammenhänge in der Mikroproduktion – Entwicklung eines Modellierungskonzepts. In: Schenk, M. (Hrsg.): Digital Engineering – Herausforderungen für die Arbeits- und Betriebsorganisation. GITO Verlag, Berlin, 2009
- [Spu79] SPUR, G.: Produktionstechnik im Wandel. Carl Hanser Verlag, München, 1979
- [Spu96] SPUR, G.: Produktionstechnologie. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte – Produktion und Management, Teil 2. Springer-Verlag, Berlin, 7. völlig neu bearbeitete Auflage, 1996
- [SS86] SPUR, G.; STÖFERLE, T.: Handbuch der Fertigungstechnik – Band 5 Fügen Handhaben Montieren. Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [SS94] SPUR, G.; STÖFERLE, T.: Handbuch der Fertigungstechnik – Band 6. Carl Hanser Verlag, München, 1994
- [Ste07] STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007
- [Ste81] STEWARD, D. V.: The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. EM-28, No 3, Newark, NJ, USA, 1981
- [Tas05] TASSI, E. J.: Knowledge-Features für die Produkt- und Technologieentwicklung in umformtechnischen Prozessketten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Zwickau, 2005
- [TD11] TÖNSHOFF, H. K.; DENKENA, B.: Übersicht über die Fertigungsverfahren. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, 23. Auflage, 2011
- [Tes13-ol] TESEON: Loomeo complexity software. Unter: <http://www.teseon.de/loomeo>, 27. Juni 2013

- [Tro01] TROMMER, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [UE95] ULRICH, K.; EPPINGER, S.: Product Design and Development. McGraw-Hill, Singapore, 1995
- [Ung86] UNGEHEUER, U.: Methodik zur Planung einer Anforderungsgerechten Produkt- und Montagestruktur für komplexe Erzeugnisse der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1986
- [VWB+09] VAJNA, S.; WEBER, C.; BLEY, H.; ZEMAN, K.: CAx für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2009
- [Wac94] WACH, J. J.: Problemspezifische Hilfsmittel für die integrierte Produkterstellung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 1994
- [War93a] WARNECKE, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 1 – Organisation, Produkt, Planung. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1993
- [War93b] WARNECKE, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1993
- [Web09] WEBER, W.: Industrieroboter – Methoden der Steuerung und Regelung. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2009
- [Wee81] WEEGE, R.-D.: Recyclinggerechtes Konstruieren. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981
- [Wes05] WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [Wie10] WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München, 7. Auflage, 2010
- [WRN09] WIENDAHL, H.-P.; REICHARDT, J.; NYHUIS, P.: Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [WZ09] WESTKÄMPER, E.; ZAHN, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen – Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [ZIV11] ZWEIRAD-INDUSTRIE-VERBAND E.V.: Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt Deutschland. Kongress Metromobile, 25. März 2011, Berlin, 2011
- [ZML+03] ZÄH, M. F.; MÜLLER, S.; LINDEMANN, U.; STRICKER, H.: Integrierte Montagesystemplanung – Herstellkosten durch eine methodisch unterstützte, modulare Planung senken. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93, Ausgabe 9, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [Fen05] FENG, S. C.: Preliminary design and manufacturing planning integration using web-based intelligent agents. Journal of Intelligent Manufacturing 16, Springer Science+Business US, 2005
- [Rie03] RIEPE, B.: Integrierte Produktstrukturmodellierung in den frühen Phasen der Produktentstehung: Eine Methode zur Modularisierung variantenreicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Books on Demand, Nordstedt, 2003
- [SWS03] SMITH, C. S.; WRIGHT, P. K. SÉQUIN, C.: The Manufacturing Advisory Service: web-based process and material selection. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 16, No. 6, Taylor & Francis Ltd., London, 2003
- [Zha05] ZHA, X. F.: A web-based advisory system for process and material selection in concurrent product design for a manufacturing environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25, Springer, London, 2005

Normen und Richtlinien

- [DIN15194] DIN EN 15194: Fahrräder – Elektromotorisch unterstützte Räder – EPAC-Fahrräder. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN199-1] DIN 199-1: Technische Produktdokumentation – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [DIN199-5] DIN 199-5: Begriffe im Zeichnungs- und Stücklistenwesen – Stücklisten-Verarbeitung, Stücklistenauflösung. Beuth Verlag, Berlin, 1981
- [DIN69901-5] DIN 69901-5: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme –Teil 5: Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN8580] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-0] DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-1] DIN 8593-1: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 1: Zusammensetzen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-2] DIN 8593-2: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 2: Füllen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-3] DIN 8593-3: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 3: Anpressen, Einpressen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-4] DIN 8593-4: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 4: Fügen durch Urformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-5] DIN 8593-5: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 5: Fügen durch Umformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-6] DIN 8593-6: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 6: Fügen durch Schweißen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-7] DIN 8593-7: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 7: Fügen durch Löten – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [DIN8593-8] DIN 8593-8: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 8: Kleben – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [EU02] UEU RICHTLINIE 2002/24/EEG: Über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 92/61/EWG des Rates. Europäisches Parlament und Rat, 2002
- [VDI2206] VDI-RICHTLINIE 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004
- [VDI2209] VDI-RICHTLINIE 2209: 3-D-Produktmodellierung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2009
- [VDI2221] VDI-RICHTLINIE 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1993
- [VDI2222-1] VDI-RICHTLINIE 2222, Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997
- [VDI2222-2] VDI-RICHTLINIE 2222, Blatt 2: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1982
- [VDI2223] VDI-RICHTLINIE 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004

- [VDI2232] VDI-RICHTLINIE 2232: Methodische Auswahl fester Verbindungen – Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004
- [VDI2860] VDI-RICHTLINIE 2860: Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1990
- [VVD2619] VDI/VDE/DGQ-Richtlinie 2619: Prüfplanung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1985

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Ergänzungen zur Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme	A-1
A2 Ergänzungen zum Stand der Technik	A-2
A2.1 Symbolik zur Gestaltbeschreibung	A-2
A2.2 Übersicht Checklisten und Konstruktionskataloge	A-3
A2.3 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach ASHBY	A-5
A2.4 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER	A-7
A3 Ergänzungen zum Produktkonzept des Pedelecs	A-8
A4 Ergänzungen zur Anwendung der Systematik.....	A-11
A4.1 Sichtenbildung im Mechatronic Modeller	A-11
A4.2 Klassifikation von Verbindungen	A-12
A4.3 Faktoren zur Bestimmung von Montageanforderungen	A-13
A4.4 Gewichtungsfaktoren für die Produktstrukturierung	A-14
A4.5 Identifikation von Clustern am Beispiel Pedelec	A-15
A4.6 Montageorientierte Erzeugnisgliederung.....	A-16
A4.7 Gliederungsansätze in der Montage	A-17
A4.8 Bestimmung der Bewertungssumme	A-18
A4.9 Technologiesteckbrief	A-20
A4.10 Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK	A-21

A1 Ergänzungen zur Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme

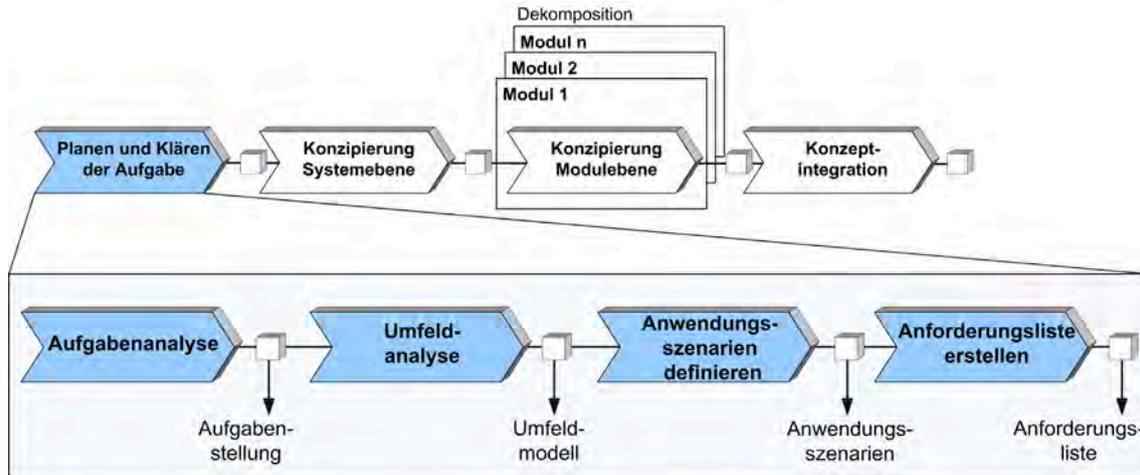


Bild A-1: Konzipierungsphase „Planen und Klären der Aufgabe“ [GD10, S. 63]

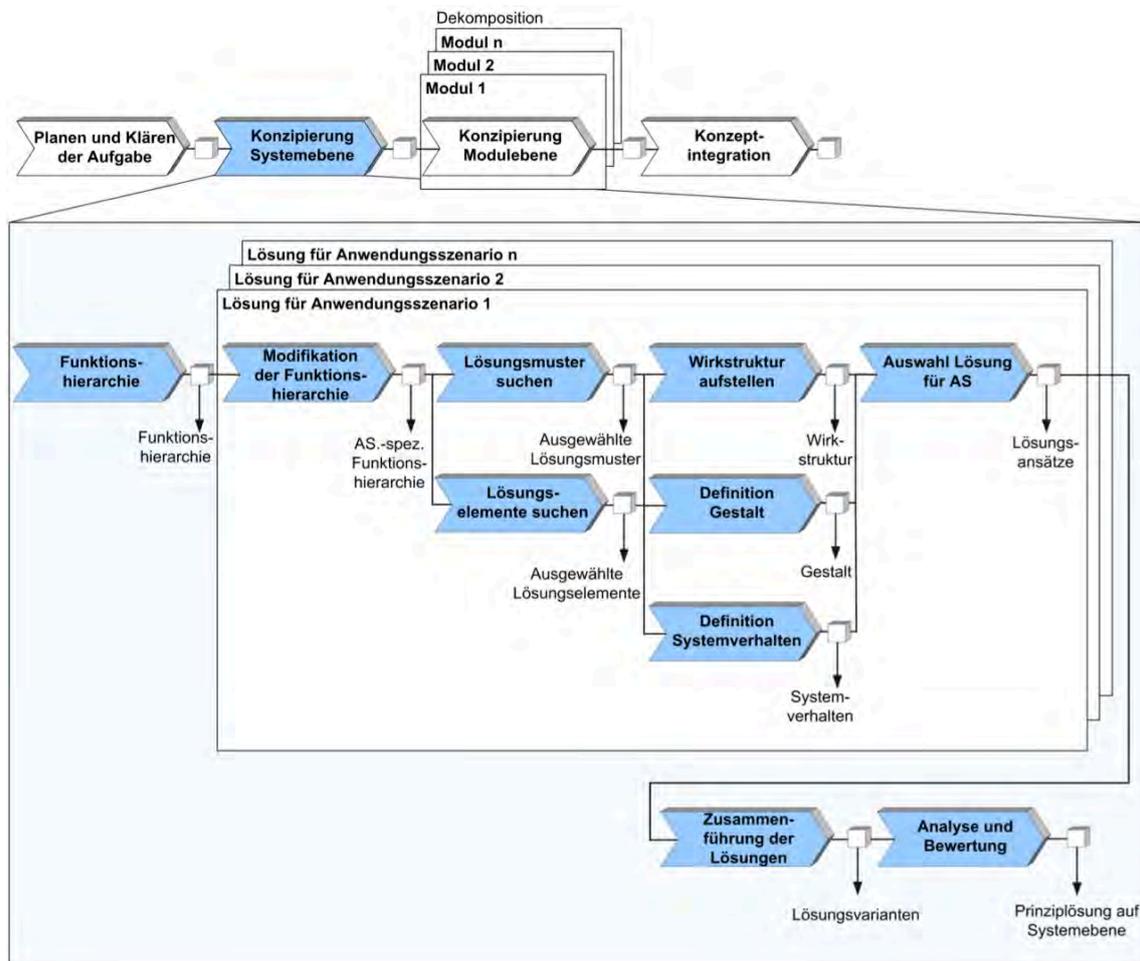


Bild A-2: Konzipierungsphase "Konzipierung auf Systemebene" [GD10, S. 64]

A2 Ergänzungen zum Stand der Technik

A2.1 Symbolik zur Gestaltbeschreibung

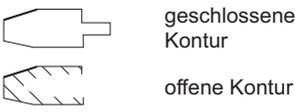
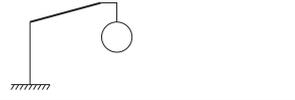
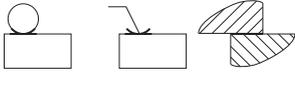
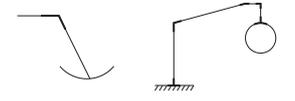
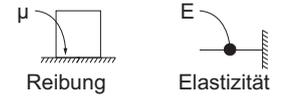
		Darstellung	
		Element	Beispiel
Typ	Gestalt	begrenzende Linie außen innen	
	Struktur	Element 1 Element 2	
	Wirkflächenpaar	berührende Linien	
	Verbindung	starr Berührung von Linienendpunkten	
	Drehgelenk		
	Drehschubgelenk		
Eigenschaften, Werte	Buchstaben, Ziffern, Worte, Text, Formeln		

Bild A-3: Grundlegende Symbolik für allgemeine Mechanik nach [Lem09, S. 76]

A2.2 Übersicht Checklisten und Konstruktionskataloge

Tabelle A-1: Übersicht verfügbarer Checklisten zur Bestimmung montagerelevanter Anforderungen nach [VDI2232, S. 15]

Schrifttum	Inhalt
KOPOSKI, E.: Einsatz neuer Konstruktionskataloge zur Verbindungsauswahl. VDI-Berichte 493, VDI Verlag, Düsseldorf, 1983	Assoziationsbegriffe zu Verbindungen allgemein
ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin, 2000	Assoziationsbegriffe zu technischen Aufgabenstellungen allgemein
ENDLICH, W.: Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik. Girardet, Essen, 1981	Assoziationsbegriffe zu Klebeverbindungen
BAUER, C.O.: Auswahl und Auslegung formschlüssiger Verbindungen – Beispiel: Schraubenverbindungen. VDI-Berichte 360. VDI Verlag, Düsseldorf, 1980	Assoziationsbegriffe zu Schraubenverbindungen
BAUER, C.O.: Wege zu sicheren und wirtschaftlichen Schraubenverbindungen. VDI-Z 10, 1982	Schraubenfragebogen

Tabelle A-2: Übersicht verfügbarer Konstruktionskataloge [VDI2232, S. 23]

Schrifttum	Inhalt
BÖGEL, G.: Konstruktionskatalog „Schraubenverbindungen“. VDI-Berichte 493, VDI Verlag, Düsseldorf, 1983	Schraubenverbindungen, Gewindeformen Schraubenantriebe
ENDLICH, W.: Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik. Verlag W. Girardet, Essen, 1981	Verarbeitungsschema für Kleb- und Dichtstoffe
ERSOY, M.: Klemmverbindungen zum Spannen von Werkstücken. VDI-Berichte 493, VDI Verlag, Düsseldorf 1983	Spannelemente / Einfache Hydro-Spannelemente Hydraulische Werkzeugspannelemente
GAO, X.: Systematik der Verbindungen – Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Dissertation, RWTH Aachen, 1983	Überblick über feste und bewegliche Verbindungen / Systematik der physikalischen Effekte zur Erzeugung der Verbindungskraft
GIESSNER, F.: Gesetzmäßigkeiten und Konstruktionskataloge elastischer Verbindungen. Dissertation, TU Braunschweig, 1974	Elastische Halterungen mit zwei Halterungspartnern Elastische Verbindungen mit drei Verbindungspartnern
JITSCHIN, M.: Systematik schnappbarer Kraft- und Formschlusssverbindungen von Kunststoffteilen, veranschaulicht am Beispiel Kunststoffhaus. VDI-Berichte 360, VDI Verlag, Düsseldorf, 1980	Schnappbare Form- und Kraftschlusssverbindungen
KÄUFER, H.: Gezielte Gestaltung des Fügebereichs an Beispielen der Metall-Kunststoff-Klebung. Fertigungssystem Kleben, TUB-Dokumentation 21, Berlin, 1984	Systematik ebener Klebungen zweier Flächentragwerke
KOLLER, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, 4. Auflage, 1997	Physikalische Effekte, Gestaltungshinweise Schweiß-, Umform-Verbindungen
KOLLMANN, F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen – Gestaltung, Auslegung. Springer-Verlag, Berlin, 1984	Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen Stoffschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen
KOPOWSKI, E.: Analyse und Konstruktionskataloge fester Verbindungen. Dissertation, TU Braunschweig, 1985	Elementenpaare / Blindnietverbindungen im Leichtbau / Schraubverbindungen
NEUMANN, A.; W. Rathe: Methodik der Wahl von Fügeverfahren. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1979	Vorauswahl der Fügeverfahrensklasse und -gruppe Verbindungen an Dünnschlechkonstruktionen
NEUMANN, A.; Rahte, W.; S. Böhme: Bewertungen schmelzgeschweißter Konstruktionen. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1978	Schmelzschweißverbindungen
ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2 Konstruktionskataloge. Springer-Verlag, Berlin 1994	Schlussarten, Nietverbindungen, Nichtblindniet-Verbindungen, Blindniet-Verbindungen, Welle-Nabe-Verbindungen
ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 3 Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsgfindung. Springer-Verlag, Berlin, 1996	Schweiß-, Lötverbindungen Formschlusssverbindungen Kraftschlusssverbindungen Reibschlusssverbindungen
ROTH, K.: Einheitliche Systematik der Verbindungen. VDI-Berichte 493, VDI Verlag, Düsseldorf, 1983	Schlusskraftorientierter Haupt-Übersichtskatalog fester Verbindungen
ROTH, K.; KOPOWSKI, E.: Konstruktionskataloge fester Verbindungen. VDI-Z 124, 1982	Nietverbindungen, Schlusskraftorientierter Haupt-Übersichtskatalog für feste Verbindungen, Geometrischer Katalog Verbindungen
RUGE, J.: Handbuch der Schweißtechnik, Band 2 Verfahren und Fertigung. Springer-Verlag, Berlin, 1980	Nahtformen für das Gasschweißen, Lichtbogenhand- und Schutzgasschweißen von Stahl, Fugenform für das UP-Schweißen

A2.3 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach ASHBY

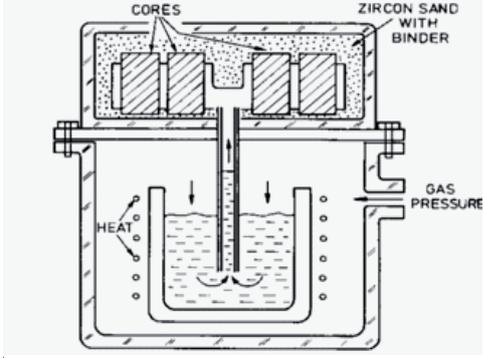
Niederdruckgießen	
Beschreibung	Prinzipskizze
Das Niederdruckgießen ist ein Hochpräzisions-Sandformverfahren zur Herstellung von hochwertigen Aluminiumbauteilen für die Automobilindustrie.	
Verfahrensklasse	
<ul style="list-style-type: none"> • Diskret • Primär • Gießen 	
Werkstoffklassen	Gestaltklassen
<ul style="list-style-type: none"> • Metalle • NE-Metalle • Aluminium-Legierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prismatisch • 3-dimensional
Physikalische Attribute	Monetäre Attribute
<ul style="list-style-type: none"> • Wandstärken 0,4 - 6,5 mm • Rauigkeiten 0,2 - 1,6 µm • Toleranzen 0,2 - 1 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftliche Losgröße $10^4 - 10^6$ Stk. • Werkstoffausnutzung (0-1) 0,6 - 0,9 • Produktionsrate 5 - 50 Stk/h
Typische Anwendung	
<ul style="list-style-type: none"> • Motorblöcke • etc. 	

Bild A-4: Technologiesteckbrief für eine Fertigungstechnologie nach Ashby [Ash07, S. 210], [Nor12, S. A-11]

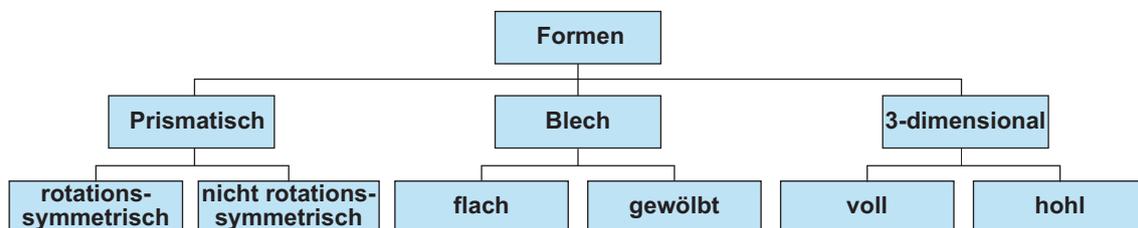


Bild A-5: Gestaltklassen nach [Ash07, S. 198]

		Metall, Eisen	Metall, nicht Eisen	Keramik	Glas	Elastomere	Thermoplasten	Duroplaste	Polymere, Schäume	Verbundwerkstoffe
Fügen	Klebstoffe	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Schweißen von Metallen	●	●							
	Schweißen von Polymeren					●	●	●	●	
	Verbindungselemente	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Bild A-6: Prozess-Material-Matrix bzgl. Fügen nach ASHBY [Ash07, S. 197]

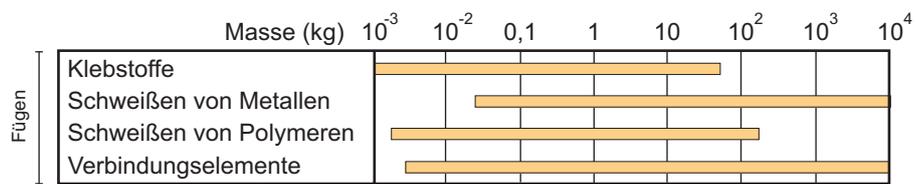


Bild A-7: Prozess-Bauteilmasse-Diagramm bzgl. Fügen nach ASHBY [Ash07, S. 199]

A2.4 Ergänzungen zur Technologieauswahl nach SWIFT/BOOKER

Tabelle A-3: Auswahlmatrix für Fügeverfahren nach SWIFT/BOOKER (Ausschnitt)
[SB03, S. 32f.]

Material		Werkzeug- und Legierungsstähle			Aluminium und Aluminiumlegierungen			Titan und Titanlegierungen			...
		< 3 mm	3-19 mm	>19 mm	< 3 mm	3-19 mm	> 19 mm	< 3 mm	3-19 mm	> 19 mm	
Menge											
sehr wenig 1-100	P	[W2][W3] [W6][W8] [W9][W11] [W13][W14]	[W2][W3] [W9][W11] [W13][W14] [W15][B1]	[W3][W7] [W9][W10] [W13][W15]	[W1][W2] [W3][W6] [W8][W9] [W11][W13]	[W1][W2] [W3][W6] [W9][W11] [W13][B1]	[W3][W9]	[W2][W3] [W9][W13] [W14]	[W2][W3] [W9][W13] [W14]	[W3][W9] [W13]	
	SP				[S1][S8]						
	NP	[F20]	[F19][F20]	[F19][F20]		[F23]	[F23]				
wenig 100-1.000	P	[W2][W3] [W8][W9] [W11][W13] [W14][W15]	[W2][W3] [W9][W11] [W13][W14] [W16][W17]	[W3][W9] [W13][W15] [W16][W17]	[W1][W2] [W3][W6] [W9][W11] [W13][W14]	[W1][W2] [W3][W9] [W11][W13] [W14][B1]	[W3][W9]	[W2][W3] [W9][W13] [W14]	[W2][W3] [W9][W13] [W14]	[W3][W9] [W13]	
	SP				[S1][S8]						
	NP	[F20]	[F19][F20]	[F19][F20]		[F23]	[F23]				
wenig bis mittel 1.000-10.000	P	[W2][W8] [W11][W13] [W14][W19] [B2][B4]	[W2][W11] [W13][W14] [W16][W17] [W19][B2]	[W13][W16] [W17]	[W1][W2] [W8][W11] [W13][W14] [W19][B2]	[W1][W2] [W11][W13] [W14][W19] [B2][B6]		[W2][W13] [W14][W19] [B4]	[W2][W13] [W14][W19]	[W13]	
	SP				[S2][S6] [S8]						
	NP										
...											

Schweiß-Verfahren

[W1]	Kaltverschweißen
[W2]	Diffusionsschweißen
[W3]	Explosionsschweißen
[W5]	Ultraschall-Schweißen
[W6]	Gasschweißen
[W7]	Thermit-Schweißen
[W8]	Nahtschweißen
[W9]	Abbrennstumpfschweißen
[W11]	Buckelschweißen
[W13]	Metall-Inertgas-Schweißen
[W14]	Wolfram-Schutzgasschweißen
[W15]	Lichtbogenhandschweißen
[W16]	Unterpulverschweißen
[W17]	Fülldraht-Schweißen
[W19]	Bolzenschweißen

Weichlöt-Verfahren

[S2]	S2 automatisches Lötbrennen
[S6]	S6 Tauch Löten
[S8]	S8 Kolbenlöten

Hartlöt-Verfahren

[B1]	Manuelles Flammlöten
[B4]	Induktionslöten
[B6]	Tauchlöten

Mechanische Fügeverfahren

[F20]	magnetische Bauteile
[F23]	Gewindeinsätze
[F19]	Kegelschaft (konische Verbindung)

Art der Verbindung

P	permanent
SP	semi-permanent
NP	nicht permanent

A3 Ergänzungen zum Produktkonzept des Pedelecs

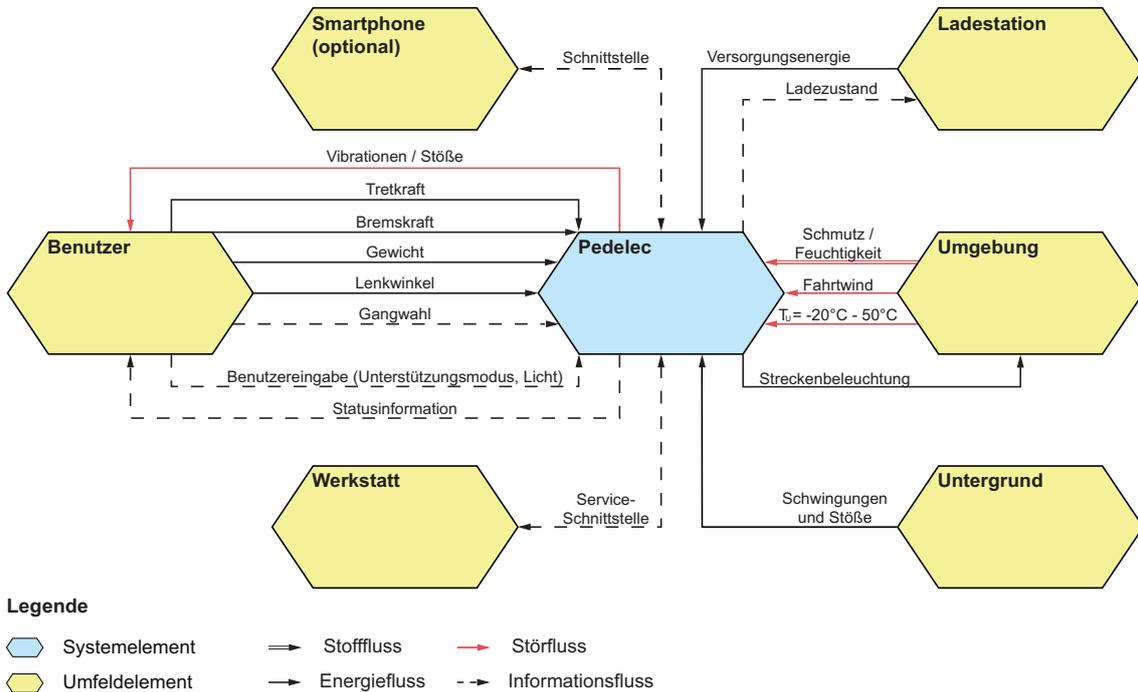


Bild A-8: Umfeldmodell des Pedelecs [GBD+12, S. 91]

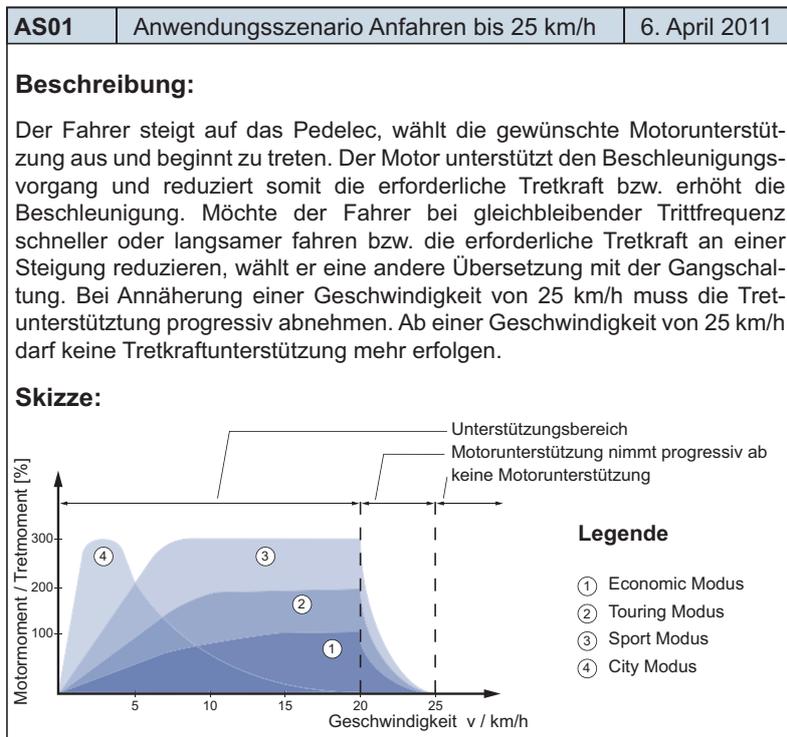


Bild A-9: Beispielhaftes Anwendungsszenario des Pedelecs [GBD+12, S. 93]

Stand: 6. April 2011 ersetzt:		Anforderungsliste Pedelec		Blatt 1	Seite 1
Änderung	F/W	Anforderungen		Änderung	Bear.
		2	Kinematik		
	F	2.1	elektr. Tretunterstützung vorsehen		
	F	2.2	Nennleistung: 250 W		
	F	2.3	Motordrehmoment: 40,00 bis 60,00 Nm		
	F	2.4	Ab 25 km/h schaltet Tretunterstützung ab		
	F	2.5	Motorunterstützung nur bei Tretbewegung		
	F	2.6	Motorunterstützung nur bei Vorwärtsbewegung		

Bild A-10: Ausschnitt aus der Anforderungsliste des Pedelecs [GBD+12, S. 94]

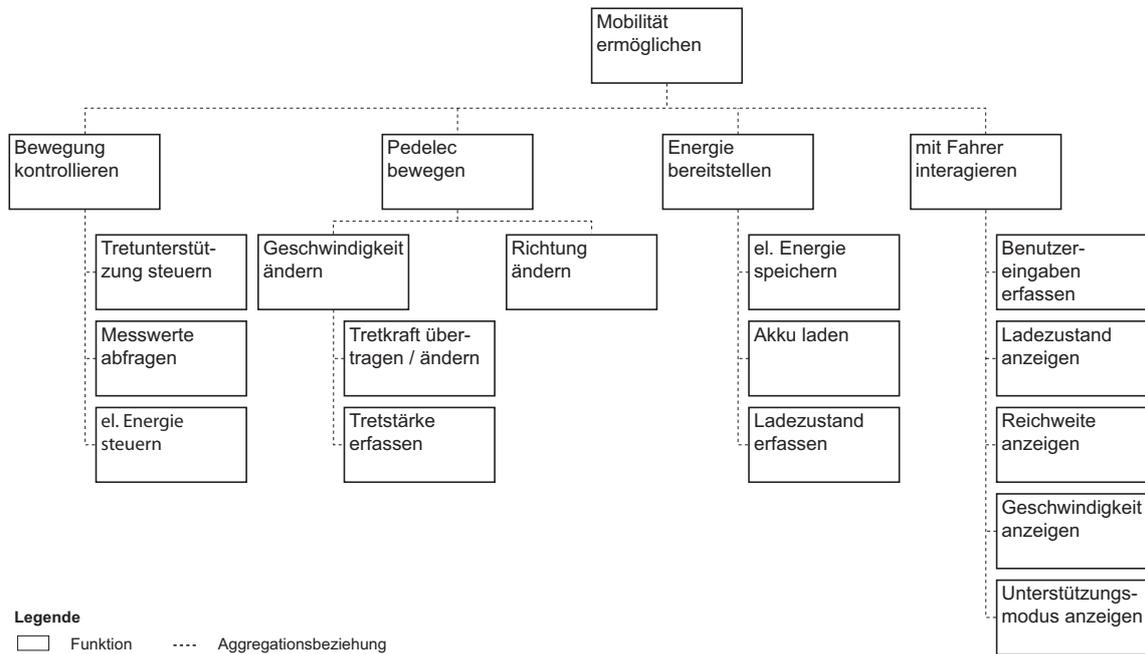
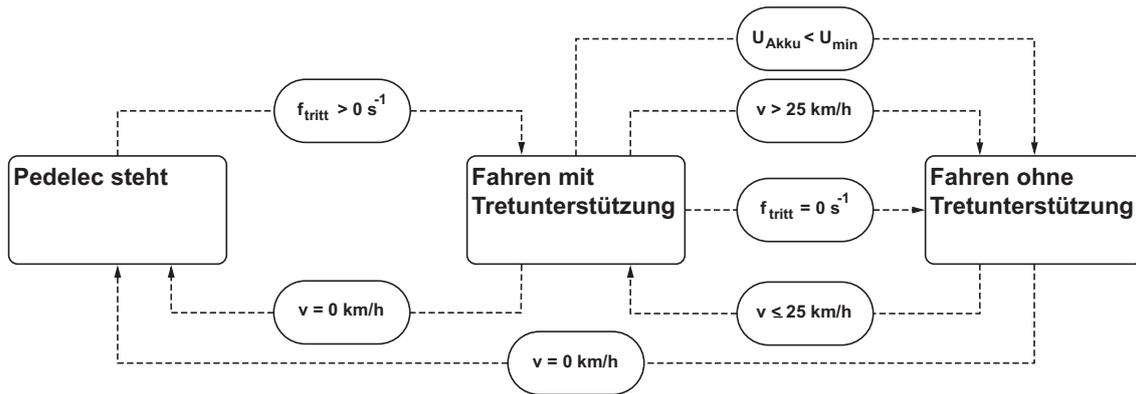
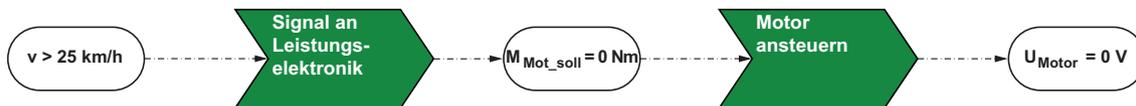


Bild A-11: Ausschnitt der Funktionshierarchie des Pedelecs [GBD+12, S. 95]

**Legende**

□ Zustand ○ Ereignis --> Zustandsänderung

Bild A-12: Ausschnitt aus dem Partialmodell Verhalten – Zustände des Pedelecs
[GBD+12, S. 99]

**Legende**

➤ Aktivität ○ Ereignis --> Reihenfolgebeziehung

Bild A-13: Ausschnitt aus dem Partialmodell Verhalten – Aktivitäten des Pedelecs
[GBD+12, S. 100]

A4 Ergänzungen zur Anwendung der Systematik

A4.1 Sichtenbildung im Mechatronic Modeller

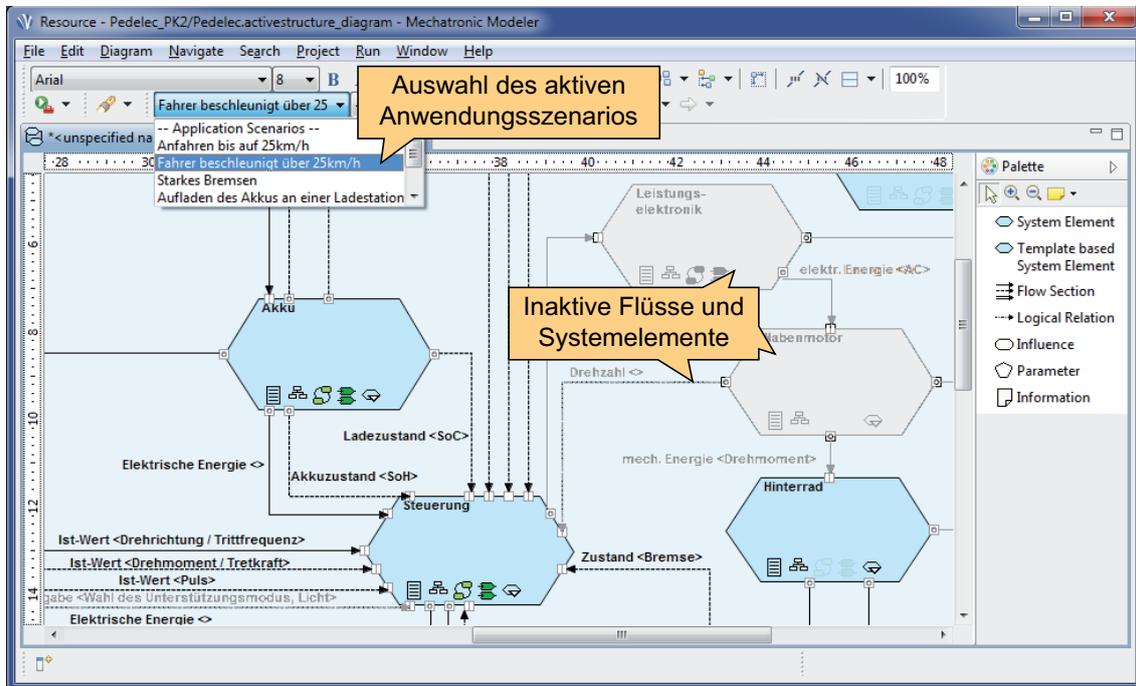


Bild A-14: Sichtenbildung im Mechatronic Modeller [GBD+12, S. 119]

A4.2 Klassifikation von Verbindungen

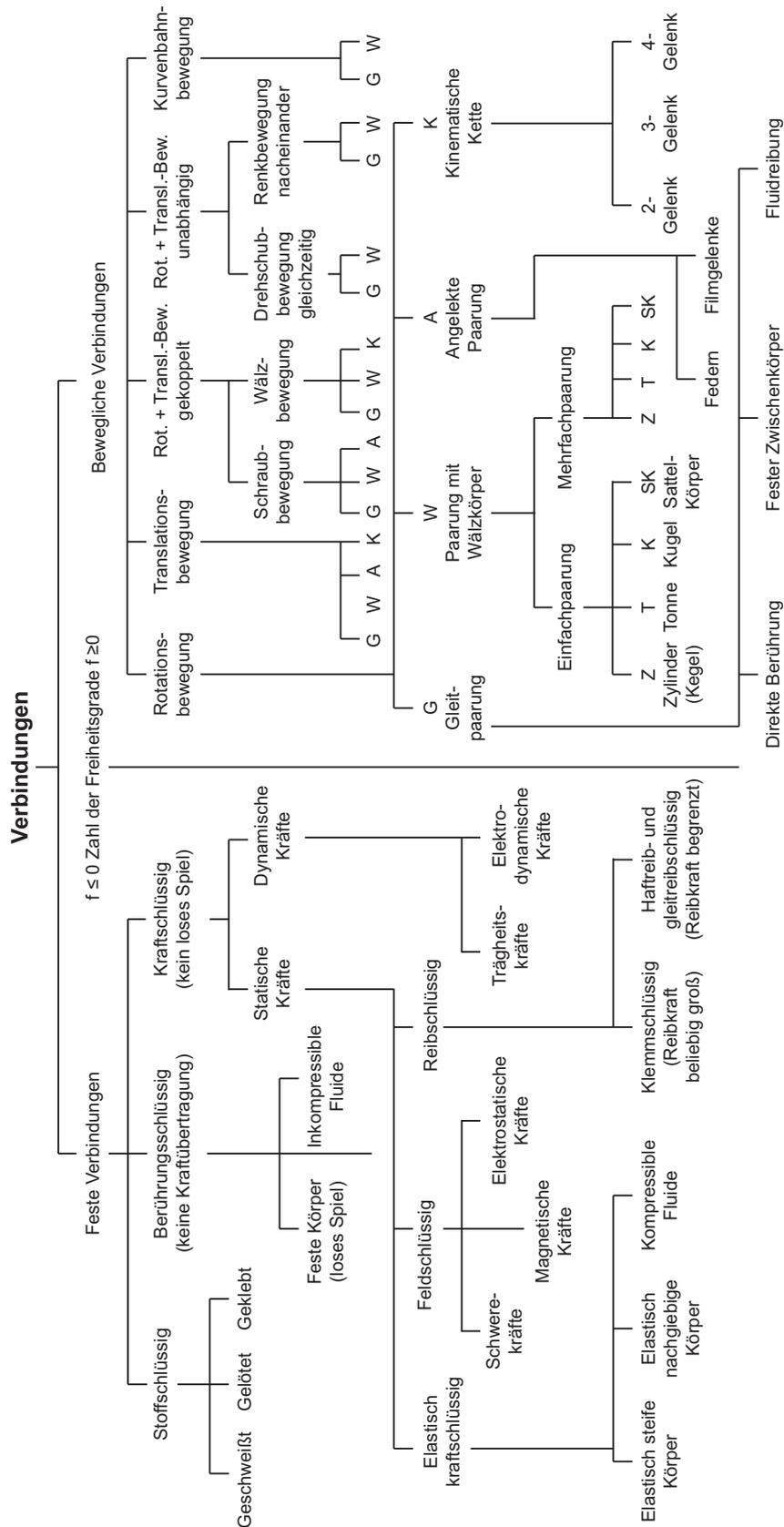


Bild A-15: Klassifikation von Verbindungen fester Körper nach [Rot96, S. 6]

A4.3 Faktoren zur Bestimmung von Montageanforderungen

Tabelle A-4: Übersicht der wesentlichen Faktoren für die Bestimmung der montagerelevanten Anforderungen nach [Rot00, S. 72ff.], [PBF+07, S. 473ff.]

Betrachtungsbereich	Faktoren für montagerelevante Anforderungen
Produktbezogene Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> - Einzelprodukt oder Produktprogramm - Stückzahl und Anzahl der Varianten - Art der Schnittstellen für die Verbindungstechnik
Prozessbezogene Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> - Montagetechnologien (manuell, automatisiert) - Montagewerkzeuge, Betriebsmittel - Montagebedingungen - Prüfanforderungen und Qualitätsmerkmale
Faktoren mit Bezug zum weiteren Produktlebenszyklus:	<ul style="list-style-type: none"> - Transport- und Verpackungsanforderungen - gebrauchsbedingte Anforderungen für erforderliche Montageoperationen durch den Anwender - Montage- und Demontageanforderungen hinsichtlich Instandhaltung, Wartung und Recycling
Menschbezogene Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> - Teilehandhabung (Gewicht, Abmessungen) - Teileerkennbarkeit - Verwechslungsgefahr
Wirtschaftliche Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> - Montagelöhne - Werkzeugkosten - Investitionsbedarf
Normative Faktoren:	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheitstechnische und gesetzliche Restriktionen - Schutzrechte für Montagetechnologien - Werkzeugnormen

A4.4 Gewichtungsfaktoren für die Produktstrukturierung

Paarweiser Vergleich Fragestellung: Wie wichtig ist die Beziehung i (Zeile) verglichen mit der Beziehung j (Spalte)? 0: weniger wichtig 1: gleich wichtig 2: wichtiger		Fluss-beziehungen			Verbindungs-beziehungen				Summe	Gewichtungsfaktor [%]
		Stofffluss	Energiefluss	Informationsfluss	Stoffschluss	Kraftschluss	Formschluss	Bewegliche Verbindung		
Fluss-beziehungen	Stofffluss		1	1	0	0	0	0	2	5
	Energiefluss	1		1	0	0	0	0	2	5
	Informationsfluss	1	1		0	0	0	0	2	5
Verbindungs-beziehungen	Stoffschluss	2	2	2		2	2	2	12	29
	Kraftschluss	2	2	2	0		1	2	9	21
	Formschluss	2	2	2	0	1		2	9	21
	Bewegliche Verbindung	2	2	2	0	0	0		6	14

Bild A-16: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren mittels paarweisem Vergleich

A4.6 Montageorientierte Erzeugnisgliederung

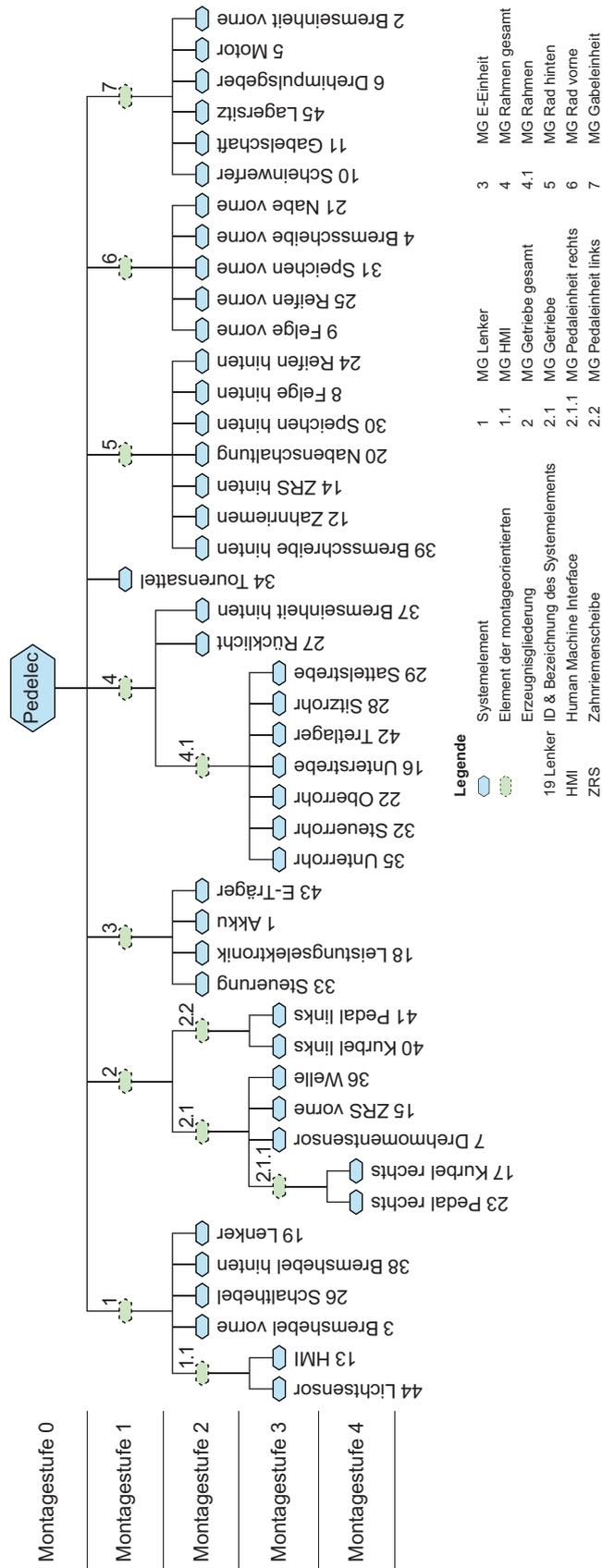


Bild A-18: Montageorientierte Erzeugnisgliederung

A4.7 Gliederungsansätze in der Montage

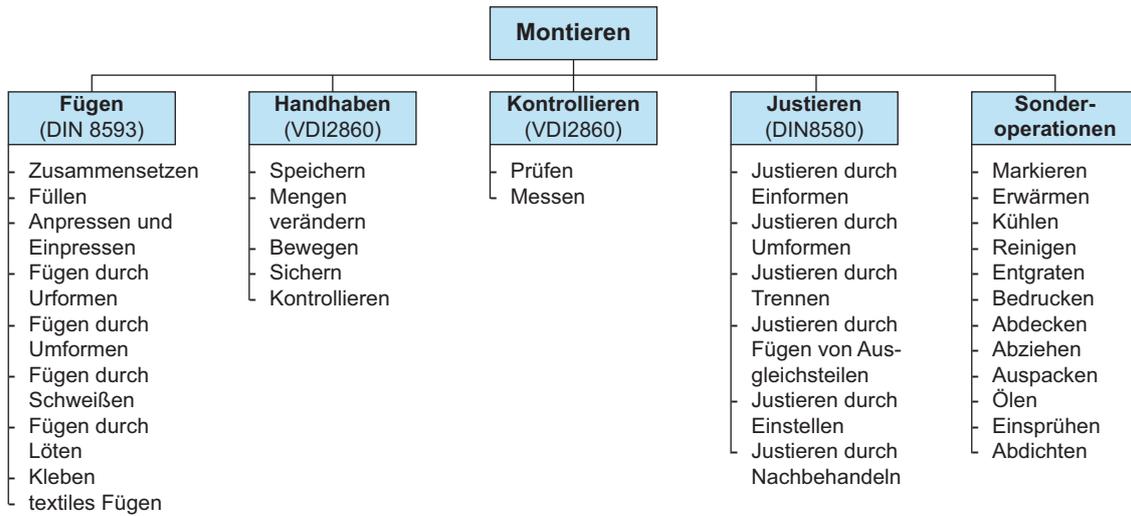
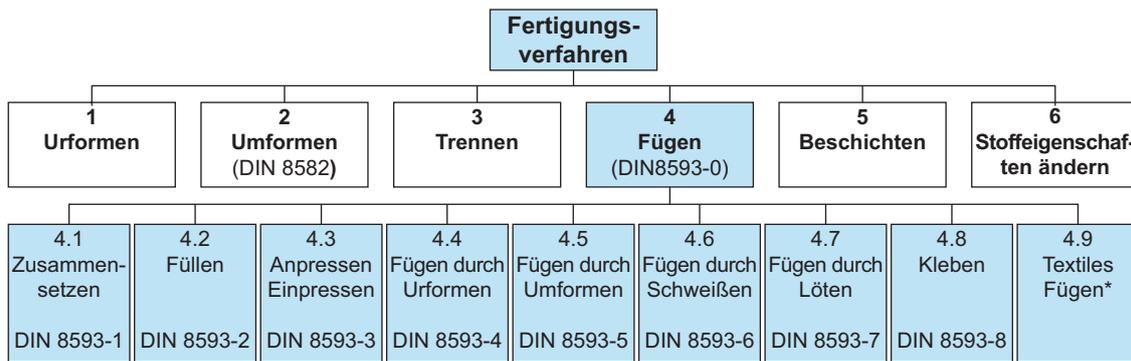


Bild A-19: Übersicht der Montagefunktionen [SH86, S. 591], [Lot06a, S. 2]



* Für das „Textile Fügen“, d.h. das Fertigen von Fäden, textilen Flächengebilden sowie das Fügen mit Fäden als Hilfsmittel (z.B. Nähen), gibt es z.Z. keine Norm. Diese Verfahren sind jedoch in verschiedenen Normen des NA TEXTILNORM beschrieben.

Bild A-20: Übersicht der Fügeverfahren [DIN8593-0, S. 5]

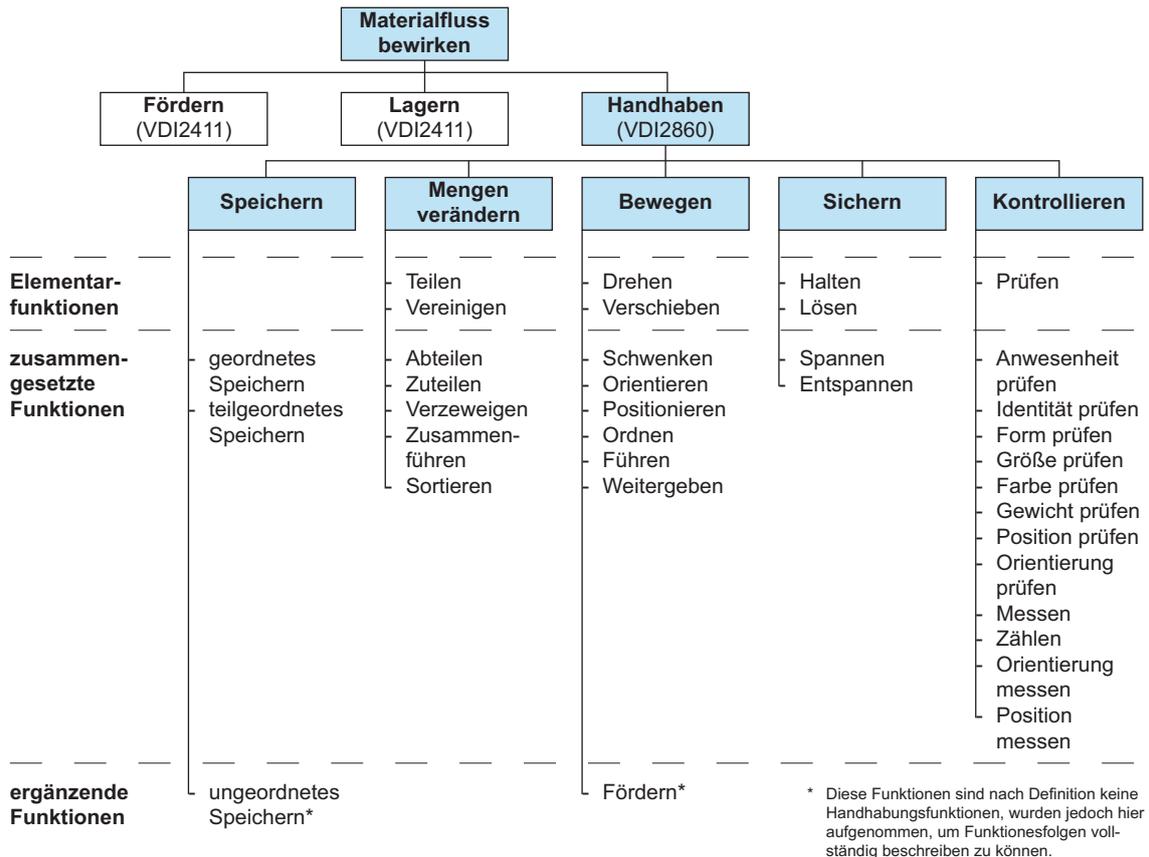


Bild A-21: Übersicht der Handhabungsfunktionen [VDI2860, S. 4]

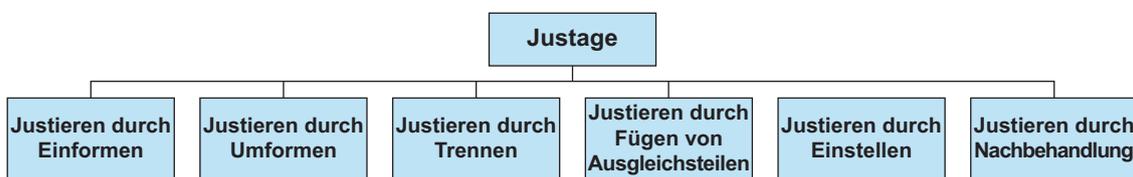


Bild A-22: Übersicht der Justagearten [SH86, S. 592]

A4.8 Bestimmung der Bewertungssumme

Werden die Bewertungssummen auf einer niedrigeren Hierarchieebene ermittelt, sind nur die Eigenschaftswerte innerhalb der übergeordneten Montagegruppe relevant. Die Montagegruppen *MG Rahmen komplett* besteht aus der Montagegruppe *MG Rahmen* sowie den Bauteilen *Rücklicht* und *Bremseinheit hinten*. Die Bewertungssumme für die Montagegruppe *MG Rahmen* ergibt sich als die Zeilensumme innerhalb der übergeordneten Montagegruppe abzüglich der montagegruppeninternen Verbindungen zwischen den Elementen der Montagegruppe *MG Rahmen*. In diesem Fall gehen die Verbindungen der *Sattelstrebe* zum *Rücklicht* und der *Bremseinheit hinten* in die Bewertung ein. Die Verbindungen außerhalb der Montagegruppe *MG Rahmen komplett* (z. B. zwischen *Tretlager* und *Welle*) werden nicht berücksichtigt. Die Bewertungssumme für die Bauteile *Rücklicht* und *Bremseinheit hinten* ergibt sich analog. Die Berechnung ist in Bild A-23 dargestellt.

A4.9 Technologiesteckbrief

Schrauben (Anschrauben, Einschrauben, Verschrauben, Festschrauben)	
Beschreibung	Prinzipskizze
Fügen durch Anpressen mittels selbsthemmenden Gewindes.	
Verfahrensklasse nach [DIN8580], [DIN8593] <ul style="list-style-type: none"> • Hauptgruppe 4 Fügen • Gruppe 4.3 Anpressen / Einpressen • Untergruppe 4.3.1 Schrauben 	
Werkstoffklassen <ul style="list-style-type: none"> • Metalle • NE-Metalle • Kunststoffe • Holz 	Gestaltklassen <ul style="list-style-type: none"> • Prismatisch • Blech • 3-dimensional
Verbindungseigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Verbindungstyp starr • Primäre Schlussart Kraftschluss • Lösbarkeit lösbar* • Art der Verbindung mittelbar • Zugänglich einseitig / beidseitig <p>* Im Allgemeinen ohne Schädigung der Fügeteile.</p>	
Physikalische Attribute <ul style="list-style-type: none"> • Festigkeitsklasse: 4.6 - 12.9 (EN ISO 898-1) • Typisch: M1 - M64 (DIN13-1) 	Vor- / Nachbehandlungen <ul style="list-style-type: none"> • Loch einbringen (Vorgänger -2) • Gewinde einbringen (Vorgänger -1) - optional
Typische Anwendungen <ul style="list-style-type: none"> • Verbindung mittel Schraube-Mutter • Verbindung mittels Schraube-Gewinde(sack)loch 	Weiterführende Quellen <ul style="list-style-type: none"> • Bögel, G.: Konstruktionskatalog „Schraubenverbindungen“. VDI Verlag, Düsseldorf, 1983

Bild A-24: Steckbrief eines Montageverfahrens in Anlehnung an die Technologiesteckbriefe für Fertigungstechnologien nach ASHBY [Ash07, S. 210] (vgl. [Kop84, S. 27])

A4.10 Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK

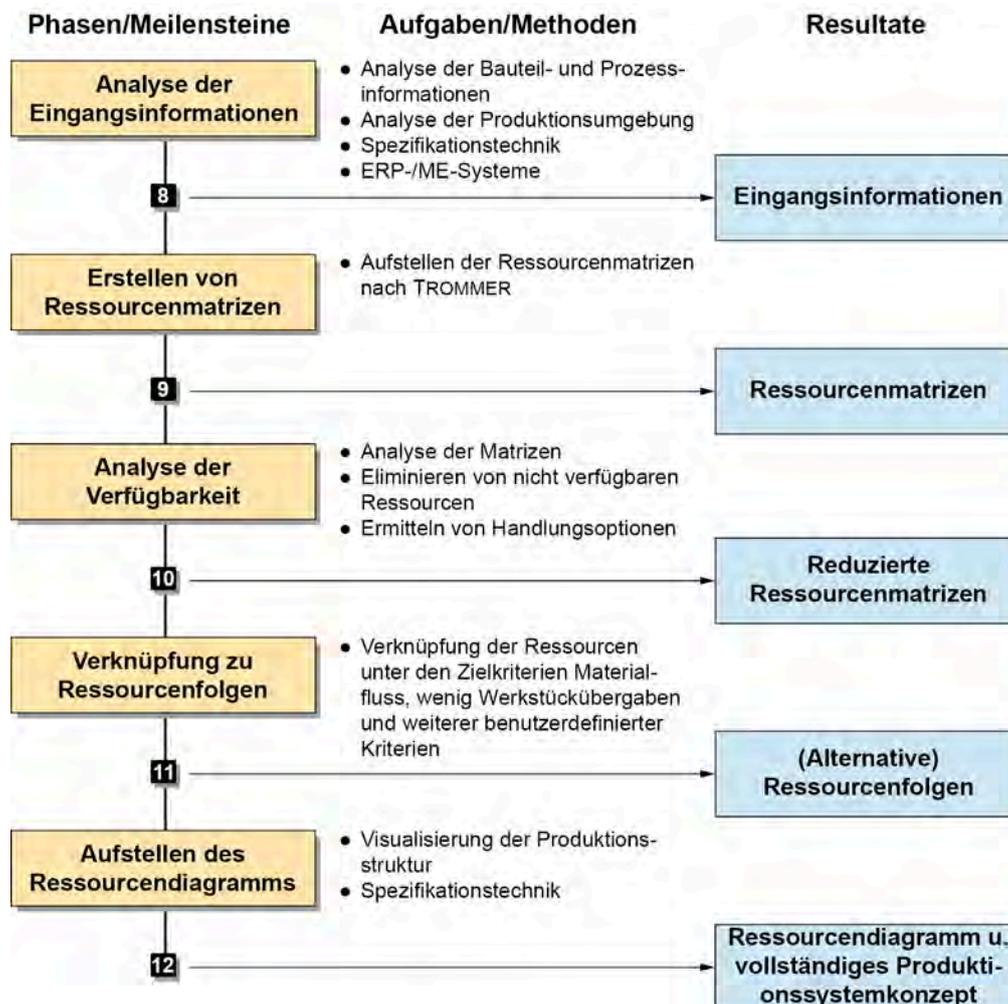


Bild A-25: Vorgehen bei der Konzipierung auf Ressourcenebene nach NORDSIEK
 [Nor12, S. 132]

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: En-route to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today eight Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 1 FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-00-0
- Bd. 2 HORNPOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 2, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-01-9
- Bd. 3 STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 3, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-02-7
- Bd. 4 KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 4, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-03-5
- Bd. 5 HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 5, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-04-3
- Bd. 6 WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-05-1
- Bd. 7 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenariotechnik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 7, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-06-X
- Bd. 8 CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 8, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-07-8
- Bd. 9 HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 9, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-08-6
- Bd. 10 AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, Paderborn, 1995 – ISBN 3-931466-09-4
- Bd. 11 PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 11, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-10-8
- Bd. 12 HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-11-6
- Bd. 13 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENNet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 13, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-12-4
- Bd. 14 PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 14, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-13-2
- Bd. 15 LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-14-0
- Bd. 16 SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 16, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-15-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 17, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-16-7
- Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 18, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-17-5
- Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 19, Paderborn, 1996 – ISBN 3-931466-18-3
- Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 20, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-19-1
- Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 21, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-20-5
- Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 22, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-21-3
- Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 23, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-22-1
- Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 24, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-23-X
- Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 25, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-24-8
- Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologienaher neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 26, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-25-6
- Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 27, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-26-4
- Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 28, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-27-2
- Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 29, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-28-0
- Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 30, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-29-9
- Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 31, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-30-2
- Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 32, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-31-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 33 HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 33, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-32-9
- Bd. 34 SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 34, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-33-7
- Bd. 35 STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 35, Paderborn, 1997 – ISBN 3-931466-34-5
- Bd. 36 MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 36, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-35-3
- Bd. 37 SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 37, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-36-1
- Bd. 38 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 38, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-37-X
- Bd. 39 GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 39, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-38-8
- Bd. 40 REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 40, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-39-6
- Bd. 41 DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 41, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-40-X
- Bd. 42 KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-41-8
- Bd. 43 TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 43, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-42-6
- Bd. 44 GAUSEMEIER, J.; FINK, A; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 44, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-43-4
- Bd. 45 nicht erschienen!
- Bd. 46 VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 46, Paderborn, 1998 – ISBN 3-931466-45-0
- Bd. 47 SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 47, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-46-9
- Bd. 48 GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 48, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-47-7
- Bd. 49 WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 49, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-48-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 50, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-49-3
- Bd. 51 HOLTkamp, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 51, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-50-7
- Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 52, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-51-5
- Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 53, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-52-3
- Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 54, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-53-1
- Bd. 55 SCHÜRholz, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 55, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-54-X
- Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 56, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-55-8
- Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 57, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-56-6
- Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 58, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-57-4
- Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 59, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-58-2
- Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 60, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-59-0
- Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 61, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-60-4
- Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 62, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-61-2
- Bd. 63 LUKOVszKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 63, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-62-0
- Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 64, Paderborn, 1999 – ISBN 3-931466-63-9
- Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMUnet - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 65, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-64-7

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 66, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 67, Paderborn, Band 2000 – ISBN 3-931466-66-3
- Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 68, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-67-1
- Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikationsprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 69, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-68-X
- Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 70, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 71, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-70-1
- Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 72, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931433-71-X
- Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 73, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-72-8
- Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 74, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-73-6
- Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 75, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-74-4
- Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 76, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-75-2
- Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 77, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-76-0
- Bd. 78 SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 78, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-77-9
- Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-78-7
- Bd. 80 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 80, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-79-5
- Bd. 81 RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 81, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-80-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- | | |
|--|--|
| <p>Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 82, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-81-7</p> | <p>Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 90, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-89-2</p> |
| <p>Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 83, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-82-5</p> | <p>Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 91, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-00-X</p> |
| <p>Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbänden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 84, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-83-3</p> | <p>Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 92, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-01-8</p> |
| <p>Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 85, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-84-1</p> | <p>Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 93, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-02-6</p> |
| <p>Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFM). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 86, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-85-X</p> | <p>Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 94, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-03-4</p> |
| <p>Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 87, Paderborn, 2000 – ISBN 3-931466-86-8</p> | <p>Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 95, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-04-2</p> |
| <p>Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 88, Paderborn, 2001 – ISBN 3-931466-87-6</p> | <p>Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 96, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-05-0</p> |
| <p>Bd. 89 nicht erschienen!</p> | <p>Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 97, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-06-9</p> |

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungs-Lenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 98, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-07-7
- Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 99, Paderborn, 2001 – ISBN 9-935433-08-5
- Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 100, Paderborn, 2001 – ISBN-3-935433-09-3
- Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 101, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-10-7
- Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 102, Paderborn, 2001 – ISBN 3-935433-11-5
- Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analyseverfahren zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 103, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-12-3
- Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 104, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-13-1
- Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 105, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-14-X
- Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 106, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-15-8
- Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 107, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-16-6
- Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 108, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-17-4
- Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 109, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-18-2
- Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 110, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-19-0
- Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 111, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-20-4
- Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 112, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-21-2

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 113, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-22-0
- Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 114, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-23-9
- Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 115, Paderborn, 2002 – ISBN 3-935433-24-7
- Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 116, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-25-5
- Bd. 117 EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 117, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-26-3
- Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 118, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-27-1
- Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 119, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-28-X
- Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 120, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-29-8
- Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 121, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-30-1
- Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 122, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-31-X
- Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 123, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-32-8
- Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 124, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-33-6
- Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 125, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-34-4
- Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 126, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-35-2
- Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 127, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-36-0
- Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 128, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-37-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 129, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-38-7
- Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 130, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-39-5
- Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 131, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-40-9
- Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 132, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-41-7
- Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 133, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-42-5
- Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 134, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-43-3
- Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplatzierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 135, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-44-1
- Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 136, Paderborn, 2003 – ISBN 3-935433-45-X
- Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 137, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-46-8
- Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 138, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-47-6
- Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 139, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-48-4
- Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 140, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-49-2
- Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 141, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-50-6
- Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 142, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-51-4
- Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 143, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-52-2
- Bd. 144 HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 144, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-53-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 145, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-54-9
- Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 146, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-55-7
- Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 147, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-56-5
- Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 148, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-57-3
- Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 149, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-58-1
- Bd. 150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 150, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-59-X
- Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 151, Paderborn, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3
- Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 152, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-61-1
- Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 153, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-62-X
- Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 154, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-63-8
- Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-64-6
- Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-65-4
- Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 157, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-66-2
- Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-67-0
- Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 159, Paderborn, 2004 – ISBN 3-935433-68-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, , Band 160, Paderborn 2004 – ISBN 3-935433-69-7
- Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 161, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-70-0
- Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 162, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-71-9
- Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 163, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-72-7
- Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 164, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-73-5
- Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 165, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-74-3
- Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 166, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-75-1
- Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-76-X
- Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 168, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-77-8
- Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-78-6
- Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen für. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 170, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-79-4
- Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 171, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-80-8
- Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 172, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-81-6
- Bd. 173 KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 173, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-82-4
- Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 174, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-83-2
- Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-84-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 176, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-85-9
- Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 177, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-86-7
- Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 178, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-87-5
- Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 179, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-88-3
- Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 180, Paderborn, 2005 – ISBN 3-935433-89-1
- Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 181, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-00-1
- Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 182, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-01-X
- Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 183, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-02-8
- Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 184, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-03-6
- Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 185, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-04-4
- Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 186, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-05-2
- Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 187, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-06-0
- Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 188, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-07-9
- Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 189, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-08-7
- Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 190, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-09-5
- Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 191, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-10-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 192, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-11-7
- Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 193, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-12-5
- Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 194, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-13-3
- Bd. 195 KUHL, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 195, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-14-1
- Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-15-X
- Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 197, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-16-8
- Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhardenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 198, Paderborn, 2006 – ISBN 3-939350-17-6
- Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 199, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7
- Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 200, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4
- Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 201, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0
- Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 202, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7
- Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 203, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4
- Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 204, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1
- Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 205, Paderborn, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8
- Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 206, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2
- Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 208, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9
- Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 209, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6
- Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 210, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3
- Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 211, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9
- Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 212, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6
- Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 213, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3
- Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 214, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0
- Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 215, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7
- Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 216, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4
- Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 217, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1
- Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 218, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8
- Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 219, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5
- Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturnkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 220, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2
- Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project "Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)", Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 222, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5
- Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2
- Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 224, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9
- Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 225, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6
- Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 226, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3
- Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 227, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0
- Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 228, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7
- Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 229, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4
- Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-49-1
- Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 231, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7
- Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4
- Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 233, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1
- Bd. 234 ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; TSCHUSCHNER, T.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-53-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 235, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-54-5
- Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP, J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 236, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2
- Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 237, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9
- Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 238, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6
- Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 239, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3
- Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 240, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0
- Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 241, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6
- Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 242, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3
- Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 243, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0
- Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 244, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7
- Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 245, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4
- Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 246, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1
- Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 247, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8
- Bd. 248 KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-67-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 249 GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 249, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-68-2
- Bd. 250 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 250, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-69-9
- Bd. 251 LESSMANN, J.: Protocols for Telephone Communications in Wireless Multi-Hop Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 251, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-70-5
- Bd. 252 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 252, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-71-2
- Bd. 253 KLÖPPER, B.: Ein Beitrag zur Verhaltensplanung für interagierende intelligente mechatronische Systeme in nicht-deterministischen Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 253, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-72-9
- Bd. 254 Low, C. Y.: A Methodology to Manage the Transition from the Principle Solution towards the Controller Design of Advanced Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 254, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-73-6
- Bd. 255 XU, F.: Resource-Efficient Multi-Antenna Designs for Mobile Ad Hoc Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 255, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-74-3
- Bd. 256 MÜLLER, T.: Integration von Verlässlichkeitsanalysen und -konzepten innerhalb der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 256, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-75-0
- Bd. 257 BONORDEN, O.: Versatility of Bulk Synchronous Parallel Computing: From the Heterogeneous Cluster to the System on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 257, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-76-7
- Bd. 258 KORTENJAN, M.: Size Equivalent Cluster Trees - Rendering CAD Models in Industrial Scenes. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 258, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-77-4
- Bd. 259 SCHOMAKER, G.: Distributed Resource Allocation and Management in Heterogeneous Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 259, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-78-1
- Bd. 260 MENSE, M.: On Fault-Tolerant Data Placement in Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 260, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-79-8
- Bd. 261 LÜRWER-BRÜGGEMEIER, K.: Mächtigkeit und Komplexität von Berechnungen mit der ganzzahligen Division. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 261, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-80-4
- Bd. 262 ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 262, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-81-1

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 263 MAHAJAN, K.: A combined simulation and optimization based method for predictive-reactive scheduling of flexible production systems subject to execution exceptions. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 263, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-82-8
- Bd. 264 CHRISTIANSEN, S. K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegradbasierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 264, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-83-5
- Bd. 265 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 5. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 19. und 20. November 2009, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 265, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-84-2
- Bd. 266 KAULMANN, T.: Ressourceneffiziente Realisierung Pulsmoderter Neuronaler Netze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 266, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-85-9
- Bd. 267 WEHRMEISTER, M. A.: An Aspect-Oriented Model-Driven Engineering Approach for Distributed Embedded Real-Time Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 267, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-86-6
- Bd. 268 DANNE, C.: Assessing the Cost of Assortment Complexity in Consumer Goods Supply Chains by Reconfiguration of Inventory and Production Planning Parameters in Response to Assortment Changes. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 268, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-87-3
- Bd. 269 AUFENANGER, M.: Situativ trainierte Regeln zur Ablaufsteuerung in Fertigungssystemen und ihre Integration in Simulationssysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 269, Paderborn, 2009 – ISBN 978-3-939350-88-0
- Bd. 270 STOLL, K.: Planung und Konzipierung von Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 270, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-89-7
- Bd. 271 IHMELS, S.: Verfahren zur integrierten informationstechnischen Unterstützung des Innovationsmanagements. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 271, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-90-3
- Bd. 272 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 272, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-91-0
- Bd. 273 PURNAPRAJNA, M.: Run-time Reconfigurable Multiprocessors. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 273, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-92-7
- Bd. 274 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 274, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-93-4
- Bd. 275 WEDMAN, S.: Lebensdauerüberwachung in mechatronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 275, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-94-1
- Bd. 276 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 28. und 29. Oktober 2010, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 276, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-95-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 277 HUBER, D.: Geregelt Vereinfachung hierarchischer Partitionen von Modellen in der Materialflusssimulation. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 277, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-96-5
- Bd. 278 DEGENER, B.: Local, distributed approximation algorithms for geometric assignment problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 278, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-97-2
- Bd. 279 WARKENTIN, A.: Systematik zur funktionsorientierten Modellierung von Elektrik/Elektronik-Systemen über den Produktlebenszyklus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 279, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-98-9
- Bd. 280 BRINK, V.: Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 280, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-939350-99-6
- Bd. 281 SAMARA, S.: Adaptable OS Services for Distributed Reconfigurable Systems on Chip. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 281, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-00-7
- Bd. 282 BIENKOWSKI, M.: Page migration in dynamic networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 282, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-01-4
- Bd. 283 MAHLMANN, P.: Peer-to-peer networks based on random graphs. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 283, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-02-1
- Bd. 284 DYNIA, M.: Collective graph exploration. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 284, Paderborn, 2010 – ISBN 978-3-942647-03-8
- Bd. 285 POHL, C.: Konfigurierbare Hardwarebeschleuniger für selbst-organisierende Karten. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 285, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-04-5
- Bd. 286 DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-05-2
- Bd. 287 MEHLER, J.: Power-Aware Online File Allocation in Dynamic Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 287, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-06-9
- Bd. 288 HARCHENKO, J.: Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeuffederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 288, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-07-6
- Bd. 289 KORZENIOWSKI, M.: Dynamic Load Balancing in Peer-to-Peer Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 289, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-08-3
- Bd. 290 FRAHLING, G.: Algorithms for Dynamic Geometric Data Streams. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 290, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-09-0
- Bd. 291 REYES PÉREZ, M.: A Specification Technique for the Conceptual Design of Manufacturing Systems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 291, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-10-6

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 292 STEHR, J.: On the design and implementation of reliable and economical telematics software architectures for embedded systems: a domain-specific framework. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 292, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-11-3
- Bd. 293 KRÖL, R.: Eine Reduktionsmethode zur Ableitung elektromechanischer Ersatzmodelle für piezoelektrische Wandler unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 293, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-12-0
- Bd. 294 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-13-7
- Bd. 295 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 295, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-14-4
- Bd. 296 POOK, S.: Eine Methode zum Entwurf von Zielsystemen selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 296, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-15-1
- Bd. 297 MRACEK, M.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens gekoppelter piezoelektrischer Ultraschallmotoren mit Stoßkontakt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 297, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-16-8
- Bd. 298 GEHWEILER, J.: Peer-to-Peer Based Parallel Web Computing. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 298, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-17-5
- Bd. 299 BRUNS, T.: Trajektorienplanung mittels Diskretisierung und kombinatorischer Optimierung am Beispiel des autonomen Kreuzungsmanagements für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 299, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-18-2
- Bd. 300 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 7. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 24. und 25. November 2011, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 300, Paderborn, 2011 – ISBN 978-3-942647-19-9
- Bd. 301 SALFELD, M.: Konzeption eines Regelungssystems zur gezielten Beeinflussung der Fahrdynamik in Unfallsituationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 301, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-20-5
- Bd. 302 KEMPKES, B.: Local Strategies for Robot Formation Problems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 302, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-21-2
- Bd. 303 DELIUS, R.: Sicherstellen der Abrufe bei Automotive-Zulieferern mit minimalen Kosten unter besonderer Berücksichtigung von Liquiditäts-, Beschäftigungs-, Knowhow- und IT-Restriktionen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 303, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-22-9
- Bd. 304 NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-23-6
- Bd. 305 KREFT, S.: Systematik zur effizienten Bildung geospezifischer Umgebungsmodelle für Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 305, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-24-3

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 306 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 8. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 6. und 7. Dezember 2012, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 306, Paderborn, 2012 – ISBN 978-3-942647-25-0
- Bd. 307 REYMANN, F.: Verfahren zur Strategieentwicklung und -umsetzung auf Basis einer Retropolation von Zukunftsszenarien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 307, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-26-7
- Bd. 308 KAHL, S.: Rahmenwerk für einen selbstoptimierenden Entwicklungsprozess fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 308, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-27-4
- Bd. 309 WASSMANN, H.: Systematik zur Entwicklung von Visualisierungstechniken für die visuelle Analyse fortgeschrittener mechatronischer Systeme in VR-Anwendungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 309, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-28-1
- Bd. 310 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-29-8
- Bd. 311 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 311, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-30-4
- Bd. 312 BENSIEK, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 312, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-31-1
- Bd. 313 KOKOSCHKA, M.: Verfahren zur Konzipierung imitationsgeschützter Produkte und Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 313, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-32-8
- Bd. 314 VON DETTEN, M.: Reengineering of Component-Based Software Systems in the Presence of Design Deficiencies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 314, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-33-5
- Bd. 315 MONTEALEGRE AGRAMONT, N. A.: Immunorepairing of Hardware Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 315, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-34-2
- Bd. 316 DANGELMAIER, W.; KLAAS, A.; LAROQUE, C.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-35-9
- Bd. 317 PRIESTERJAHN, C.: Analyzing Self-healing Operations in Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 317, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-36-6
- Bd. 318 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5. und 6. Dezember 2013, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 318, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-37-3
- Bd. 319 GAUSEMEIER, S.: Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 319, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-38-0

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 320 GEISLER, J.: Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 320, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-39-7
- Bd. 321 MÜNCH, E.: Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 321, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-40-3
- Bd. 322 RENKEN, H.: Acceleration of Material Flow Simulations - Using Model Coarsening by Token Sampling and Online Error Estimation and Accumulation Controlling. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 322, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-41-0
- Bd. 323 KAGANOVA, E.: Robust solution to the CLSP and the DLSP with uncertain demand and online information base. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 323, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-42-7
- Bd.324 LEHNER, M.: Verfahren zur Entwicklung geschäftsmodell-orientierter Diversifikationsstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 324, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-43-4