

Christoph Jürgehake

***Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID
(Molded Interconnect Devices)***

***Systematic for prototype-based development of mechatronic systems in the technology MID
(Molded Interconnect Devices)***

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.

Band 376 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2017

ISSN (Print): 2195-5239

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-942647-95-3

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.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Christoph Jürgehake

Hersteller: readbox unipress in der readbox publishing GmbH
Münster

Printed in Germany

Geleitwort

Das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn sowie das Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik sind interdisziplinäre Forschungszentren für das Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und der Softwaretechnik, das der Begriff Mechatronik zum Ausdruck bringt. Das übergeordnete Ziel des von uns vertretenen Fachgebiets „Produktentstehung“ ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen des Maschinenbaus und verwandter Branchen. Mechatronische Systeme reichen von vernetzten intelligenten technischen Systemen, Mehrkörpersystemen mit kontrolliertem Bewegungsverhalten bis zu Baugruppen, bei denen die räumliche Integration von Mechanik und Elektronik im Vordergrund steht.

Letztere stehen im Fokus der vorliegenden Arbeit. Die wesentlichen Potentiale räumlich integrierter mechatronischer Systeme liegen in der Miniaturisierung, der Rationalisierung der Fertigung und der hohen geometrischen Gestaltungsfreiheit in der Produktentwicklung. Die Technologie MID (Molded Interconnect Devices) stellt dabei eine Schlüsseltechnologie dar, die Mechanik und Elektronik in einem Bauteil integriert. MID steht dabei für einen Oberbegriff, der verschiedene Fertigungstechnologien subsumiert.

Das Besondere bei der Entwicklung von MID-Produkten ist, dass jede einzelne Fertigungstechnologie mit unterschiedlichen Fertigungsrestriktionen und Materialien einhergeht und zwischen Produkt und Fertigungsprozess starke Wechselwirkungen bestehen. Das führt dazu, dass bereits das Produktkonzept mögliche MID-Fertigungstechnologien determiniert und umgekehrt verfügbare Technologien das MID-Produktkonzept beeinflussen. Eine frühzeitige Eigenschaftsabsicherung im Produktentstehungsprozess ist daher von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung von Produktideen. Ein vielversprechender Ansatz ist deshalb der Einsatz von physischen Prototypen und entwicklungsbegleitenden Produktmustern.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Jürgenhake eine Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID entwickelt. Sie dient als Leitfaden für die Entwicklung von MID-Produkten. Im Kern besteht die Systematik aus drei Vorgehensmodellen und einem unterstützenden Methodenset, das den grundsätzlichen Ablauf der MID-Entwicklung beschreibt und diesen unterstützt.

Die von Herrn Jürgenhake entwickelte Systematik liefert einen wichtigen Beitrag zur weiteren Etablierung der Technologie MID. Sie bildet die Grundlage für ein softwarebasiertes Entwicklungstool, das auch unerfahrenen Entwicklern den Zugang zu dieser hochinnovativen Technologie ermöglicht.

Paderborn, im Oktober 2017

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Prof. Dr.-Ing. R. Dumitrescu

**Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung
mechatronischer Systeme in der Technologie MID
(Molded Interconnect Devices)**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Christoph Jürgehake
aus Lippstadt

Tag des Kolloquiums:
Referent:
Korreferent:

19. Juli 2017
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die stets fordernde fachliche als auch persönliche Aus- und Weiterbildung in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Seine Kritik war stets knapp, treffend und konstruktiv und in jeder Hinsicht die Grundlage für das Streben nach kontinuierlicher Verbesserung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Professor Dr.-Ing. Roman Dumitrescu. Er war es, der mich damals abgeworben und für den wissenschaftlichen Weg hin zur Promotion begeistert hat. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, selbstständig zu handeln und gestaltend mitzuwirken und daher maßgeblichen Anteil an dieser Weichenstellung in meiner beruflichen Laufbahn. Mit großer Dankbarkeit blicke ich auf die zurückliegenden sechs Jahre zurück.

Ferner danke ich allen Arbeitskollegen für die sehr gute Zusammenarbeit, die vielen hilfreichen Diskussionen und die schöne Zeit am Institut. Für die stets konstruktiven Diskussionen im Rahmen meiner Dissertation danke ich besonders: Dr.-Ing. Harald Anacker, Tommy Falkowski, Christian Fechtelpeter und Dr.-Ing. Thomas Schierbaum. Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, die mich bei meiner Arbeit durch ihre Bachelor- und Masterarbeiten oder durch ihre studentische Hilfstätigkeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gehört ebenfalls meiner Familie für ihr Vertrauen und die Unterstützung auf dem gesamten Weg: in erster Linie der Dank an meine Eltern, die mir das Studium ermöglicht und mich stets unterstützt haben; aber auch der Dank an meine Schwester, meinen Schwager und meine Schwiegereltern für die fortwährende Motivation und Unterstützung.

Der größte Dank gilt meiner Frau Stefanie. Sie war in dieser Zeit immer für mich da, hat mir den Rücken freigehalten und stets an mich geglaubt.

Paderborn, im Oktober 2017

Christoph Jürgenhake

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [DGJ+12] DUMITRESCU, R.; GAUKSTERN, T.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.; KÜHN, A.: Pattern-based integrative design of Molded Interconnect Devices (MID). DESIGN Conference 2012, May 21-24, Dubrovnik, 2012
- [DJG12] DUMITRESCU, R.; JÜRGENHAKE, C.; GAUSEMEIER, J.: Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe. In: Proceedings of 1st Joint International Symposium on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, 2012
- [GJD+13] GAUSEMEIER, J.; GAUKSTERN, T.; JÜRGENHAKE, C.; DUMITRESCU, R.: Eine Methodik für den wissensbasierten Entwurf von dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträgern (MID). In: GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, W. (Hrsg.): 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 310, 18.-19. April, Paderborn 2013
- [JSF+13] JÜRGENHAKE, C.; SCHIERBAUM, T.; FISCHER, C.; DUMITRESCU, R.: Integrative Entwicklung von MID-Bauteilen, in FRANKE, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID) – Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger, Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3D-MID e.V., Nürnberg, Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [JFD+14] JÜRGENHAKE, C.; FECHTELPETER, C.; DUMITRESCU, R.; HEIDSIEK, D.: Optimized process sequences for prototyping of molded interconnect devices, In: Advances Materials Research Vol. 1038 (2014) pp 19-27, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014
- [JSF14] JÜRGENHAKE, C.; SCHIERBAUM, T.; FALTUS, F.: Entwicklungsplaner zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Entwicklung von MID-Produkten (MID-Plan), In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 12/2014, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2014
- [JSF+14] JÜRGENHAKE, C.; SCHIERBAUM, T.; FISCHER, C.; DUMITRESCU, R.: Integrative Development of MID, in FRANKE, J. (Hrsg): Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID) - Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers, Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3D-MID e.V., Nürnberg, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [JFF15] JÜRGENHAKE, C.; FECHTELPETER, C.; FRITZ, K.-P.: Zuverlässigkeit bei MID - Hemmnisse, Handlungsfelder, Potentiale (Abschluss). In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 04/2015, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2015
- [JD16] JÜRGENHAKE, C.; DUMITRESCU, R.: Systematic for function-oriented development of spatial integrated circuit carriers, International Design Conference - Design 2016, Dubrovnik, Croatia, May 16 - 19, 2016

- [JFF+16] JÜRGENHAKE, C.; FALKOWSKI, T.; FECHTELPETER, C.; DUMITRESCU, R.: Function-based feasibility study and benchmark for MID concepts, Sysint - 3rd International Conference on System-Integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering, Paderborn, Germany, 2016
- [FJD+16] FECHTELPETER, C.; JÜRGENHAKE, C.; MAGER, T.; DUMITRESCU, R.; FRITZ, K.-P.; GRÖZINGER, T.; MÜLLER, H.; WILD, P.; ZIMMERMANN, A.: Reliability in MID - barriers, potentials, fields of action, 12th International Congress on Molded Interconnect Devices, Conference Proceedings, 28th – 30th September, Würzburg, 2016
- [JFD16] JÜRGENHAKE, C.; FALKOWSKI, T.; DUMITRESCU, R.: Classification of MID-prototypes. 12th International Congress on Molded Interconnect Devices, Conference Proceedings, 28th – 30th September, Würzburg, 2016

Zusammenfassung

Die effiziente Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices) ist aufgrund der Vielzahl möglicher Fertigungstechnologien und deren engen Wechselwirkungen mit dem Produkt eine Herausforderung, der es systematisch zu begegnen gilt. Produkt und Produktionsprozess sind von Beginn an integrativ zu entwickeln. Eine modellunterstützte Entwicklung ist für den facettenreichen Entwicklungsprozess unverzichtbar. Virtuelle Prototypen und Modelle bilden jedoch die komplexen Abhängigkeiten zwischen mechanischem und elektronischem Design sowie zwischen Produkt- und Prozessentwicklung nur unvollständig ab. Physische Prototypen bieten hingegen die Möglichkeit, diesen Anforderungen bereits frühzeitig gerecht zu werden. Der entwicklungsbegleitende systematische Einsatz von Prototypen wird jedoch bislang nur unzureichend unterstützt.

Die vorliegende Arbeit stellt eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* vor. Im Fokus steht dabei die Entwicklung des originären räumlichen Schaltungsträgers. Die Systematik umfasst drei Vorgehensmodelle, die als Leitfaden für die zielgerichtete Entwicklung dienen, ein MID-Methodenset, zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses und ein softwarebasiertes Planungstool, das auch unerfahrenen Anwendern die Nutzung der Systematik ermöglicht.

Abstract

The efficient development of mechatronic systems in the technology MID (Molded Interconnect Devices) is a challenge due to the large number of possible process technologies and their close interaction with the product, which has to be addressed systematically. The product and the production process must be developed integratively from the outset. A model-based development is indispensable for the multi-faceted development process. However, virtual prototypes and models do not completely reflect the complex dependencies between mechanical and electronic design as well as between product and process development. Physical prototypes conversely offer the possibility to meet these requirements at an early stage. However, the systematic use of prototypes is not yet supported sufficiently.

This work presents a systematic for a prototype-based development of mechatronic systems in the technology MID. The focus lies on the development of the original spatial circuit carrier. The systematic includes three procedure models, which serve as a guideline for targeted development, an MID method set that helps supporting the product creation process and a software-based planning tool that enables even inexperienced users to utilize the systematic.

Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung	1
1.1	Problematik.....	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Vorgehensweise	5
2	Problemanalyse	7
2.1	Begriffsbestimmungen	7
2.1.1	Begriffe der Produktentstehung.....	7
2.1.2	Begriffe der Elektronik	10
2.2	Mechatronische Systeme	12
2.2.1	Grundstruktur mechatronischer Systeme	13
2.2.2	Klassen mechatronischer Systeme	14
2.2.3	Differential- und Integralbauweise	15
2.3	Technologie MID	16
2.3.1	MID-Herstellverfahren	17
2.3.2	Potentiale und Herausforderungen der Technologie MID	23
2.4	Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen	25
2.4.1	Zyklenmodell der Produktentstehung.....	25
2.4.2	Machbarkeit mechatronischer Systeme	27
2.4.3	Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.....	27
2.4.4	Konzipieren mechatronischer Systeme	30
2.4.5	Produktfunktionen und Lösungen.....	34
2.4.6	Einsatz von Lösungsmustern	35
2.4.7	Konstruktionskataloge	36
2.5	Prototypen	37
2.5.1	Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing.....	37
2.5.2	Verfahren zur Herstellung des Grundkörpers.....	39
2.5.2.1	Generative Fertigungsverfahren.....	39

2.5.2.2	Halbzeug-Fräsen.....	43
2.5.2.3	Spritzguss	43
2.5.2.4	MID-spezifische Verfahren	44
2.5.3	Verfahren zur Strukturierung des Grundkörpers	46
2.5.3.1	Laserdirektstrukturierung.....	46
2.5.3.2	Druckverfahren.....	47
2.6	Problemabgrenzung	47
2.7	Anforderungen an die Systematik.....	50
3	Stand der Technik.....	53
3.1	Prototypen im Produktentstehungsprozess	53
3.1.1	Verifikationsmodelle im multidisz. Design nach KONDOH ET AL.....	53
3.1.2	Integration von Rapid Prototyping in den PEP nach KRAUSE	54
3.1.3	Klassifikation von Prototypen nach VDI 3404/3405.....	55
3.1.4	MID-spezifische Prototypen-Klassifikationen nach KÜCK	57
3.2	Frühzeitige Abschätzung der Machbarkeit.....	59
3.2.1	Technologieentwicklungsprozess nach SCHUH	60
3.2.2	Integrations- und Umsetzungsstrategien nach GOTH	62
3.2.3	Wirtschaftlichkeitsanalysen zur Abschätzung der Machbarkeit	65
3.2.4	Prozessübergangskosten nach Franke	68
3.3	Entwicklung mechatronischer Systeme	68
3.3.1	VDI-Richtlinie 2221.....	69
3.3.2	VDI-Richtlinie 2206.....	70
3.3.3	Suche und Informationsbereitstellung nach AVENARIUS.....	72
3.3.4	Produktoptimierung nach PEITZ.....	73
3.3.5	Entwicklung mechatronischer Systeme nach KAISER	76
3.3.6	Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik nach WATTY.....	79
3.3.7	Entwicklungsleitfäden.....	80
3.3.8	Produktentwicklung generativer Produkte nach BREUNINGER.....	82
3.4	Integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem.....	84
3.4.1	Generieren alternativer Technologieketten nach FALLBÖHMER	85
3.4.2	Produktionsalternativen nach MÜLLER	88
3.4.3	Auswahl von Fertigungstechnologien nach ASHBY	90
3.4.4	Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK	93
3.4.5	Integrierte Planung von Fertigungssystemen nach STEIMER	96
3.5	Handlungsbedarf	97

4	Systematik.....	101
4.1	Die Systematik im Überblick	102
4.2	MID-Prototypen	103
4.2.1	Erweiterter Referenzprozess	103
4.2.2	Entwicklungsbegleitende Prototypen.....	104
4.2.3	MID-Prototypenklassen	106
4.2.3.1	Geometriemuster	107
4.2.3.2	Konzeptmuster	109
4.2.3.3	Funktionsmuster.....	111
4.2.3.4	Serienmuster.....	112
4.2.3.5	Branchenspezifische Erweiterung	113
4.3	Vorgehen und MID-Methodenset.....	116
4.3.1	Stufe 1: Machbarkeit analysieren	118
4.3.2	Stufe 2: Prozessketten konzipieren	123
4.3.3	Stufe 3: Eigenschaften absichern.....	138
4.4	Software-Tool MID-Planer	143
5	Anwendung der Systematik.....	145
5.1	Anwendungsbeispiel MIDster	145
5.1.1	Stufe 1: Machbarkeit analysieren	146
5.1.2	Stufe 2: Prozessketten konzipieren	154
5.1.3	Stufe 3: Eigenschaften absichern.....	159
5.2	Bewertung der Anforderungserfüllung der Systematik	164
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	167

Anhang

A1	Erweiterter Stand der Technik.....	173
A1.1	Produktstrukturierung nach DAHL.....	173
A1.2	Alternative Fertigungsfolgen nach TROMMER	174

A2	Frühzeitige Analyse der Machbarkeit	177
A2.1	MID-Produktkonzeptspezifikation	177
A2.2	MID-Profil.....	179
A3	Integrative Konzipierung von Prozessketten	181
A3.1	Erweiterter MID-Konstruktionskatalog	181
A3.2	Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix	183
A3.3	Prozess-Kompatibilitätsmatrix	184
A3.4	Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix	185
A3.5	Kompatibilität erweiterter Prozess-Anforderungen	186
A4	Frühzeitige Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen.....	187
A4.1	Prototypenklassen	187
A4.2	Branchenspezifische Erweiterungen	196

Abkürzungsverzeichnis

AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
etc.	et cetera
FDM	Fused Deposition Modelling
FLM	Fused Layer Modelling
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R.	in der Regel
IPC	Association Connecting Electronics Industries, ehem. Institute for Printed Circuits
LDS	Laserdirektstrukturierung
LSS	Lasersubtraktivstrukturierung
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MDM	Multiple-Domain Matrix
o.Ä.	oder Ähnlichem
SE	Systems Engineering
SLS	selektives Lasersintern
sog.	sogenannte/n
STL	Stereolithographie
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts *MID-Plan – „Entwicklungsplaner zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Entwicklung von MID-Produkten“*¹ (IGF-Vorhaben 18445 N / 1) der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF). Das Ziel des Forschungsvorhabens war ein MID-Entwicklungsplaner, der den Entwickler beim MID-gerechten Konstruieren unterstützt und auf einem umfassenden methodischen Instrumentarium aufbaut. Die beschriebene *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* adressiert den entwicklungsbegleitenden Einsatz physikalischer Prototypen zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung im Produktentstehungsprozess von MID-Bauteilen und liefert einen Beitrag zu diesem Instrumentarium.

1.1 Problematik

Die internationale Wettbewerbsarena ist geprägt durch einen hohen Wettbewerbsdruck, kürzer werdende Produktlebenszyklen, die rasche Abfolge von Softwareinnovationen sowie durch eine steigende Komplexität technischer Systeme. Die Komplexität ist bedingt durch eine Integration ehemals getrennter Entwicklungsdisziplinen und der fortschreitenden Technologieentwicklung. Ein wesentlicher Treiber ist hierbei die Digitalisierung vormalig rein mechanisch geprägter Produkte hin zu hochintegrierten cyber-physischen Systemen² [Bro10]. Die Vision eines Internet der Dinge, also der allgegenwärtigen Verfügbarkeit von kleinsten, miteinander meist drahtlos vernetzten internetfähigen Computern, welche quasi unsichtbar in beliebige Alltagsgegenstände eingebaut sind, wurde bereits in den 1990ern von Mark Weiser postuliert [Wei91]. Ein wesentlicher Meilenstein für die Umsetzung der Vision war die Etablierung des Internet-Protokoll-Standards IPv6, der den Adressraum des etablierten IPv4-Protokolls von 2^{32} Adressen auf 2^{128} Adressen bei IPv6 vergrößert hat und in den kommenden Jahren eingeführt wird.

Die enge Vernetzung physischer Objekte (über Sensoren, Aktuatoren, mobile Geräte) mit digitalen Diensten (über Software, digitale Netze) bildet ein Schlüsselement bei der Umsetzung leistungsfähiger Systeme. Ein Schaltungsträger, der die Halbleiter-Bauelemente (Chips, Sensoren) verbindet und eine Einbettung in das Produkt ermöglicht, ist

¹ MID ist die Abkürzung für Molded Interconnect Devices und wird im Deutschen auch als spritzgegosene Schaltungsträger bezeichnet. Durch die beliebige Gestaltungsfreiheit des Spritzgießprozesses und die strukturierte Metallisierung können in MID-Teile direkt mechanische und elektrische, aber auch andere, wie z.B. optische, fluidische und thermische Funktionalitäten integriert werden. FRANKE verwendet neben dem historisch gewachsenen Molded Interconnect Devices auch den Begriff Mechatronic Integrated Devices [Fra13].

² Nach BROY adressieren Cyber-Physical Systems die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen (dem „Cyberspace“) [Bro10].

hierfür essenziell. Insbesondere der räumlichen Integration, einer Steigerung der Funktionsdichte und der damit einhergehenden Miniaturisierung kommt eine entscheidende Rolle zu.

Die Fortschritte bei Halbleiter-Schaltungsträgern hängen maßgeblich von den prozesstechnischen Entwicklungen in der Silizium-Chip-Technologie ab (Wafer-Herstellung, Ätzen, Belichten). Die Kosten für die Entwicklungen neuer Chips und Produktionsanlagen gehen dabei in die Milliarden. Bei räumlich integrierten Schaltungsträgern hingegen stehen die individuellen, produktspezifischen Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) im Vordergrund [Kai09]. **Daher bietet die Funktionsintegration in räumliche Schaltungsträger einen Stellhebel zur Umsetzung innovativer Produktideen für cyber-physischer-Systeme.**

Vor diesem Hintergrund bietet die **MID-Technologie** zur Herstellung **räumlicher Schaltungsträger**, einen vielversprechenden Ansatz. Diese Technologie erlaubt es, spritzgossene Formteile direkt durch partielle Metallisierung als Schaltungsträger zu nutzen. Durch die Integration von mechanischen und elektronischen Funktionen auf einem räumlichen Schaltungsträger können Baugruppen mit hoher Funktionssicherheit und -dichte sowie einem erheblichen Miniaturisierungsgrad realisiert werden. Zur Umsetzung stellt die Technologie MID eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung [Fra13]. Anwendungen aus unterschiedlichen Branchen wie der Kommunikations-, Automobil- oder Medizintechnik zeigen die Potentiale im Vergleich zu herkömmlichen Technologien (z.B. flexible Leiterplatten) [Fra13], [JFD+14]. Insbesondere der Aspekt der dreidimensionalen Ausrichtung und Integration von Kommunikationsantennen ist für vernetzte cyber-physische Systeme von hoher Relevanz.

Die Entwicklung räumlicher Schaltungsträger ist, wie bei allen mechatronischen Produkten, durch die synergetische Zusammenarbeit einer Vielzahl von Fachdisziplinen³ geprägt. Dies umfasst auch die Planung der zugehörigen Produktionssysteme und Prozessketten, um die technische und wirtschaftliche Herstellbarkeit zu gewährleisten [HB11]. Produkt und Produktionssystem lassen sich nicht getrennt voneinander betrachten. Einerseits wird bereits das Produktkonzept durch Fertigungs- und Montagerestriktionen determiniert. Andererseits schränken Produkteigenschaften und die Produktgestalt die Auswahl möglicher Fertigungstechnologien ein [BEW+05], [Tas05] bzw. erfordern innovative Produktkonzepte die Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien und Produktionssystemen. Produkt und Produktionssystem müssen daher von Beginn an in einem engen Wechselspiel entwickelt werden. **Häufig lässt sich zu einem frühen Zeitpunkt nicht einmal die Frage der grundsätzlichen Machbarkeit einer Produktidee zweifelsfrei beantworten.**

³ Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Fachdisziplin und Domäne synonym verwendet.

Die **integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem** begegnet diesen Herausforderungen [GDK+11]. Strategische Planung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung werden nicht mehr als separate Tätigkeiten einzelner Fachdisziplinen betrachtet, sondern ein ganzheitlicher Verhaltens- und Denkansatz gefordert. Dieser bedingt eine systemorientierte Integration der Methoden und Arbeitstechniken aller beteiligten Fachdisziplinen [AR11]. Eine integrative Entwicklung verlangt die Koordination einer Vielzahl paralleler Aktivitäten. Unterschiedliche Fachbereiche und Organisationseinheiten müssen ihre Ergebnisse möglichst früh austauschen und ihre Vorgehensweisen abgleichen [ELP+05].

Die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem sollte dabei möglichst früh beginnen. Ein geeigneter Ansatzpunkt ist die Phase der Konzipierung [VDI2206], [Mic06], [Bra14]. Es entsteht die sog. Prinziplösung, die die Wirkungsweise und den Aufbau des Systems festgelegt [GFD+09] und die Basis für die Konzipierung des Produktionssystems darstellt [Nor12].

Aufgrund der starken Abhängigkeiten zwischen der Gestalt des Produkts und den unterschiedlichen Fertigungsrestriktionen auf der einen Seite und den engen Wechselwirkungen zwischen elektrischem/elektronischem und mechanischem Design im Hinblick auf die integrierte Funktionalität und Zuverlässigkeit auf der anderen Seite, ergeben sich jedoch Herausforderungen für die Entwicklung räumlicher Schaltungsträger, die eine reine methodisch getriebene Entwicklung sehr stark vom **Expertenwissen des Entwicklers**⁴ abhängig macht [Bee11], [RGF+11].

Ein Lösungsansatz für die geschilderte Problematik besteht in der Verwendung von Produktmustern und **Prototypen**⁵ während des Produktentstehungsprozesses. Prototypen sind grundsätzlich nützlich, um frühzeitig Fehler zu erkennen, Folgekosten zu vermeiden und den Entwicklungsprozess zu verkürzen [Kle00], [Fra13]. Sie ermöglichen eine bessere Kommunikation zwischen den Auftraggebern und den Auftragnehmern, begrenzen bereits im frühen Entwicklungsstadium einen Teil der Fehlermöglichkeiten und helfen so Änderungskosten zu vermindern und den Entwicklungsprozess zu verkürzen. Der Einsatz von Prototypen unterstützt unerfahrene Entwickler Produkte in neuartigen Fertigungstechnologien zu entwickeln.

Den Ausgangspunkt für die Herstellung räumlicher Schaltungsträger bildet der initiale Prozessschritt der Grundkörperfertigung. Dieser ist jedoch häufig vom zeit- und kostenintensiven Spritzguss abhängig. Alternative werkzeuglose Verfahren sind notwendig, um frühzeitig und kostengünstig die für die räumlichen Schaltungsträger notwendigen Träger

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.

⁵ Produktmuster und Prototypen werden in der Arbeit synonym verwendet. Eine genauere Abgrenzung der Begriffe (Lösungs-)Muster, Produktmuster und Prototyp folgt in Kapitel 2.

zu erzeugen. **Additive Fertigungstechnologien** (vgl. Generative Fertigungstechnologien) bieten dieses entsprechende Potential. Es existiert eine Vielzahl an Verfahren zur additiven Erzeugung von Bauteilen, die sich insbesondere durch das Medium unterscheiden, aus welchem der Grundkörper aufgebaut wird. Die Fülle an Verfahren und deren jeweilige Eigenschaften haben jedoch einen direkten Einfluss auf die elektronischen, mechanischen und thermischen Wechselwirkungen, die mit einem generativ erzeugten Prototyp erreicht werden können [FGG+11], [Geb13].

Additive Fertigungstechnologien sind in der **Prototypenfertigung** und in Branchen mit überwiegend kleinen Stückzahlen und einer starken Produktindividualisierung bereits etabliert oder stehen kurz davor, beispielsweise in der Luftfahrt- sowie der Medizintechnik [GWP14]. Hierbei handelt es sich jedoch um rein mechanische Funktionsbauteile. Neuere Technologien wie das Aerosol-Jet-Printing oder das ProtoPaint-LDS-Verfahren ermöglichen jedoch eine elektronische Funktionalisierung mechanischer Grundkörper [Fra13], [GPF11], [Joh10], [Rem12]. Die sich daraus ergebende Chance, funktionale Prototypen entwicklungsbegleitend zu erzeugen, ermöglicht den Entwicklern eine **neuartige Herangehensweise** in der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger.

Die Verfahren zur Herstellung der Prototypen erhöhen die Komplexität der Entwicklungsaufgabe. Es müssen nicht mehr nur die Verfahren zur Herstellung des Schaltungsträger berücksichtigt werden, sondern auch die spezifischen Verfahren zur Herstellung der Prototypen. Bei MID-Bauteilen ist seit jeher eine integrative Entwicklung von Produkt und Prozess durch die unterschiedlichen Eigenschaften und Restriktionen der Herstellverfahren und deren Einfluss auf die Produktgestalt unabdingbar [Pei07], [Kai09]. Gleiches gilt auch für die generativen Verfahren [BBW+13]. Dabei sind nicht nur Restriktionen aus der Herstellung des Grundkörpers zu berücksichtigen, sondern durch dessen elektronische Funktionalisierung.

Die Verwendung von Prototypen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID wird jedoch nur unzureichend unterstützt. Es fehlt eine systematische Vorgehensweise für den frühzeitigen zielgerichteten Einsatz von Prototypen im integrativen Entstehungsprozess von Produkt und Produktionssystem bei MIDs. Dies gilt in besonderem Maße für die frühe Phase der Konzipierung.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID*, die bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung Aussagen über die Machbarkeit zulässt und den Anwender bei der zielgerichteten prototypenbasierten Entwicklung unterstützt. Im Fokus steht dabei die Entwicklung des **originären** räumlichen **Schaltungsträgers**. Prototypenspezifischen Verfahren, wie der additiven Fertigung, kommt dabei eine tragende Rolle zu. Mithilfe der Systematik sollen Produktentwickler frühzeitig sowohl bei der Erstellung von grundsätz-

lichen Fertigungsprozessketten, als auch im speziellen von Produktmustern und **Prototypen**, vor dem Hintergrund neuartiger Fertigungstechnologien, unterstützt werden. Ergebnisse sind das umsetzbare Produkt- und Produktionssystemkonzept. Diese bestehen aus einer funktionalen Produktbeschreibung, realisierbaren und untereinander kompatiblen Lösungselementen sowie Fertigungsprozessketten für das Produkt und entsprechende Prototypen.

Die systematische Kombination von konkreten Lösungselementen, die der funktionalen Produktbeschreibung zugeordnet werden, stellen dabei das Bindeglied zwischen lösungsneutraler Produktkonzeption und lösungsbehafteter Prozesskette dar [PBF+07]. Im Rahmen der Produktentwicklung lässt sich so, im Anschluss an die Spezifikation der Produktfunktionen, ein wissensbasierter Entwurf mit umsetzbaren Lösungsvarianten realisieren. In der Produktionssystementwicklung ist dies der Ausgangspunkt für die Konzipierung der Fertigungsprozesskette. Weiterhin enthalten die Lösungsvarianten Informationen, die für frühzeitige Analysen, bspw. die Abschätzung der Herstellkosten [Sch16], herangezogen werden können.

Den Kern der Systematik⁶ bildet ein dreistufiges Vorgehensmodell, welches die durchzuführenden Tätigkeiten von der Produktkonzipierung bis zur Fertigungsprozesskettenplanung detailliert beschreibt.

1.3 Vorgehensweise

Die beschriebene Problematik wird in **Kapitel 2** im Detail beschrieben 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, mit einem Fokus auf die Technologie MID. Anschließend werden Entwicklungsmethoden für Produkte und Produktionssysteme analysiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Konzipierung mechatronischer Systeme sowie auf dem Einsatz von Lösungsmustern. Danach werden die Bedeutung von Prototypen im Produktentstehungsprozess und die relevanten Fertigungstechnologien erläutert. Kapitel 2 schließt mit einer Problemabgrenzung und einer Zusammenstellung der Anforderungen an die *Systematik zur prototypenbasierten Entwicklung räumlicher Schaltungsträger*.

In **Kapitel 3** wird anschließend der Stand der Technik erläutert. Zu Beginn werden Methoden zur Abschätzung der Machbarkeit beschrieben, gefolgt von Systematiken zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Anschließend folgen Methoden zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem sowie zum Einsatz von Prototypen im Produktentstehungsprozess. Aufbauend auf dem Stand der Technik wird der Handlungsbedarf abgeleitet.

⁶ Eine Definition des Begriffs Systematik erfolgt in Kapitel 2.

Kapitel 4 bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Zunächst werden die für die prototypenbasierte Entwicklung notwendigen Grundlagen und Werkzeuge vorgestellt. Die entwickelte *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* wird detailliert erläutert und das erarbeitete Software-Tool kurz vorgestellt.

In **Kapitel 5** wird die entwickelte Systematik anhand eines durchgängigen Beispiels beschrieben und das Vorgehen und die eingesetzten Methoden erklärt. Abschließend wird die Systematik gegen die in Kapitel 2 erarbeiteten Anforderungen bewertet.

Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in **Kapitel 6**. Der Anhang enthält ergänzende Informationen zur Anwendung der Systematik.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung räumlicher Schaltungsträger*. Hierfür werden in Kapitel 2.1 wesentliche Begriffe definiert. Anschließend erfolgt in Kapitel 2.2 eine Erläuterung der Begrifflichkeiten mechatronischer Systeme. Den Schwerpunkt von Kapitel 2.3 bildet die Beschreibung der Technologie MID. Kapitel 2.4 widmet sich der interdisziplinären Produktentstehung. In diesem Zusammenhang wird auf die Entwicklungsmethoden mechatronischer Systeme und deren Herausforderungen eingegangen. In Kapitel 2.5 werden schließlich die Begriffe und Technologien zur Herstellung von Prototypen erläutert. Kapitel 2.6 umfasst die Problemabgrenzung. Das Resultat der Analyse sind die Anforderungen an die Systematik und deren Beschreibung in Kapitel 2.7.

2.1 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden für diese Arbeit relevante Begriffe kurz erläutert und sofern notwendig im Kontext dieser Arbeit definiert. Zuerst werden die notwendigen Begriffe der Produkt Entstehung erläutert und definiert. Anschließend werden die Begriffe der Elektronik beschrieben. Hierbei ist insbesondere der Fokus der Arbeit auf MIDs verdeutlicht.

2.1.1 Begriffe der Produktentstehung

Systematik

Der DUDEN definiert die Systematik als eine „*planmäßige Darstellung [bzw.] einheitliche Gestaltung nach bestimmten Ordnungsprinzipien*“ [Dud10]. Systematiken im Bereich Maschinenbau sind z.B. die Systematik der Einteilung der Stähle [GS12] oder die Systematik der Maschinen- und Konstruktionselemente [BBJ+12]. In Verbindung mit der Produktentwicklung wurde der Begriff erstmals in den fünfziger Jahren von BISCHOF und HANSEN verwendet. Sie beschreiben die Konstruktionssystematik als „das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkenntnisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes“ [Han55], [Hub76].

Daraus leitet DUMITRESCU eine Definition für eine Entwicklungssystematik ab:

„Eine Entwicklungssystematik [ist] 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.“

punkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken/Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein“ [Dum10].

Der Unterschied zwischen einer Entwicklungssystematik und einer Entwicklungsmethodik lässt sich dabei an zwei Punkten festmachen. Erstens beinhaltet die Entwicklungsmethodik Erkenntnisse aus der Denk- und Arbeitspsychologie. Zweitens gibt sie organisatorische Leitlinien zur effektiven interdisziplinären Zusammenarbeit vor [PBF+07]. Bei der Entwicklungssystematik fehlen diese Aspekte [Dum10].

In der vorliegenden Arbeit wird die Definition von DUMITRESCU verwendet. Die zu entwickelnde Systematik umfasst somit ein **Vorgehensmodell** und **dedizierte Hilfsmittel** zur Berücksichtigung von Prototypenrestriktionen im Produktentstehungsprozess von MID. Bei den Hilfsmitteln handelt es sich in erster Linie um bestehende und anwendungsspezifisch-adaptierbare Hilfsmittel, die auf die jeweilige Problemstellung angepasst werden.

Modell, Muster und Prototyp

Der DUDEN definiert ein Modell als eine in „*Form, Beschaffenheit, Maßverhältnisse veranschaulichende Ausführung eines vorhandenen oder noch zu schaffenden Gegenstandes in bestimmtem (besonders verkleinerndem) Maßstab*“ [Dud16a-ol]. Ein Muster wird als „*Vorlage, Zeichnung, nach der etwas hergestellt, gemacht wird*“ definiert und ein Prototyp (von: griechisch *protos* „der Erste“ und *typos* „Urbild“, „Vorbild“) ist eine „... *zur Erprobung und Weiterentwicklung bestimmte erste Ausführung (von Fahrzeugen, Maschinen o. Ä.)*“ [Dud16b-ol] [Dud16c-ol].

Für die Beschreibung von Modellen, Mustern und Prototypen existieren vorherrschende Klassifikationen. Die mittlerweile zurückgezogene, aber noch gängige, Definition nach VDI 3404 unterscheidet zwischen einem Konzeptmodell, verschiedenen Arten von Prototypen und dem Produkt [VDI3404]. Die Modelldefinition des Verbands Deutscher Industrie Designer umfasst sechs Klassen, bei denen das Muster dem Serienprodukt am nächsten ist [Geb13]. KÜCK ET AL. haben eine spezielle MID-Klassifikation erstellt, die die Besonderheiten der Technologie berücksichtigt. In dieser Klassifikation wiederum ist der Prototyp dem späteren Serienprodukt am nächsten (vgl. Kapitel 3.4.3 und 3.4.4) [Fra13].

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Produktmuster und Prototyp synonym verwendet. Unter den Begriff Prototyp fallen alle Vorbereitungsstufen (vereinfacht, funktionsfähig oder seriennah) zur Erprobung und (Weiter-)Entwicklung von technischen Systemen. Durch die häufige Verwendung des Musterbegriffs im Sinne von Lösungsmustern im Produktentstehungsprozess wird zwecks besserer Lesbarkeit der Begriff Prototyp vorrangig verwendet (vgl. Musterdefinitionen nach ANACKER) [Ana15].

Systementwurf, Entwicklung und Konstruktion

DAENZER ET AL. verstehen unter Entwurf

„... die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen [DH02].“

Die Definition umfasst hierbei nicht nur die gestalterische, sondern auch die prinzipielle Festlegung möglicher Lösungsvarianten. Im klassischen Maschinenbau wird dabei klar zwischen der gestalterischen Festlegung – dem Entwerfen – und der prinzipiellen Festlegung – dem Konzipieren – unterschieden [PBF+07]. Im Rahmen dieser Arbeit wird, in Abgrenzung zu DUMITRESCU [Dum10], der Übergang von der prinzipiellen Festlegung (s. Prinziplösung) hin zu einer gestalterischen Festlegung als Systementwurf bezeichnet.

Die Begriffe **Entwicklung** und **Konstruktion** werden in der Praxis nicht einheitlich verwendet. Sie bezeichnen in der Literatur in der Regel die Gesamtheit aller Tätigkeiten zur Umsetzung von Marktanforderungen in ein technisches Produkt [GPW09].

Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht zwischen Entwicklung und Konstruktion unterschieden und der Begriff Entwicklung durchgängig verwendet. Im Kontext dieser Arbeit steht er in Anlehnung an EHRENSPIEL und MÜLLER für den Prozess zur Umsetzung von Anforderungen in ein technisches System. Das Ergebnis kann dabei sowohl als technische Dokumentation (Fertigungsunterlagen) als auch als gefertigtes System vorliegen [Ehr07], [Mül90].

Konzept, Konzeption und Prinziplösung

In der Konstruktionsmethodik wird das Resultat der Konzipierungsphase als Produktkonzept bzw. prinzipielle Lösung oder Prinziplösung bezeichnet [PBF+07]. Die Prinziplösung beschreibt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise eines technischen Systems (Produkts) [GFD+09]. Die Systembestandteile müssen hierfür noch nicht detailliert ausgestaltet sein. Um die Komplexität des Gesamtsystems zu beherrschen, erfolgt zu diesem Zeitpunkt eine erste Aufteilung in Module. Ziel ist eine entwicklungsorientierte Produktstruktur, die die in der Modularisierung übliche funktionsorientierte und gestaltungsorientierte Sicht vereint [Dum10].

Manchmal findet sich in der Literatur auch der Begriff „Konzeption“ für die Beschreibung der Prinziplösung (vgl. [Mic06]). Die Ursache liegt nach NORDSIEK darin, dass Konzept und Konzeption umgangssprachlich häufig synonym verwendet werden und auch im Duden kaum zwischen den Begriffen unterschieden wird. Die Konzeption ist detaillierter als das Konzept, welches als eine Vorstufe der Konzeption angesehen werden kann [Nor12].

Die vorliegende Arbeit verwendet diese vorgestellten Definitionen. Die Prinzipiellösung stellt einen ersten Entwurf eines technischen Systems dar, der im Entwicklungsverlauf zu detaillieren ist. Es handelt sich hierbei also um ein Konzept.

Produktentstehung

Die Produktentstehung 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]. Die Produktentstehung nach GAUSEMEIER ET AL. umfasst zusätzlich die Produktionssystementwicklung und endet mit dem Serienanlauf [GLR+00], [GW11]. EHRENSPIEL, ABELE und REINHART fassen auch die Fertigung als Teil der Produktentstehung auf. Sie endet mit der Auslieferung an den Kunden [Ehr09], [AR11].

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Produktentstehung der Prozess von der Geschäfts- bzw. Produktidee bis zum Serienanlauf des Produkts verstanden. Dieser umfasst die Phasen Strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung (Bild 2-7) [GPW09.].

2.1.2 Begriffe der Elektronik

Halbleiterbauelement, System-in-Package (SiP) und Integrated Circuit (IC)

Die Halbleiterindustrie hat in der Vergangenheit kontinuierlich durch immer neuere Prozesstechniken und feinere Strukturen eine höhere Anzahl an Transistoren auf gleicher Siliziumfläche platziert (vgl. Mooresche Gesetz). Die Größe des für elektronische Bauelemente verwendeten Stücks Silizium kann somit reduziert werden. Diese kleineren Bauelemente lassen sich dann, bei gleicher elektrischer Leistung, in kleinere Gehäuse verpacken [FM05], [GF06], [Mül11-ol].

Die Miniaturisierung und Integration stößt jedoch an technologische Grenzen, da sich nicht alles auf nur einem Siliziummaterial sinnvoll realisieren lässt. So werden zum Beispiel Abschlusswiderstände benötigt oder es lassen sich Hochfrequenz- und Digitalschaltungen besser auf unterschiedlichen Wafermaterialien und in unterschiedlichen Prozesstechniken herstellen. Abhilfe bietet dann ein System-in-Package (SiP), eine Integration von mehreren ungehäuteten Chips in einem IC⁷-Gehäuse [Mül11-ol], [SW15], [Kil76].

Bei einem SiP können auf dem Trägermaterial, ähnlich wie bei einer einseitig bestückten Leiterplatte, diskrete Bauteile und Chips aufgebracht werden. Um noch stärker zu miniaturisieren, werden Bauelemente und Chips übereinander gestapelt (stacked Die). Ein Die stellt allerdings hohe Anforderungen an die Bondprozesstechnik [Mül11-ol], [SW15].

⁷ KILBY prägte den Begriff IC für einen integrierten Schaltkreis (englisch integrated circuit, kurz IC) und beschreibt damit eine auf einem dünnen, meist einige Millimeter großen Plättchen, aus Halbleiter-Material aufgebrachte elektronische Schaltung [Kil76].

Da die Miniaturisierung und die räumliche Integration über Halbleiterbauteile oder SiPs aufgrund der hohen Initialkosten unattraktiv ist, werden klassische Aufbau- und Verbindungstechnologien der Leiterplatten genutzt, um sich die dritte Dimension zu erschließen bzw. das Volumen der Baugruppe zu verkleinern.

Räumliche Schaltungsträger

Unter einem räumlichen Schaltungsträger wird der Träger der (Halbleiter-)Bauelemente samt verbindendem Schaltkreis, dem Layout, verstanden. Räumliche Schaltungsträger lassen sich durch eine Vielzahl möglicher Technologien umsetzen. Die verwendeten Halbleiterbauelemente sind dabei nicht mehr Gegenstand des Integrationsprozesses. Der räumliche Schaltungsträger dient als Verbindungs- und Trägermedium für diese Bauteile. Zu den etablierten Verfahren zählen (Bild 2-1):

- **Stanzgittertechnik**
- **Flexible und starr-flexible Schaltungsträger**
- **Leiterplatten** (gestapelt und/oder mit eingebetteten Bauteilen)
- **Dreidimensionale Schaltungsträger** (Molded Interconnect Devices)





Stanzgitter- technik	Flexible Schaltungsträger	Leiterplatte	MID
			
<ul style="list-style-type: none">• Hohe Stromtragfähigkeit• Hohe mechanische Festigkeit• 3D-Design möglich	<ul style="list-style-type: none">• Feinste Strukturen und Microvias• Biegung/ Verdrehung möglich• Hoher Durchsatz bei planarer Verarbeitung	<ul style="list-style-type: none">• Feinste Strukturen und Microvias• Standardisierte Prozesse• Mehrlagige Systeme	<ul style="list-style-type: none">• Funktionsintegration• Räumliche Gestaltungsfreiheit• Kurze Prozesskette

Bild 2-1: Abgrenzung der MID-Technologie zu konventionellen Technologien [Fra13]

Molded Interconnect Devices (MID)

MIDs sind räumliche Schaltungsträger mit integrierten mechanischen und elektronischen Funktionen. Zusätzlich lassen sich optische, thermische und fluidische Funktionalitäten

integrieren. Der Schaltungsträger besteht aus einem dreidimensionalen Spritzgussteil das (fast) beliebig gestaltet werden kann. Mechanische Funktionen wie Schnappverbindungen oder Lüftungsschlitze können direkt in die Form integriert werden. Als Werkstoff wird in der Regel ein thermoplastischer Kunststoff verwendet. Für die Herstellung steht eine Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsverfahren zur Verfügung. Dabei werden unterschiedliche Prozessschritte miteinander kombiniert um den Schaltungsträger zu gestalten, zu strukturieren und zu metallisieren und so Leiterbahnen und Kontakte zu erzeugen. Dies erlaubt das direkte Aufbringen von elektronischen Bauelementen, wie z.B. Sensoren. Darüber hinaus können die Metallisierungen für elektrische Funktionen, wie Abschirmungen, Antennenstrukturen oder Wärmebrücken genutzt werden [Fra13], [Pei08], [Fel09].

FRANKE verwendet neben dem historisch gewachsenen *Molded Interconnect Devices* auch den Begriff *Mechatronic Integrated Devices* um neuere Produktionstechnologien abseits der Kunststofftechnik mit einzubeziehen [Fra13]. Diese Arbeit folgt dieser neuen erweiterten Definition der räumlich-integrierten mechatronischen Systeme. Die Begriffe räumlich integrierte Schaltungsträger und MID werden im Folgenden synonym verwendet, der Fokus liegt aber auf den klassischen MID-typischen Fertigungsverfahren.

2.2 Mechatronische Systeme

Der Begriff Mechatronik wurde in den 70er Jahren geprägt [Ise08]. Das Kunstwort setzt sich zusammen aus den Begriffen **Mechanik** (Maschinenbau) und **Elektronik** (Elektrotechnik). Heutige Erzeugnisse beruhen in der Regel auf dem Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und der Softwaretechnik. In der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ wird die Definition von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA zu Grunde gelegt [HTF96]:

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

Im Vergleich zu konventionellen Lösungen ist durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Disziplinen eine erhebliche Funktionserweiterung technischer Systeme realisierbar. Diese reicht von der reinen Funktions- und Verhaltensverbesserung technischer Systeme über die Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten hin zu neuen Funktionen und Anwendungen wie intelligenten bzw. autonomen Eigenschaften der Systeme [Ana15], [ADG+09], [Kai09].

2.2.1 Grundstruktur mechatronischer Systeme

Die grundsätzliche Struktur eines mechatronischen Systems besteht aus einem Grundsystem, einer Sensorik, einer Aktorik und einer Informationsverarbeitung. Diese vier Bestandteile werden in einem mechatronischen Regelkreis dargestellt (Bild 2-2)

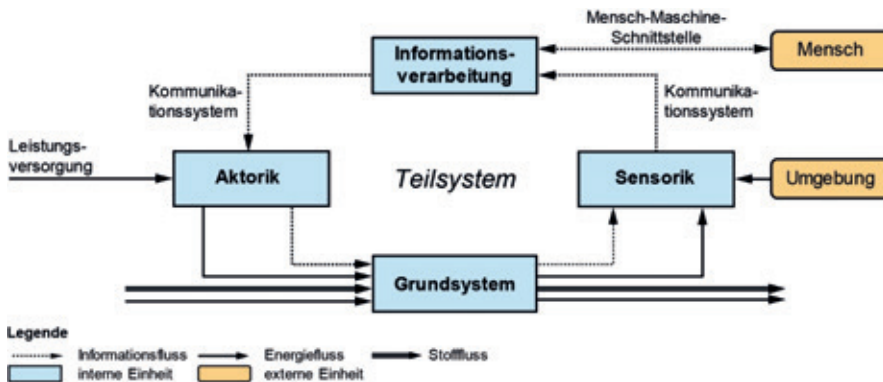


Bild 2-2: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206]

Das **Grundsystem** besteht aus einer mechanischen, elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Struktur bzw. einer Kombination aus diesen. Die Sensorik bestimmt ausgewählte Zustandsgrößen (Messwerte) des Grundsystems sowie der Umgebung. Die einzelnen Sensoren können dabei physisch vorhandene Messwertaufnehmer sein oder durch Software realisiert sein. Die Sensorik übermittelt die Messwerte an die Informationsverarbeitung. Sie besteht heute im Allgemeinen aus einem Mikroprozessor mit einer Software. Die Informationsverarbeitung ermittelt aus den eingegangenen Messwerten die Stellwerte für die Aktorik, welche anschließend das Grundsystem in geeigneter Weise beeinflussen [VDI2206]. Die einzelnen Elemente sind über Flüsse miteinander verbunden. Sie werden nach PAHL/BEITZ in drei Flussarten unterschieden [PBF+07]:

- **Stoffflüsse:** Hierunter fallen der Austausch von festen Körpern, Flüssigkeiten oder Gasen (z. B. Luft).
- **Energieflüsse:** Sie beschreiben die Übertragung von mechanischer, thermischer und elektrischer Energie sowie entsprechender Größen wie Kraft oder Strom.
- **Informationsflüsse:** Sie kennzeichnen den Austausch von Messgrößen, Steuerimpulsen oder Daten.

Die Grundstruktur bildet den elementaren Baustein eines mechatronischen Systems ab. In der Regel bestehen mechatronische Systeme aus mehreren mechatronischen Modulen, d. h. Elementen, die zu einer Gruppe zusammengefasst wurden und eine gemeinsame Funktion erfüllen. So kann z. B. die Aktorik eines mechatronischen Systems ein eigenes

(Teil-)System sein, das ebenfalls aus der dargestellten Grundstruktur besteht. Das Gesamtsystem ist somit hierarchisch strukturiert [VDI2206].

2.2.2 Klassen mechatronischer Systeme

GAUSEMEIER ET AL. unterscheiden drei Klassen mechatronischer Systeme (Bild 2-3). Die erste Klasse beruht auf der **räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik**. Ziel ist es, eine hohe Dichte von mechanischen und elektronischen Funktionen innerhalb des verfügbaren Bauraums zu erreichen. Solche elektromechanischen Teile, die auch als integrierte mechatronische Systeme bezeichnet werden, bilden häufig die Grundlage für die zweite Klasse von mechatronischen Systemen (z.B. integrierte Sensoren) [Fel09], [GF06], [JFD+14].

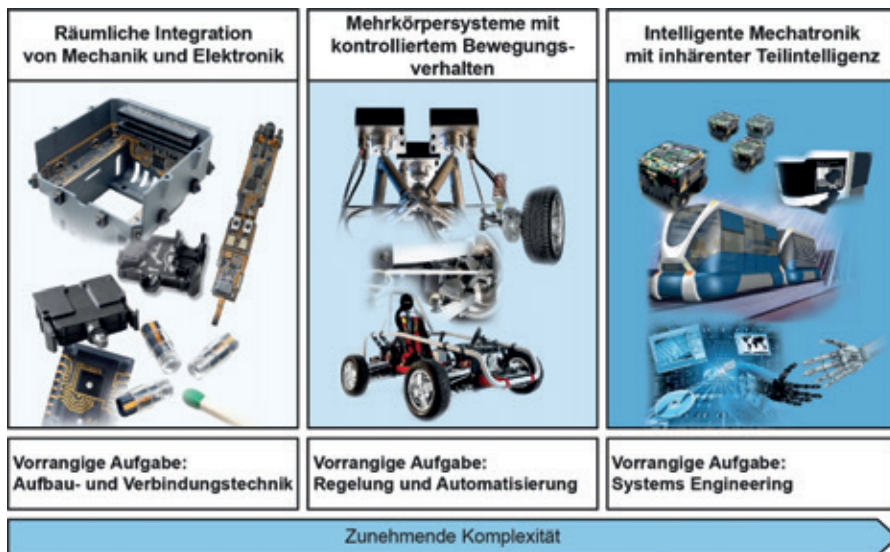


Bild 2-3: Klassen mechatronischer Systeme nach GASUEMEIER ET AL. [GTS14]

Die zweite Klasse adressiert das **kontrollierte Bewegungsverhalten von Mehrkörpersystemen**. Der Fokus liegt in der Regelungstechnik, um das Systemverhalten zu verbessern. Mit Hilfe von Sensoren werden Informationen über die Umgebung und das System selbst gesammelt. Aus diesen Informationen werden „optimale“ Reaktionen generiert und durch Aktoren ausgelöst [GF06], [GAC+13].

Die dritte Klasse mechatronischer Systeme verortet **vernetzte technische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz**. Die Informationstechnik und auch nichttechnische Disziplinen, wie die Kognitionswissenschaft, die Neurobiologie oder die Linguistik, bringen eine Vielfalt an Methoden, Techniken und Verfahren hervor, mit denen sensorische, aktori-sche und kognitive Funktionen in technische Systeme integriert werden, die bislang nur

von biologischen Systemen bekannt sind. Derartige Systeme werden als intelligente technische Systeme bezeichnet; sie sind:

- **Adaptiv:** Sie interagieren mit dem Umfeld und passen sich diesem autonom an. So können sie sich zur Laufzeit, in einem vom Entwickler vorausgedachten eingeschränkten Rahmen, weiterentwickeln.
- **Robust:** Sie bewältigen auch unerwartete und vom Entwickler nicht berücksichtigte Situationen in einem dynamischen Umfeld. Unsicherheiten oder fehlende Informationen können so bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen und so die Funktionalität des Systems gewährleistet werden.
- **Vorausschauend:** Sie antizipieren auf Basis von Erfahrungswissen die künftigen Wirkungen von Einflüssen und mögliche Zustände. So können Störungen und Gefahren frühzeitig erkannt und passende Strategien zu ihrer Bewältigung ausgewählt werden.
- **Benutzungsfreundlich:** Sie berücksichtigen das spezifische Benutzerverhalten. So werden komplexe technische Vorgänge in eine benutzergerechte Interaktion überführt.

Diese Systeme sind in der Lage, sich selbstständig an wechselnde Betriebs- und Umgebungsbedingungen anzupassen und bestehen daher aus einer Vielzahl von **untereinander vernetzten, komplexen Teilsystemen**, die durch ihr Zusammenspiel die geforderte Gesamtfunktionalität erfüllen [Bro10], [DJG12]. Ziel der Systementwicklung ist es dabei, diese Systeme als Ganzes zu betrachten, um die Komplexität des Produktes und Entwicklungsgeschehens zu beherrschen. Die räumlich integrierten Komponenten der ersten Klasse bilden dabei häufig die Grundlage für die geregelten Mehrkörpersysteme aber auch insbesondere für die vernetzten intelligenten Systeme der dritten Klasse. Die zu entwickelnde Systematik fokussiert daher die Entwicklung dieser räumlich integrierten Systeme der ersten Klasse, denen auch die Technologie MID zugeordnet werden kann.

2.2.3 Differential- und Integralbauweise

Je nach Anspruch und Zielsetzung an eine mechatronische Baugruppe kann die Bauweise unterschiedlich erfolgen. Stehen Kostensenkung und Flexibilität im Vordergrund werden mehrere, meist standardisierte Einzelteile verwendet und zu Baugruppen montiert. Liegt der Schwerpunkt hingegen auf Miniaturisierung, werden anwendungsspezifische Bauteile gefertigt. Aus diesem Grund wird in der Konstruktionslehre zwischen Differential- und Integralbauweise unterschieden [PBF+13].

Unter **Differentialbauweise** wird die Aufteilung eines Bauteils in mehrere, einfacher zu fertigende Einzelteile verstanden. Es werden meist standardisierte Bauteile verwendet, da sie geringere Fixkosten haben, sich im Schadensfall leicht ersetzen lassen und eine Qua-

litätsprüfung mit geringem Aufwand realisierbar ist. Besonders für kostspielige und langlebige Produkte, bei denen ein Austausch von Einzelteilen, Baugruppen oder Modulen sinnvoll ist, wird die Differentialbauweise verwendet [PBF+13], [Ehr09].

Bei der **Integralbauweise** werden verschiedene Bauteile zu einem einzigen Bauteil mit gleichem Funktionsumfang zusammengefasst, wodurch sämtliche Montageoperationen entfallen. Hierbei reduziert sich die benötigte Zahl der Teile und Fügestellen, was die Produktqualität erhöht. In vielen Fällen wird überdies eine kompaktere Bauweise ermöglicht, die das Bauteil in der Regel aber auch komplexer macht. Ein großer Nachteil sind die höheren Fixkosten durch die komplexen Einzelteile und Werkzeuge. Die Integralbauweise wird daher meistens in der Serienfertigung mit hohen Stückzahlen eingesetzt [PBF+13], [Ehr09].

In Abgrenzung zu klassischen mechatronischen Bauteilen, die in der Regel in der Differentialbauweise hergestellt werden, ist das wesentliche Merkmal räumlicher Schaltungsträger im Kontext dieser Arbeit, eine integrale Bauweise.

2.3 Technologie MID

Mit der Technologie MID lassen sich räumliche Schaltungsträger realisieren, die eine Integration mechanischer und elektronischer Elemente in einem Bauteil zulassen. Dabei wird die Oberfläche des eingesetzten thermoplastischen Kunststoffes partiell metallisiert, so dass sich Leiterbahnstrukturen erzeugen lassen. Durch die Form des Kunststoffbauteils sind zahlreiche mechanische Funktionen realisierbar. Es können beispielsweise Montage- oder Verbindungsmöglichkeiten erzeugt werden [Fra13]. Die Leiterbahnstrukturen auf dem Bauteil erlauben das direkte Aufbringen elektronischer Bauelemente auf dieser mechanischen Struktur. Des Weiteren lassen sich elektronische Funktionen wie Antennenstrukturen, Abschirmungen oder Wärmebrücken realisieren [Pei08].

Prinzipiell sind mit der Technologie MID beliebige Schaltungsträgerformen realisierbar. Die Bauteilgestaltung ist allerdings durch die Fertigungsverfahren limitiert. Durch eine geometrische Klassifikation wird ein einheitlicher Sprachgebrauch geschaffen (Bild 2-4).

Flachbaugruppen, wie konventionelle Leiterplatten, werden als 2D klassifiziert und haben eine rein planare Prozessfläche (Klasse 0). 2½D Anordnungen haben auf einer räumlichen Struktur eine planare Prozessfläche (Klasse 1A & 1B) oder weisen diverse planparallele Prozessflächen auf (Klasse 1C). Bei der Dimension nx2D gibt es mehrere Prozessflächen, die in einem Winkel zueinander angeordnet sind (Klasse 2). Anordnungen in 3D erlauben das Aufbringen von elektrischen Strukturen auf beliebigen Regelflächen (Klasse 3A) oder Freiformflächen (Klasse 3B) [Fra13].



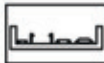











2D	2 1/2 D			n x 2 D	3D	
0	1A	1B	1C	2	3A	3B
Planare Prozessfläche	Planare Prozessfläche 3D-Elemente auf der gegenüberliegenden Seite	Planare Prozessfläche 3D-Elemente auf der Prozessseite	Mehrere planparallele Prozessflächen	Mehrere planparallele Prozessflächen im Winkel	Regelflächen (z.B. Zylinderflächen)	Freiformflächen
						
						

Bild 2-4: Geometrische Klassifikation von MID Bauteilen [Fra13]

Prägend für die Technologie MID ist die hohe Varianz an Herstellungsverfahren, die für die jeweiligen räumlichen Klassen unterschiedliche Vor- und Nachteile bieten [Kai09].

2.3.1 MID-Herstellverfahren

Zur Herstellung von MID-Bauteilen gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Verfahren. Zu den führenden Verfahren zählen das Zweikomponentenspritzgießen, das additive und subtraktive Laserstrukturieren, das Heißprägen und das Folienhinterspritzen. Zusätzlich sind noch Druckverfahren wie das Aerosol-Jet-Verfahren zu erwähnen. Des Weiteren existieren Verfahren, die jedoch nicht oder nur eingeschränkt in Serie verwendet werden. Dazu zählen unter anderem FLAMECON®, Maskenbelichtungsverfahren sowie die Primer- und Plasmatechnologie [FGG11], [Fra13], [For04], [KBR+14].

Trotz der unterschiedlichen Herstellverfahren lassen sich alle Verfahren durch gemeinsame Prozessschritte beschreiben und in einen Referenzprozess einordnen (Bild 2-5). Der Prozess ist systematisch aufgebaut und lässt sich in vier Prozessstufen einteilen: *Grundkörper herstellen*, *Strukturieren*, *Metallisieren* und *Aufbau- und Verbindungstechnik*. Die ersten drei Stufen beschreiben dabei das MID-Herstellverfahren des unbestückten Schaltungsträgers. Der letzte Schritt beschreibt Aufbau- und Verbindungstechniken, um elektronische Bauelemente auf dem Schaltungsträger aufzubringen und zu kontaktieren. Jeder Prozessstufe sind entsprechende Technologien zugeordnet [Fra13], [Pei08], [GDG10].

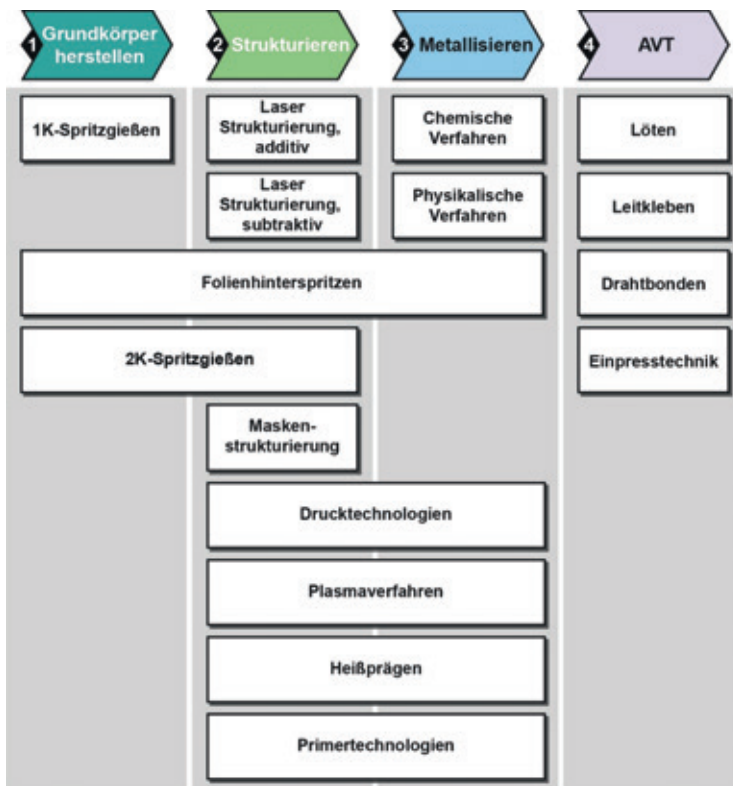


Bild 2-5: MID-Referenzprozess [Fra13]

Im Folgenden werden die gängigsten MID-Herstellverfahren vorgestellt, auch um deutlich zu machen, wie sehr sich diese voneinander unterscheiden.

Zweikomponentenspritzguss

Beim Zweikomponentenspritzguss wird der Schaltungsträger in zwei aufeinanderfolgenden Spritzgießzyklen hergestellt. Es werden jeweils unterschiedliche Kunststoffe verwendet, wobei ein Kunststoff metallisierbar ist. Die Reihenfolge, in der sich die Kunststoffe kombinieren lassen, ist frei wählbar. Jedoch ist eine genaue Festlegung des Leiterbahnlayouts bereits vor dem Spritzguss notwendig. Im Anschluss erfolgt die nasschemische und stromlose Metallisierung. Die Beschichtung besteht i.d.R. aus dem Schichtsystem Kupfer, Nickel und einer dünnen Goldschicht. Um die Metallisierung effizienter zu gestalten, wird die Kunststoffoberfläche vorher aktiviert. Dazu werden Edelmetallkeime, i.d.R. Palladium, auf eine zuvor aufgeraute Oberfläche aufgetragen. Die Keime dienen dabei als Katalysator für den anschließenden Prozessschritt.

Den größten Vorteil gegenüber anderen MID-Herstellverfahren bietet der 2K-Spritzguss in der hohen räumlichen Gestaltungsfreiheit. Des Weiteren lässt sich ein hoher Miniaturisierungsgrad realisieren, der nur durch die Spritzgießbarkeit begrenzt wird. Weiterhin sind hohe Ströme, Durchkontaktierungen und Kreuzungen der Leiterbahnen problemlos möglich. Die Technologie eignet sich insbesondere für Produkte mit hoher Stückzahl bei gleichbleibender Genauigkeit und niedrigen Stückkosten. Durch die frühzeitige Festlegung des Leiterbahnlayouts und die Verwendung von Spritzgusswerkzeugen, verursachen bereits kleine Änderungen im Layout oder der Anordnung der elektronischen Komponenten hohe Kosten. Diese haben meistens eine Neugestaltung des Spritzgusswerkzeugs zur Folge. Aus diesen Gründen ist das Verfahren nicht für die Entwicklung bzw. das Prototyping geeignet und bietet sich eher für ausgereifte Serienprodukte an [For04], [Fra13], [KBR+14].

Laser-Direkt-Strukturierung

Bei der Laser-Direkt-Strukturierung (LDS) bildet ein im 1K-Spritzguss hergestellter Schaltungsträger die Basis. Die Strukturierung erfolgt durch einen steuerbaren Laser, der das gewünschte Leiterbahnlayout abfährt. Der thermoplastische Kunststoff ist dabei mit einem anorganischen Kupferoxid, einem sog. Additiv, dotiert. Früher wurden hierfür auch Palladiumkomplexe eingesetzt. Während der Strukturierung durch den Laser werden die Metallkeime freigesetzt und damit die Oberfläche katalytisch aktiviert. Zusätzlich raut der Laser die Oberfläche an, so dass bei der anschließenden stromlosen, chemischen Metallisierung die Haftung durch die Rauigkeit signifikant verbessert wird. Der Prozess endet mit einer Oberflächenveredelung. Dieses Verfahren wurde vor allem durch die Firma LPKF geprägt [Fra13], [KBR+14], [NW98], [NW03].

Der größte Vorteil der Technologie ist die hohe Flexibilität bei der Änderung des Schaltungslayouts. Die Strukturierung lässt sich schnell und unkompliziert in den vorliegenden CAD-Daten ändern, die direkt an den Laser übertragen werden. Zusätzliche Werkzeuge sind nicht notwendig. Außerdem lassen sich durch den Einsatz des Lasers feinste Strukturen (fine pitch) realisieren, die den Ansprüchen an Leiterbahnbreiten und -abständen genügen. Als potentieller Nachteil ist zu beachten, dass durch die Anzahl der verfügbaren Freiheitsgrade der Lasereinrichtung die 3D-Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen eingeschränkt werden kann. Des Weiteren müssen die Zugänglichkeit sowie ein optimaler Einfallswinkel für den Laser gewährleistet werden.

Die flexiblen Änderungen von Leiterbahnen und die geringe Anzahl an Prozessschritten bieten Potential für die Entwicklung von seriennahen Prototypen. Darüber hinaus wird die Technologie erfolgreich bei Serienprodukten in der Automobil- und Medizintechnikbranche verwendet [Fra13], [FGG+11], [For04].

Laser-Subtraktiv-Strukturierung

Die Basis der Laser-Subtraktiv-Strukturierung (LSS) bildet wie beim LDS ein im 1K-Spritzguss hergestellter Schaltungsträger. Auf dem Bauteil wird nach einer kurzen Oberflächenaktivierung außenstromlos Kupfer oder Nickel abgeschieden. Diese Schicht kann bis zu einer gewünschten Schichtdicke galvanisch verstärkt werden. Die eigentliche Strukturierung beginnt damit ein Ätzresist auf der Oberfläche zu applizieren. Im Anschluss wird mit einem Laser der Ätzresist strukturiert und die freigelegte Kupferschicht weggeätzt. Die nicht strukturierten Bereiche stellen nachher das Leiterbahnlayout dar. Der Prozess wird mit einem Oberflächenfinish abgeschlossen [For04], [Fra13].

Der große Unterschied zum additiven Verfahren sind deutlich mehr benötigte Prozessschritte. Dafür lassen sich größere metallisierte Flächen gestalten. Die wesentlichen Probleme der Technologie liegen in der empfindlichen Behandlung des Ätzresist. Schon kleine Verunreinigungen können die Aktivierung des Resist behindern und damit die Isolation gefährden. Auch kann es zum Abbrechen des Resists in Kantenbereichen kommen, was zu einer schwankenden Metallisierungsschicht führt [For04], [Fra13]. Die Stärken der Technologie liegen wie beim additiven Verfahren bei der flexiblen Änderung des Leiterbahnlayouts, weshalb sich diese Technologie für Prototypen und Anwendungen mit vielen Varianten anbietet.

Die größte Herausforderung der beiden Technologien liegt in der Herstellung des Grundkörpers. Hier müssen für das Prototyping verschiedene generative Fertigungsverfahren eingesetzt werden. Diese werden in Kapitel 2.5.2 näher beschrieben.

Heißprägen

Das Heißprägen ist eines der wenigen Herstellverfahren, das keine chemischen Nassprozesse erfordert. Die Grundlage bildet ebenfalls ein einfach spritzgegossenes Kunststoffteil. Auf der Oberfläche wird eine Kupferfolie aufgebracht, die anschließend mit einem strukturierten Prägestempel unter Einwirkung von Druck und Temperatur aufgepresst wird. Der Kunststoff wird dabei lokal aufgeschmolzen und es bildet sich eine formschlüssige Verbindung zwischen Kupferfolie und Kunststoffteil. Abschließend wird die Restfolie vom Bauteil abgezogen. Alternativ kann anstatt des Prägestempels ein Prägerad benutzt werden [Fra13], [For04].

Neben der Vermeidung von nasschemischen Prozessen bietet das Verfahren Vorteile in der vergleichsweise kurzen Prozesskette und dem damit verbundenen reduzierten Kosten- und Zeitaufwand. Des Weiteren sind zahlreiche Thermoplaste einsetzbar und durch die geringfügige Belastung eignet sich die Technologie zudem für dekorative Oberflächen. Nachteilig ist die begrenzte 3D-Gestaltungsfreiheit durch das Prägewerkzeug. Zusätzlich muss durch den einwirkenden Druck und die Temperatur eine stabile Bauform gewährleistet sein. Der Prägestempel ist einfach herzustellen, jedoch sind Änderungen des Layouts nicht so flexibel umzusetzen wie bspw. beim LDS/LSS Verfahren [Fra13], [For04].

Für die Herstellung von Prototypen ist die Technologie nur begrenzt einsetzbar. Für die Fertigung der benötigten Prägestempel werden keine Rapid Prototyping Verfahren eingesetzt. Die Prägestempel werden entweder aus Spritzgussteilen oder nicht gehärteten Stahlwerkzeugen mittels Rapid Tooling hergestellt. Zurzeit existieren nur wenige Produkte, die in Serie mit dem Heißprägen Verfahren produziert werden [Fra13], [FGG+11].

Folienhinterspritzen

Das Folienhinterspritzen verwendet eine separat hergestellte, ein- oder mehrlagige, flexible Leiterbildfolie, die in ein Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit geeigneten Kunststoffen hinterspritzt wird. Die Leiterbahnfolie wird vor dem Hinterspritzen strukturiert und metallisiert. Bei dreidimensionalen Strukturen muss die Folie vor dem Einlegen der Kontur angepasst werden. Dies geschieht in der Regel durch Warmumformung. Weisen Folie und Bauteil gleiche Werkstoffeigenschaften auf, kann die Verbindung durch leichtes Aufschmelzen und Verschweißen realisiert werden. Ansonsten werden zusätzlich spezielle Haftvermittler aufgetragen. Abschließend erfolgt eine Oberflächenveredelung.

Der größte Vorteil der Technologie liegt in der Verwendung von bereits strukturierten und metallisierten Leiterbahnfolien, die mit den herkömmlichen und ausgereiften Verfahren der Leiterplattentechnik hergestellt werden können. Ein weiterer Vorteil sind die wenigen Prozessschritte. Nachteilig ist die eingeschränkte 3D-Gestaltungsfreiheit, da es bei komplexen Strukturen zur Faltenbildung der Folie kommen kann. Außerdem stellt das Folienhinterspritzen hohe technologische Anforderungen an das Spritzgießen und den Werkzeugbau [For04], [Fra13].

Drucktechnologien

Das von der Firma Optomec patentierte Aerosol-Jet-Verfahren[®] basiert auf einem kontakt und maskenlosen, vektorbasierten Druckverfahren. Das sowohl aus niederviskosen 0,7 (cP⁸) als auch aus normalviskosen (2.500 cP) Schichtwerkstoffen generierte Aerosol wird dabei entweder unter Ultraschalleinwirkung oder pneumatischer Sogwirkung zerstäubt. Die Vielfalt der Druckmedien reicht von leitfähigen Tinten über halbleitende bis hin zu dielektrischen oder isolierenden Materialien. Die Größe der Partikel der jeweiligen Festwerkstoffe liegt dabei im Nanobereich (ca. 50 nm). In Verbindung mit einer optimierten Fokussierung können so feinste Leiterbahnstrukturen generiert werden. Die Schichten werden anschließend mit thermischen Sinterprozessen im Ofen oder mit selektiven Sintermethoden wie Licht- oder Laserlötssystemen ausgehärtet [GPF11], [Got13].

Ein großer Vorteil des Verfahrens ist die Vielzahl der möglichen Tintenzusammensetzungen hinsichtlich Konzentration, Form, Größe Werkstoff der Partikel und Viskosität der Tinte. In Kombination mit einer optimierten chemischen Kompatibilität der Tinte mit dem Substrat lassen sich so beliebige Grundkörper strukturieren [Fra13].

⁸ Centipoise (cP) ist eine in der dynamischen Viskosität häufig verwendete Einheit, da 1 cP ziemlich genau der Viskosität von Wasser bei 20 °C entspricht. 1 cP sind in SI-Einheiten 0,001 Pa s.

Beim Inkjet-Druck haben sich zwei unterschiedliche Verfahren etabliert. Einerseits werden die Leitstrukturen im kontinuierlichen und andererseits im Drop-on-Demand (DOD)-Verfahren erzeugt. Beim kontinuierlichen Betriebsmodus werden zusammenhängende Strukturen durch einen gleichmäßig ausgebrachten Tintenstrom erzeugt. Beim DOD hingegen werden sequentiell einzelne Tintentropfen gedruckt. Hierbei ist die Druckgeschwindigkeit beschränkt, die Genauigkeit jedoch wesentlich höher als beim kontinuierlichen Verfahren. Anders als beim Aerosol-Jet-Verfahren[®] spielt die Viskosität und die Oberflächenspannung der Drucktinten beim Inkjet-Verfahren eine wesentlich höhere Rolle. Die Viskosität sollte nicht höher als 20 cP sein, um ein einfaches und optimales Auslösen aus der Düse zu gewährleisten. Ähnlich dem Aerosol-Jet[®]-Druck können beim Inkjet-Druck unterschiedliche thermische Aushärteprozesse angewendet werden. Hierbei ist die Hauptaufgabe, das isolierende Coating von den Feststoffpartikeln zu entfernen und gleichzeitig durch das Aufschmelzen eine zusammenhängende Schicht zu erzeugen.

Durch die Strukturen der Tinten und den anschließenden Sinterprozessen kann es jedoch zu unregelmäßig gefüllten Leiterstrukturen kommen. Beim Verdampfen entstehen kleinste Hohlräume, die den elektrischen Widerstand der Leiterstrukturen erhöhen. Gedruckte Schaltungen werden daher fast ausschließlich für Informationsverbindungen (Sensoren, Antennen) eingesetzt [JS11], [Per12].

Plasmadust[®]

Das Plasmadust[®]-Verfahren ermöglicht mithilfe eines kaltaktiven Plasmas⁹ (10-150 °C) das Aufbringen einsatzbereiter Strukturen auf eine große Vielfalt von Bauteiloberflächen in einem einzigen Verfahrensschritt. Das von der Reinhausen Plasma GmbH patentierte Verfahren ist ein generatives Direktbeschichtungsverfahren mit dessen Hilfe sich kontakt- und lösemittelfrei Strukturen aus pulverartigen Materialien wie beispielsweise Metallen oder Polymeren auf verschiedenen Substraten (z. B. Papier und Textilien) aufbringen lassen. Leiterstrukturen werden mit hoher Geschwindigkeit in-line generiert. Die Schichten werden mit Hilfe eines Pulver-Gas-Gemisches abgeschieden. Grundsätzlich muss hierfür ein Trägergasstrom mit einem in Pulverform vorliegenden Werkstoff versetzt werden. Die durch den Energieeintrag aufgeschmolzenen Kupferpartikel werden durch den Gasdruck auf das Substratmaterial geschleudert. Dieses wird gleichzeitig durch das Plasma angeraut und ermöglicht somit eine formschlüssige Verbindung, ohne zu hohe thermische Belastungen im Substrat zu induzieren. Durch den relativ großen Overspray der Technologie lassen sich leider kaum exakte Strukturen erzeugen. Unter Overspray ist der Anteil des verspritzten Materials zu verstehen, der sich auf dem Bauteil am Rande der gedruckten Strukturen ungewollt tropfenförmig niederschlägt. Darüber hinaus ist die Qualität der Leiterstrukturen, ähnlich wie bei den Drucktechnologien, als nicht so hoch

⁹ Kennzeichnend für das Plasmadust[®]-Verfahren ist ein sogenanntes Niedrigtemperatur-Nichtgleichgewichtsplasma. Anders als bei Gleichgewichtsplasmen ist die Temperatur bzw. Energie der darin befindlichen Elektronen um ein Vielfaches höher als die der neutralen Gasteilchen und Ionen. Die Energieabgabe erfolgt maßgeblich an größere schwerere Atome (in diesem Fall Kupfer) in Form von Stößen, so dass lediglich eine schwache Erhitzung der leichteren Gasmoleküle erfolgt [Bei09].

anzusehen, weswegen die Technologie nur bei ganz spezifischen Anwendungsfällen eingesetzt wird [Sch15].

2.3.2 Potentiale und Herausforderungen der Technologie MID

Die steigenden Anforderungen an mechatronische Produkte hinsichtlich Funktionalität, Integrationsdichte, Zuverlässigkeit und Kosten erfordern geeignete Lösungskonzepte. Die Technologie MID ermöglicht durch die Zusammenführung mechanischer und elektronischer Elemente in einem Bauteil hochintegrative Erzeugnisse. Daraus resultieren vielfältige Potentiale zur Gestaltung innovativer Produktkonzepte, mit denen neue Märkte erschlossen oder bestehende ausgebaut werden können. Weiterhin werden durch die hohe geometrische Gestaltungsfreiheit, in Kombination mit der Möglichkeit der selektiven Metallisierung, neue Produkt- und Prozessinnovationen ermöglicht [Fra13], [GF06], [FG08].

Durch die spezifischen Charakteristika der Technologie sind **innovative Produkte** mit neuartigen integrierten Funktionen möglich. Mithilfe der Zusammenführung verschiedener Komponenten zu einem Funktionsträger erlauben MID-Produkte eine sehr kompakte Bauweise. Die dreidimensionale Anordnung ermöglicht die Positionierung der Bauelemente in definierten Winkeln, das Stapeln von elektronischen Bauteilen und die präzise Positionierung von Bauelementen. Somit lässt sich eine ideale Ausrichtung der elektronischen Komponenten, wie bei optischen Sensoren notwendig, realisieren. Die Flexibilität im MID-Layout erlaubt die integrierte Darstellung von Kontaktflächen zur Realisierung von Schaltern und Sensoren (bspw. durch Kapazitäten) und Antennen zum Senden und Empfangen elektromagnetischer Wellen. Insbesondere bei Anwendungsgebieten mit sehr begrenztem Raumangebot (z.B. Telekommunikationstechnik) ist dies ein entscheidender Vorteil. Vollflächige Metallisierungen hingegen erlauben partielle Abschirmungen. Außerdem lassen sich mit einer geeigneten Geometrie Befestigungselemente, Verstärkungen und Kühlrippen direkt im Gehäuse realisieren und i.d.R. hat die Miniaturisierung eine Reduzierung des Bauteilgewichts zur Folge [FG08], [Fra13].

Neben diesen Vorzügen bietet die Technologie MID Möglichkeiten zur Einbindung neuer Produktfunktionen und erlaubt Verbesserungen hinsichtlich der Produkteigenschaften im Vergleich zu konventionellen Leiterplatten. Es lassen sich beispielsweise genauere elektrische Signale durch kürzere Leiterbahnen oder die Reduktion von thermischen Spannungen in Folge einer optimierten Bauteilgestaltung erreichen. [Fra13], [FG08], [GBP03].

Neben dem technologischen Nutzen ermöglicht der Einsatz der Technologie MID auch **Prozessinnovationen**. Durch die integrative Bauweise und die Rationalisierung des Herstellprozesses lässt sich die Prozesskette verkürzen. Die geringere Anzahl an benötigten Bauteilen und der geringere Montageaufwand reduzieren zum einen die Fertigungskosten und zum anderen den zeitlichen Aufwand für Serienprodukte. Bei der Verwendung geeigneter Herstellverfahren lassen sich flexible Änderungen durchführen. Dies bietet erhebliche Vorteile bei der Entwicklung von Prototypen.

Die genannten Vorteile steigern die Wettbewerbsfähigkeit der Produzenten von elektronischen bzw. mechatronischen Systemen. Außerdem erhöhen sich der Kundennutzen und die Möglichkeiten der Systemhersteller und Anwender zur Optimierung des Gesamtsystems [Fra13], [FGG+11], [GF06].

Bei der Entwicklung von innovativen MID-Erzeugnissen sind jedoch **verschiedene Herausforderungen** zu überwinden. Ein großes Problem besteht in der **fehlenden Standardisierung** bei der Entwicklung von MID-Produkten. Es fehlen im Vergleich zu konventionellen elektronischen Produktentwicklungen Normen und Prüfkriterien. Durch die Integration von Mechanik und Elektronik lassen sich bestehende Richtlinien für Gehäuse, Leiterplatten und elektronische Bauelemente **nicht direkt übertragen**, sondern müssen angepasst werden. Die Funktionsintegration auf kleinem Bauraum steigert zudem die Komplexität des Bauteils und es sind Wechselwirkungen (thermisch, chemisch, mechanisch, elektrisch) zwischen einzelnen Bauteilen zu berücksichtigen. Hier muss die Abhängigkeit zwischen Funktionalität und Design einbezogen werden.

Die größte Herausforderung besteht jedoch in der **Interdisziplinarität** aller beteiligten Bereiche. Die domänenübergreifende Koordination der Mechanik, Elektrotechnik, Kunststofftechnik und der Aufbau- und Verbindungstechnik führt zu einer erhöhten Komplexität der Prozesskette, da sich vereinzelte Teilprozesse oft über mehrere Unternehmen verteilen. Es fehlt an der Beherrschung aller Technologien und die damit verbundene Koordination aller Prozessschritte an einem Entwicklungsstandort. Es ist erforderlich, die arbeitsteiligen Prozesse abzusichern, um damit die Wertschöpfungskette zu optimieren. Dies führt zu der Notwendigkeit schon früh in der Konzeptionsphase domänenübergreifende Lösungsansätze zu finden, die alle Restriktionen mit einbeziehen und so späte aufwendige Änderungen verringern. Die Wahl des Herstellverfahrens schließt letztendlich einen effektiven Entwicklungsprozess ab und sollte für den Herstellungsprozess eine optimale Lösung anbieten [FGG+11], [GF06].

Die große **Abhängigkeit zwischen Produkt und Produktionsprozess** führt zu weiteren Herausforderungen. Die Möglichkeiten und Beschränkungen in Bezug auf Design und Funktionalität hängen stark von den jeweiligen Herstellverfahren ab. Aufgabe des Entwicklers ist demnach das optimale Verfahren unter Berücksichtigung der Produkthanforderungen integrativ auszuwählen [GF06]. Eine weitere Schwierigkeit bei der Gestaltung besteht darin, dass nicht alle Gestaltungsmöglichkeiten der Technologie mit jedem Herstellverfahren realisierbar sind. Eine komplexe räumliche Anordnung elektronischer Komponenten kann beispielsweise nur eingeschränkt mit herkömmlichen Prozessen, wie der zweidimensionalen Bestückungstechnik realisiert werden. Oftmals kann zu Beginn der Entwicklung keine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Produktidee in der Technologie MID überhaupt realisiert werden kann. Diese Problematik ist bei der Entwicklung innovativer Produkte zu berücksichtigen [FG08], [Fra13].

2.4 Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen

Die Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen ist einer Herausforderung, der mit methodischem Vorgehen begegnet werden kann. Die hilft, die komplexen Zusammenhänge zu beherrschen, die aus der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem resultieren. In diesem Kapitel werden entsprechend relevante Begriffe und Vorgehensmodelle vorgestellt. Zunächst wird in Abschnitt 2.4.1 das Zyklusmodell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER erläutert, das den grundsätzlichen Ablauf von der Produktidee bis zum Serienanlauf beschreibt. Anschließend wird in Kapitel 2.4.2 auf das Thema Machbarkeit mechatronischer Systeme eingegangen, da dieses die Basis für die Produktentwicklung eines jeden Systems darstellt. In Kapitel 2.4.3 wird das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung mechanisch elektronischer Baugruppen nach VDI 2206 beschrieben. Im Anschluss wird ab Abschnitt 2.4.4 auf die Konzipierung mechatronischer Systeme und diverse Hilfsmittel wie Konstruktionskatalogen eingegangen.

2.4.1 Zyklusmodell der Produktentstehung

Der Produktentstehungsprozess umfasst nach GAUSEMEIER die Phasen strategische Produktplanung, Produkt- und Produktionssystementwicklung [GLR+00], [GW11]. Bei der Betrachtung dieser Phasen sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- **Keine sequenzielle Reihenfolge:** Die Phasen lassen sich in der Praxis nicht streng sequenziell abarbeiten. Iterationsschleifen und gegenseitigen Abhängigkeiten sind die Regel. 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. Der Übergang von der strategischen Produktplanung in die Produktentwicklung im Bereich der Konzipierung ist beispielsweise nicht eindeutig festgelegt. Ein weiteres Beispiel ist die Abschätzung der Herstellkosten, die in der strategischen Produktplanung im Rahmen der Geschäftsplanung erfolgt. Diese kann nur sinnvoll durchgeführt werden, wenn die ersten Fertigungskonzepte in der Produktionssystementwicklung bereits determiniert wurden.

Nach GAUSEMEIER ist der Produktentstehungsprozess daher als ein Wechselspiel von Aufgaben zu betrachten. Diese lassen sich in drei Zyklen gliedern (Bild 2-6) [GP14].

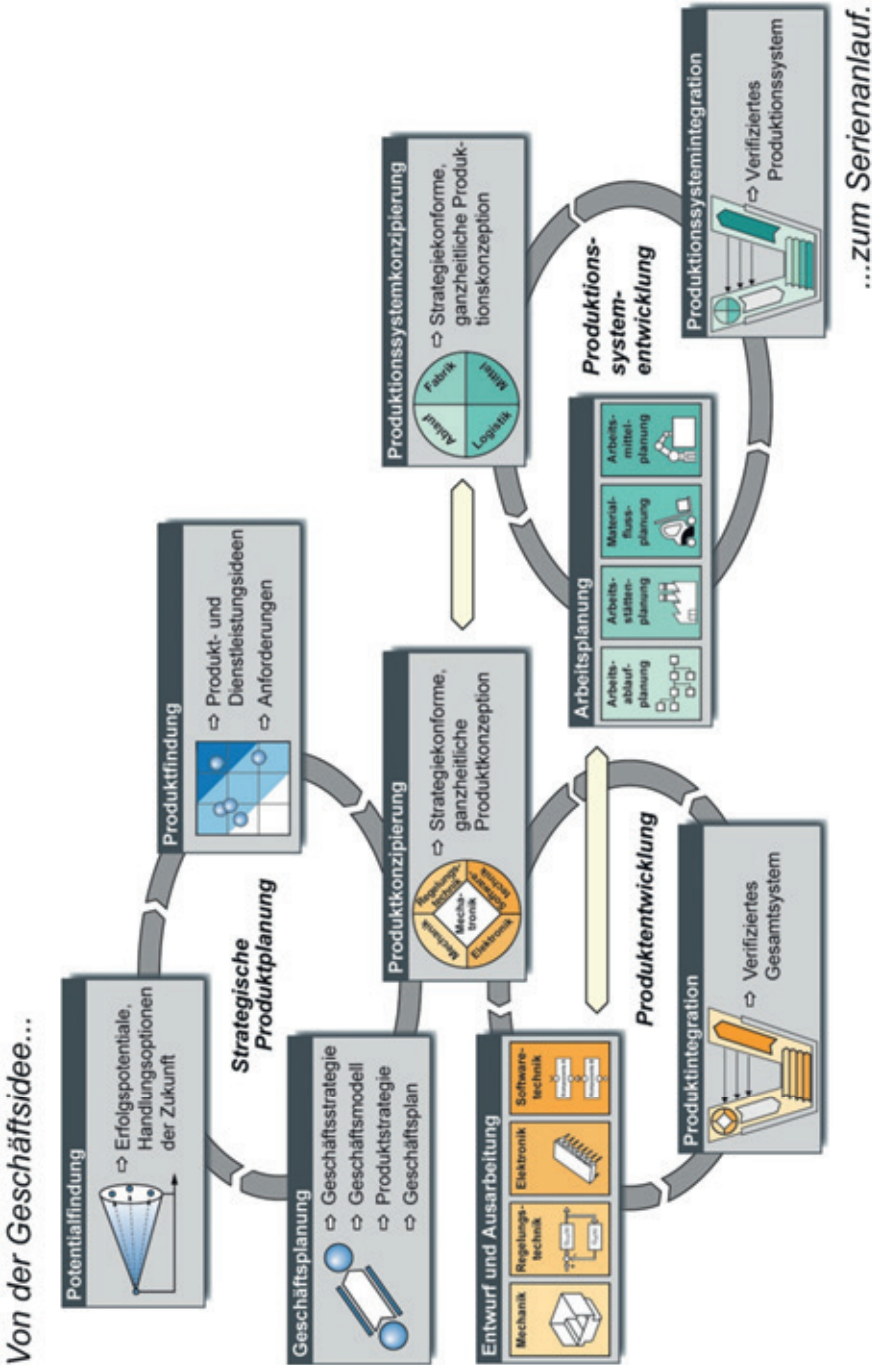


Bild 2-6: 3-Zyklus-Modell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER [GP14]

2.4.2 Machbarkeit mechatronischer Systeme

Die Produktentstehung reicht von der Produktidee bis zum Serienanlauf. In den frühen Phasen der Produktentstehung wird dabei eine Reihe von Aktivitäten durchgeführt, die VERGANTI folgendermaßen charakterisiert:

„the phases where the product concept is generated, the product specifications are defined and basic project decisions are taken, concerning the product architecture, the major components, the process technology and the project organization.“ [Ver99]

Diese Aktivitäten umfassen sowohl produktspezifische als auch projektspezifische Aktivitäten, die für die Durchführung des Entwicklungsprojekts entscheidend sind. Für die Einschätzung der Machbarkeit einer Produktidee sind daher zwei Aspekte wesentlich: Die grundsätzliche **technologische Machbarkeit** und die unter **betriebswirtschaftlichen Aspekten sinnvolle Projektrealisierung**. Diese beiden Aspekte werden häufig nicht unterschieden und so teilweise ablauforganisatorische Aspekte und projektübergreifende Rahmenbedingungen vermischt. Eine differenzierte Betrachtung ist aber wünschenswert, da sich für projektspezifische und projektübergreifende Aktivitäten unterschiedliche Ansatzpunkte ergeben [Jet05].

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher unter Machbarkeit die technisch mögliche Umsetzung einer Produktidee verstanden. Diese ist eine notwendige Voraussetzung für die nachgelagerte Entwicklung mechatronischer Systeme.

2.4.3 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Die VDI-Richtlinie 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme ist ein durchgängig domänenübergreifender Leitfaden für den Entwickler. Die Erfahrungen aus der industriellen Praxis sowie Ergebnisse der empirischen Konstruktionsforschung zeigen, dass sich der Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme nicht als starrer Ablaufplan einzelner Tätigkeiten beschreiben lässt [VDI2206]. Aus diesem Grund schlägt die VDI-Richtlinie 2206 ein flexibles Vorgehensmodell vor, das sich aus drei Elementen zusammensetzt: Problemlösungszyklus als Mikrozyklus, V-Modell auf Makroebene und Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte.

Problemlösungszyklus als Mikrozyklus: Der Problemlösungszyklus auf der Mikroebene unterstützt den Entwickler bei der Bearbeitung von planbaren, aber auch von unvorhersehbaren Problemen. Er basiert dabei auf dem allgemeinen Problemlösungszyklus, bekannt aus dem Systems Engineering. Durch Aneinanderreihen und Verschachteln von Vorgehenszyklen lässt sich die Prozessplanung flexibel an die Eigenheiten jeder Entwicklungsaufgabe anpassen. Er besteht aus den fünf Schritten: Situationsanalyse/Zielformulierung, Synthese und Analyse, Analyse und Bewertung, Entscheidung und Planung des weiteren Vorgehens.

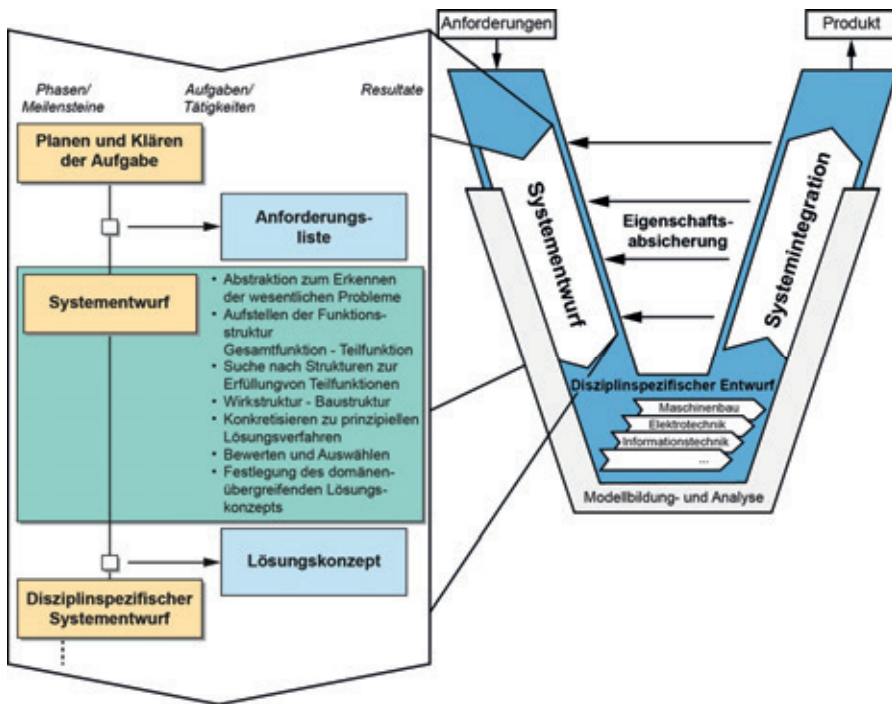


Bild 2-7: V-Modell mit dem Prozessbaustein Systementwurf [VDI2206]

V-Modell auf Makroebene: Das V-Modell auf der Makroebene wurde aus der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst (Bild 2-7). Es beschreibt das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Erzeugnisse und definiert die wesentlichen Teilschritte Anforderungen, Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration mit gleichzeitiger Eigenschaftensicherung. Prozessbegleitend fungiert die Modellbildung und -analyse.

- **Anforderungen:** Den Ausgangspunkt bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag. Die Aufgabenstellung wird präzisiert und in Form von Anforderungen beschrieben, die zugleich den Maßstab der späteren Produktbewertung bilden.
- **Systementwurf:** Ziel ist die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts beschreibt. Dazu wird die Gesamtfunktion eines Systems in Teilfunktionen zerlegt, für die dann Wirkprinzipien und Lösungselemente bestimmt werden. Die Kombination der Wirkprinzipien und Lösungselemente ergibt die Prinziplösung.
- **Domänenspezifischer Entwurf:** Das zuvor entwickelte Lösungskonzept wird meist getrennt in den beteiligten Domänen weiter konkretisiert. Insbesondere bei

kritischen Funktionen wird die Funktionserfüllung durch detailliertere Auslegungen und Berechnungen sichergestellt.

- **Systemintegration:** Die Entwicklungsergebnisse der einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert und das Zusammenwirken untersucht.
- **Eigenschaftsabsicherung:** Die Entwicklungsergebnisse müssen regelmäßig anhand der definierten Anforderungen überprüft werden. Die tatsächlichen Eigenschaften müssen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen.
- **Modellbildung und -analyse:** Die oben beschriebenen Phasen werden durch die Abbildung und Analyse der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen zur Simulation flankiert.
- **Produkt:** Ergebnis eines durchlaufenen Zyklus ist das Produkt. Ein komplexes mechatronisches Erzeugnis entsteht in der Regel jedoch nicht innerhalb eines Zyklus. Es wird unter Produkt vielmehr nicht ausschließlich das fertige, real existierende Erzeugnis verstanden, sondern die zunehmende Konkretisierung des zukünftigen Produktes wie z.B. Labormuster, Funktionsmuster oder Vorserienprodukt.

Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte: Für häufig wiederkehrende Arbeitsschritte im Entwicklungsprozess werden sog. Prozessbausteine mit typischen Aufgaben und Tätigkeiten definiert. Die VDI-Richtlinie beschreibt Prozessbausteine für die Aufgabenbereiche *Systementwurf*, *Modellbildung und -analyse*, *domänenspezifischer Entwurf*, *Systemintegration* und *Eigenschaftsabsicherung*.

Mit dem Durchlaufen dieses Makrozyklus erhält man sowohl ein finales Produkt, als auch ein Produkt unterschiedlicher Reifegrade. In der Regel sind mehrere Durchläufe notwendig, um komplexe mechatronische Systeme zu erzeugen.

Die VDI-Richtlinie 2206 führt bestehende Richtlinien speziell für mechatronische Systeme zu einer domänenübergreifenden Systematik zusammen. Sie ist allgemeingültig ausgelegt und nicht auf einzelne Technologien beschränkt. Daher ist sie insbesondere im domänenspezifischen Entwurf wenig detailliert. Der generelle Ansatz der Methodik strukturiert den Entwicklungsprozess und erlaubt eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Projekte. Durch den allgemeinen Aufbau ist auch eine Anwendung auf die MID-Entwicklung möglich. Insbesondere die starken Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigungstechnologie bei der Konzipierung von MID-Bauteilen werden hier jedoch nur unzureichend adressiert und auf die spezifischen Herausforderungen bei der MID-Entwicklung nicht explizit eingegangen.

2.4.4 Konzipieren mechatronischer Systeme

Die erfolgreiche Entwicklung mechatronischer Systeme beginnt in der Phase der Konzipierung. Die Phase der Konzipierung entspricht dabei dem Systementwurf des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206. Da viele Entwickler aus unterschiedlichen Domänen an der Entwicklung beteiligt sind, ist ein gemeinsames Verständnis der Entwicklungsaufgabe unerlässlich. Die Aufgabenklärung und die Entwicklung der Prinzipiellösung müssen somit domänenübergreifend erfolgen.

Im Sonderforschungsbereiches 614 Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus¹⁰ erweiterten daher GAUSEMEIER ET AL. die Konstruktionsmethodik für mechatronische Systeme in den frühen Phasen um drei wesentliche Elemente [GFD+09], [GRS09,]:

- Eine **Spezifikationstechnik** zur ganzheitlichen, domänenübergreifenden Beschreibung der Prinzipiellösung,
- Den Einsatz und die **Klassifikation von Lösungsmustern**,
- Ein detailliertes **Vorgehensmodell** für die Konzipierung

Hieraus entstand die Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems). Sie basiert auf den Arbeiten von KALLMEYER, FRANK und GAUSEMEIER ET AL. [Kal98], [Fra06], [GEK01] und umfasst eine Modellierungssprache sowie eine Vorgehensweise zur Erstellung des Systemmodells. Das Ziel von CONSENS ist die ganzheitliche und disziplinübergreifende Beschreibung der Prinzipiellösung im Rahmen der Konzipierung. Das Produktkonzept wird dabei durch sieben Partialmodelle beschrieben: *Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt des Produkts und Verhalten*. Das Produktionssystemkonzept wird durch die vier Partialmodelle dargestellt: *Anforderungen, Prozesse, Ressourcen und Gestalt des Produktionssystems*. Der Austausch erfolgt über die Anforderungen (Bild 2-8).

Die Spezifikation der Prinzipiellösung eines mechatronischen Systems ist die Grundlage für die Kommunikation und die Kooperation der Fachleute der beteiligten Domänen und Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung. Mit Konkretisierung wird der domänenspezifische Entwurf eines technischen Systems bezeichnet. Das Ziel ist die eindeutige und vollständige Beschreibung des Systems [GRS09], [Nor12].

¹⁰ Im Fokus des SFB 614 (der zum 30. Juni 2013 ausgelaufen ist) standen Methoden für den Entwurf intelligenter technischer Systeme. Die Entwicklung selbstoptimierender Systeme schließt die Entwicklung mechatronischer Systeme mit ein [GRS09].

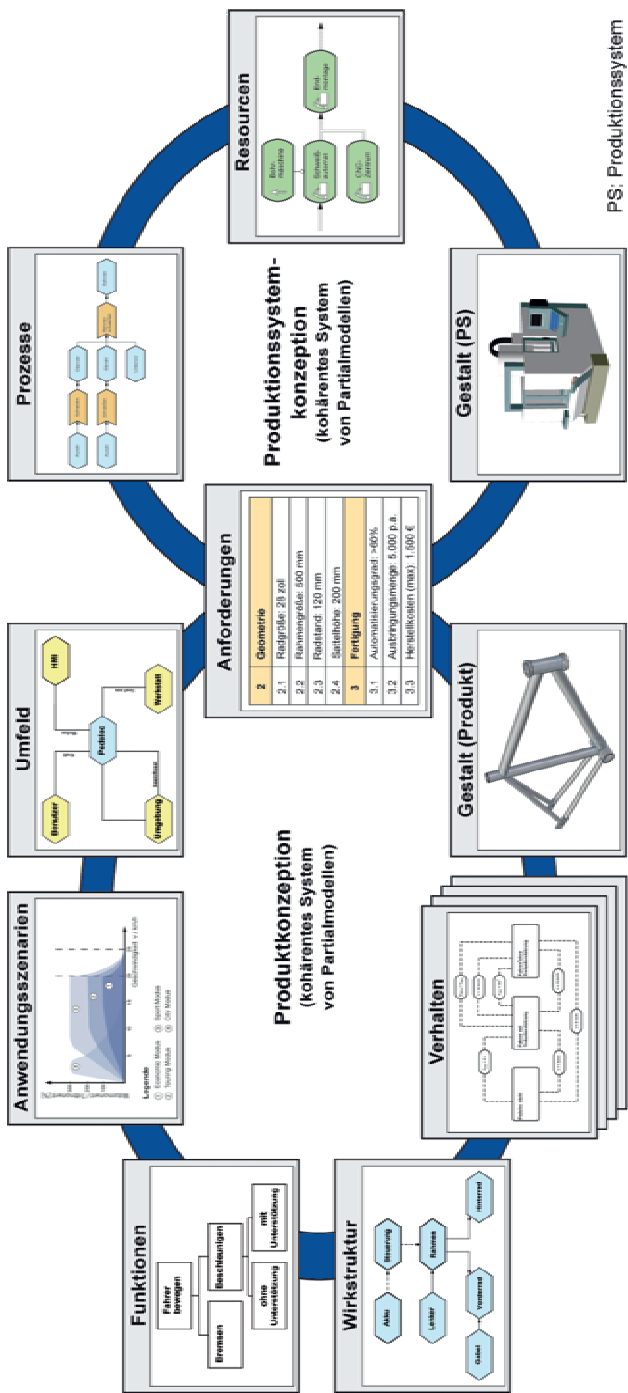


Bild 2-8: Partialmodelle in CONSENS [Nor12]

Die Aspekte und die entsprechenden Partialmodelle werden iterativ erarbeitet. Zu Beginn wird im Umfeldmodell die Systemgrenze festgelegt. Dabei wird das System als Black-Box betrachtet. Elemente aus dem Umfeld, die mit dem System in Beziehung stehen, werden identifiziert und die Wechselwirkung modelliert. Anwendungsszenarien beschreiben verschiedene Situationen und das gewünschte Verhalten des Systems in dieser Situation. Anschließend werden daraus Anforderungen an das System abgeleitet. Auf Basis der Anforderungen wird eine Funktionshierarchie erarbeitet und dann die Wirkstruktur aufgestellt. Alle gestaltbehafteten Systemelemente werden im Partialmodell Gestalt durch eine Form abgebildet. Ziel ist die Abstimmung der Bauräume, Anordnung, Lage, Art der Wirkflächen und Wirkorte. Abschließend wird das Systemverhalten spezifiziert. Die einzelnen Partialmodelle für das Produktkonzept beschreiben dabei [Fra06], [GFD+09], [Gau10], [Kai13]:

- das **Umfeld**, in welches das zu entwickelnde System eingebettet ist. Das System wird als Black Box modelliert und dabei mit den Elementen seines Umfelds über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse in Beziehung gesetzt. Hierzu werden die relevanten Einflussbereiche (z. B. Witterung oder Benutzer) und Einflüsse (z. B. Wärmestrahlung, Steuerinformationen) identifiziert.
- das Verhalten des Systems in einem bestimmten Zustand und einer bestimmten Situation in Form von **Anwendungsszenarien**. Sie sind somit eine situationspezifische Sicht auf das in der Prinziplösung beschriebene System und sein Verhalten.
- die hierarchische Aufgliederung der **Funktionen** zur Gesamtfunktion des zu entwickelnden Systems. Eine Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen [PBF+07]. Ihre Formulierung erfolgt lösungsneutral. Funktionen werden durch Lösungsmuster bzw. deren Konkretisierungen realisiert. Die Funktionen werden so lange in weitere Teilfunktionen aufgegliedert, bis zu den Funktionen sinnvolle Lösungsmuster gefunden werden.
- die Systemelemente, deren Merkmale sowie ihre Beziehungen zueinander werden in der **Wirkstruktur** beschrieben. Systemelemente repräsentieren Systeme, Module, Bauteile oder Software-Komponenten. Die Beschreibung ihrer Beziehungen erfolgt mit Stoff-, Energie- und Informationsflüssen. Das Ziel ist die Abbildung des grundsätzlichen Aufbaus und der prinzipiellen Wirkungsweise des Systems.
- eine erste Festlegung der **Gestalt des Produkts**. Das betrifft insbesondere Wirkorte, Wirk- und Hüllflächen sowie Stützstrukturen.
- das **Verhalten** des Systems. Dies bildet den Ausgangspunkt für den Software- und Reglerentwurf. Die Beschreibung des Verhaltens umfasst eine Gruppe von Partialmodellen, die die unterschiedlichen Arten des Verhaltens beschreiben (Zustände, Verhalten, Sequenz). Grundsätzlich werden die Systemzustände mit den

damit verbundenen Ablaufprozessen und den Zustandsübergängen modelliert. Ergänzend können weitere Arten von Verhalten wie die Kinematik, die Dynamik oder die elektromagnetische Verträglichkeit der Systemkomponenten spezifiziert werden.

- eine Repräsentation der **Anforderungen**, in Form einer Anforderungsliste. Sie stellt eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt dar und ist die Messlatte für das zu entwickelnde Produkt während der gesamten Produktentwicklung. Es wird zwischen Wunsch- und Festforderungen unterschieden. Sie sind durch qualitative und quantitative Aussagen zu konkretisieren [PBF+07]. Es ist gleichermaßen Teil der Beschreibung des Produktes und des Produktionssystems, da die Anforderungsliste eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt und das zugehörige Produktionssystem darstellt

Auf Grundlage der Informationen in Wirkstruktur, Anforderungsliste und Gestaltmodell des Produktes wird eine erste Baustruktur erstellt. Diese bildet den Ausgangspunkt für die Ableitung einer ersten Montagereihenfolge und wird um Produktionsprozesse zur Herstellung der einzelnen Systemelemente ergänzt. Anschließend wird eine erste Prozessfolge aufgebaut. Hierauf erfolgt die Zuordnung von Ressourcen zu den einzelnen Arbeitsvorgängen und deren Detaillierung durch Gestaltinformationen. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Modellelementen werden durch Verknüpfungen dargestellt, so dass die Wechselwirkungen zwischen den Elementen identifiziert werden können. Die Partialmodelle für das Produktionssystemkonzept beschreiben analog [Nor12]:

- die Montage- und Fertigungsreihenfolge betriebsmittelunabhängig als eine Folge von Arbeitsvorgängen (**Prozesse**). Die Arbeitsvorgänge werden durch Prozessparameter beschrieben, die werden im Laufe des Entwicklungsprozesses detailliert und konkretisiert werden. Ein- und Ausgangsgrößen der Prozesse sind Materialelemente. Sie beschreiben alle Rohstoffe, Zulieferteile und Handelswaren sowie Roh-, Halb- und Fertigteile in der Produktion. Die Prozessfolge bildet den Kern der Produktionssystemkonzeption. Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem können frühzeitig identifiziert und Restriktionen durch die Fertigung in die Produktentwicklung zurückgespiegelt werden.
- **Ressourcen** wie Arbeitsmittel und Personal, die zur Durchführung der einzelnen Arbeitsvorgänge aus dem Partialmodell Prozessfolge benötigt werden. Die Verkettung der einzelnen Ressourcen erfolgt durch Materialflüsse. Sie ergeben sich aus der Verkettung der Arbeitsvorgänge in der Prozessfolge
- erste Festlegungen zur **Gestalt** bzw. der Struktur **des Produktionssystems** getroffen werden. Unter der Gestalt werden Arbeitsräume, Platzbedarfe von Maschinen oder die Arbeitsbereiche von Handhabungseinrichtungen zusammengefasst.

Die Spezifikationstechnik CONSENS ermöglicht mithilfe einer lösungsneutralen Funktionsstruktur eine systematische Modellierung des zu entwickelnden Systems. CONSENS bietet eine gute Ausgangslage zur Konzipierung, die für räumliche Schaltungsträger typische Interaktion von mechanischem und elektronischem Design wird jedoch nicht adressiert und lässt sich auch nicht modellieren. Die beim Übergang in den domänenspezifischen Entwurf eintretende Konkretisierung der Funktionselemente wird derzeit nicht auf Plausibilität überprüft.

2.4.5 Produktfunktionen und Lösungen

Ein wesentliches Mittel zur Beschreibung des Produktkonzepts bildet die Spezifikation der Produktfunktionen. Insbesondere in den frühen Phasen ist es notwendig zu beschreiben, welche Aufgaben ein Produkt umsetzen muss, nicht wie die entsprechenden Umsetzungs- und Systemelemente ausgestaltet werden. Der funktionalen Beschreibung kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Die Produktfunktionen werden dabei in der Regel nach **Haupt- und Nebenfunktionen** unterschieden:

Hauptfunktionen sind solche Teilfunktionen, die unmittelbar der Gesamtfunktion dienen. Nebenfunktionen tragen im Sinne von Hilfsfunktionen nur mittelbar zur Gesamtfunktion bei. Sie haben unterstützenden oder ergänzenden Charakter und sind häufig von der Art der Lösung für die Hauptfunktionen bedingt [PBF+07].

Oftmals ist es zweckmäßig, Gesamtprobleme in Teilprobleme aufzuspalten, um daraus die zu lösenden Teilaufgaben abzuleiten (Methode der Faktorisierung). Gesamtfunktionen komplexer Aufgabenstellungen werden in Teilfunktionen gegliedert, um zu deren Erfüllung leichter Lösungen zu finden. Nach Vorliegen von Lösungen für Teilprobleme, Teilaufgaben oder Teilfunktionen müssen diese anschließend kombiniert werden, um zu Lösungen für das Gesamtproblem, für die Gesamtaufgabe oder für die Gesamtfunktion zu kommen.

Neben intuitiven **Methoden zur Lösungssuche**, gibt es auch spezielle Methoden zur Lösungs-Synthese. Grundsätzlich müssen diese eine anschauliche und eindeutige Kombination von Teillösungen unter Berücksichtigung der begleitenden physikalischen oder sonstigen Größen und der betreffenden geometrischen und stofflichen Merkmale gestatten. Entsprechend zutreffende Merkmale sind für informationstechnische Lösungen zu finden und einzusetzen, wenn diese in ihrer Kombination untersucht werden sollen. **Hauptproblem solcher Kombinationsschritte ist das Erkennen von Verträglichkeiten zwischen den zu verbindenden Teillösungen** zum Erreichen eines weitgehend störungsfreien Energie-, Stoff- und/oder Signalflusses sowie von Kollisionsfreiheit in geometrischer Hinsicht bei mechanischen Systemen. Bei Informationssystemen wäre dies bspw. der Informationsfluss mit seinen entsprechenden Verträglichkeitsbedingungen. Ein weiteres Problem liegt bei der Auswahl technisch und wirtschaftlich günstiger Kombinationen aus dem Feld theoretisch möglicher Kombinationen [PBF+07].

Die Produktentwicklung mit Hilfe von Produktfunktionen und entsprechenden Lösungen zu unterstützen ist ein bewährtes Mittel bei der Entwicklung technischer Systeme. Es gilt jedoch, den Grad der Abstraktion der Lösungen zu identifizieren und sowohl Abhängigkeiten als auch Kombinationen von Lösungen für Produktfunktionen zu identifizieren. Für die Technologie MID gibt es bisher nur erste Ansätze, die mithilfe von Konstruktionskatalogen generische Lösungen bereitstellen [Fra13], [Pei08].

2.4.6 Einsatz von Lösungsmustern

Beim Aufstellen der **Wirkstruktur** in CONSENS ergibt sich die Notwendigkeit, für die in der Funktionshierarchie dokumentierten Funktionen **geeignete Lösungen** zu finden. Häufig existieren bewährte Lösungen, auf die bei der Konzipierung zurückgegriffen werden kann. Eine Neuentwicklung ist somit nicht notwendig. Diese bewährten Lösungen werden durch das Konstrukt des Lösungsmusters beschrieben. Die in der Literatur am häufigsten zitierte Definition von Denkmustern bzw. Mustern geht zurück auf den Architekturtheoretiker ALEXANDER. Nach ALEXANDER beschreibt

„Jedes Muster ein in unserer Umwelt immer wieder auftretendes Problem, beschreibt den Kern der Lösung dieses Problems, und zwar so, dass man diese Lösung millionenfach anwenden kann, ohne sich je zu wiederholen“ [AIS+77].

BARTER und HASKINS liefern eine vereinfachte Definition, nach der

„Ein Muster definiert ist als eine Lösung für ein spezifisches Problem innerhalb eines bestimmten Kontextes“ [Bar98], [Has05].

Lösungsmuster werden in **Wirkprinzipien** und **Muster der Informationsverarbeitung** unterschieden [GRS09]. Wirkprinzipien finden sich im Maschinenbau und in der Elektrotechnik. Sie werden durch den Zusammenhang von physikalischen Effekten sowie geometrischen und stofflichen Merkmalen beschrieben [PBF+07]. Muster der Informationsverarbeitung werden unterteilt in Muster der Softwaretechnik, der Regelungstechnik und der Selbstoptimierung (Bild 2-9) [GRS09]. Laut CLOUTIER ist ein großer Vorteil abstrakter Muster die Geschwindigkeit mit dem Wissen auf neue unerfahrene Entwickler übertragen werden kann [CD06]. Somit können komplexe Zusammenhänge leichter und schneller vermittelt werden.

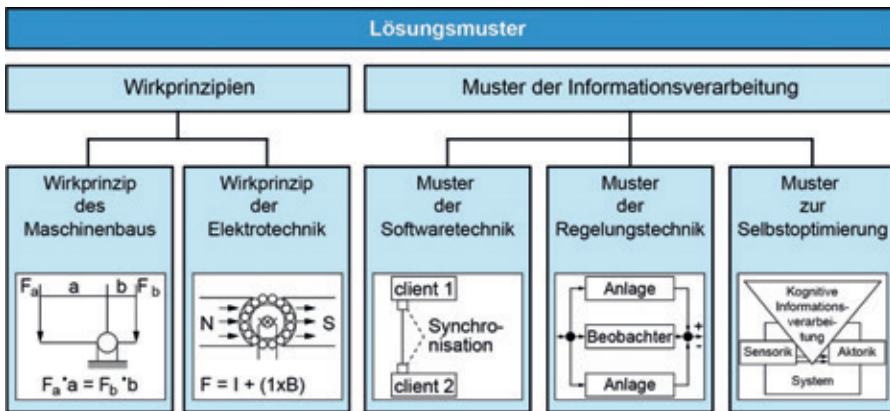


Bild 2-9: Kategorisierung von Lösungsmustern [GRS09]

ANACKER greift die existierenden Definitionen auf und beschreibt Lösungsmuster als Resultat:

„... aus durch den Menschen hervorgerufenen Regelmäßigkeiten oder regelhaften Wiederholungen von Lösungen (Vorgehen, Methode, Verfahren, spezielle Kenntnis, Ergebnis) für bestimmte Problemstellungen. Ein Lösungsmuster umfasst eine explizite und generalisierte Beschreibung eines Problems sowie der zugehörigen Lösung (Problem-Lösungs-Paar). Lösungsmuster unterstützen den Menschen bei der Erzeugung von Artefakten. Artefakte in der Produktentstehung sind u.a. Objekte (Organisationsstruktur, CAD-Modell, Systemmodell, Softwarecode, Arbeitsplan etc.) oder Prozesse (Ablauforganisation, Vertriebsprozess, Entwicklungsprozess etc.)“ [Ana15].

Durch den allgemeinen Aufbau ist auch eine Anwendung auf die MID-Entwicklung möglich. Insbesondere aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigungstechnologie bei der Konzipierung von MID-Bauteilen erscheint der Einsatz von Mustern beim Übergang von der Prinzipiellösung in den domänenspezifischen Entwurf vorteilhaft.

2.4.7 Konstruktionskataloge

Kataloge sind eine Sammlung bekannter und bewährter Lösungen für bestimmte konstruktive Aufgaben oder Teilfunktionen. Kataloge können Informationen recht verschiedenen Inhalts und Lösungen unterschiedlichen Konkretisierungsgrades enthalten. So können in ihnen physikalische Effekte, Wirkprinzipien, prinzipielle Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen, Maschinenelemente, Normteile, Werkstoffe, Zukaufteile und dgl. gespeichert sein [PBF+07].

Die wesentlichen Ziele von Konstruktionskatalogen sind die Unterstützung eines schnellen und aufgabenorientierten Zugriffs auf Lösungen sowie die möglichst vollständige Abbildung des Lösungsspektrums. ROTH schlägt eine Struktur für den Aufbau von Konstruktionskatalogen vor, die einen Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil sowie einen Anhang umfasst. Der Gliederungsteil enthält die ordnenden Gesichtspunkte. Das fördert die Übersichtlichkeit und ermöglicht eine einfache Handhabung. Der Hauptteil umfasst den eigentlichen Inhalt des Katalogs. In ihm sind die Objekte z.B. anhand von Skizzen dargestellt. Der Zugriffsteil umfasst die Eigenschaften der einzelnen Objekte. Der Anhang enthält ergänzende Informationen [Rot00], [Rot01].

Konstruktionskataloge sind hervorragend für die Lösungssuche geeignet, weil sie einen schnellen und aufgabenorientierten Zugriff auf Lösungen ermöglichen. Für die Technologie MID existieren bereits erste Konstruktionskataloge [Pei07].

2.5 Prototypen

Um das methodische Vorgehen und die frühzeitige Eigenschaftsabsicherung, auch von Teilaspekten der Produktentwicklung, zu unterstützen ist der Einsatz von frühzeitigen Modellen und Prototypen unabdingbar. Prototypen sind ein effizientes Hilfsmittel, um die Produktentwicklung zu unterstützen. Sie ermöglichen eine bessere Kommunikation zwischen den Auftraggebern und den Auftragnehmern, begrenzen bereits im frühen Entwicklungsstadium einen Teil der Fehlermöglichkeiten und helfen so Änderungskosten zu vermindern¹¹. Weiterhin wird die Zeit bis zur Markteinführung deutlich verkürzt [BBW+13], [For04]. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Unterschied zwischen Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing erläutert. Anschließend werden die relevanten Verfahren zur Herstellung des Grundkörpers und zur Herstellung der für MID notwendigen selektiven Strukturierung beschrieben.

2.5.1 Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

Um den gestiegenen Anforderungen an Produkte und damit an die Produktentwicklung Rechnung zu tragen, kommen Prototypen vor allem zu Beginn der Produktentwicklung eine besondere Bedeutung zu, da in dieser Anfangsphase der größte Anteil der Produktionskosten festgelegt wird. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung festzulegen, wie diese Modelle auszusehen haben bzw. über welche Funktionen und Eigenschaften die Prototypen verfügen sollen [Geb13], [Kle00]. In der Regel wird zwischen einfachen Gestaltmodellen, Produkten mit seriennahen Eigenschaften sowie Produkten, die auf prototypenwerkzeugen gefertigt wurden unterschieden. Beim Rapid Manufacturing (RM) werden häufig Bauteile mit den seriennahen Eigenschaften der Endprodukte erzeugt, wohingegen bei Rapid Prototyping (RP) physikalische Bauteile erzeugt werden, die einen unterschiedlichen Grad an Eigenschaften aufweisen können. Die Einordnung der beiden

¹¹ Eine Umfrage in der Branche elektromechanischer Kleingeräte hat ergeben, dass 40% der Änderungen erst nach Erstellung der Serienwerkzeuge erkannt werden [LR98].

Ansätze in die Produktentstehungsphasen nach VDI 2221 verdeutlicht die jeweiligen Schwerpunkte (Bild 2-10).

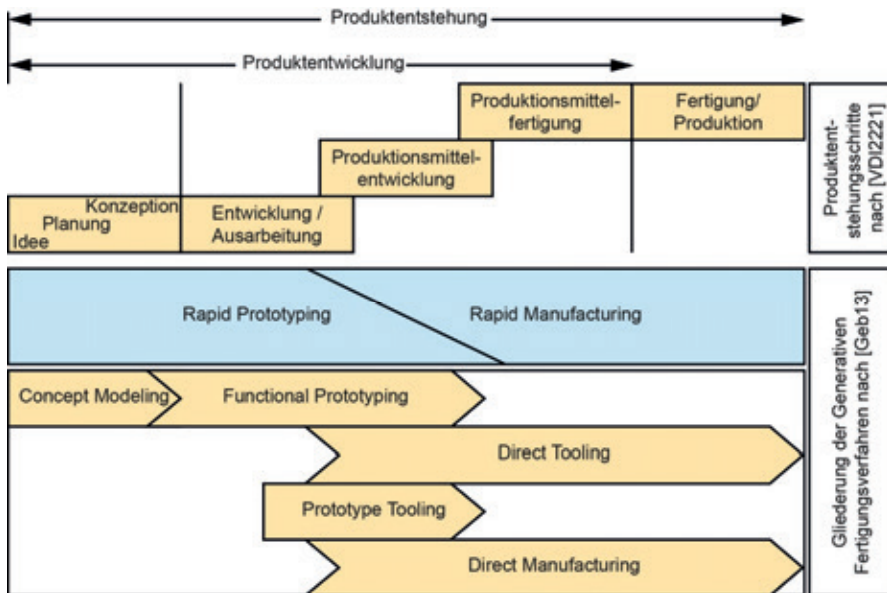


Bild 2-10: Einordnung des Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing in den Produktentstehungsprozess [VDI2221], [Geb13]

Rapid Manufacturing ist insbesondere für die späteren Phasen der Produktentwicklung und der Fertigung von Bauteilen von Bedeutung. Rapid Prototyping findet vorwiegend in den frühen Phasen Anwendung und ist daher im Kontext dieser Arbeit von hoher Bedeutung [Got13].

Die Technologie MID stellt dabei hohe Anforderungen an die Entwicklung und Produktion aussagefähiger Prototypen, da sowohl Anforderungen an die mechanische Struktur des Grundkörpers als auch an die elektronischen Funktionselemente gestellt werden. Für ein endproduktnahes Modell müssen vergleichsweise ähnliche Materialeigenschaften vorliegen und die elektronischen Funktionen seriennah umgesetzt werden können. Auch die Metallschichteigenschaften der aufgetragenen Metallisierung müssen mit dem Serienprodukt vergleichbar sein. Ansonsten kommt es unter Umständen zu gänzlich unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich Leitfähigkeit, Korrosion, Haftung oder den zur Verfügung stehenden AVT-Technologien. Bild 2-11 verdeutlicht einige wesentliche Anforderungen an das MID-Prototyping.

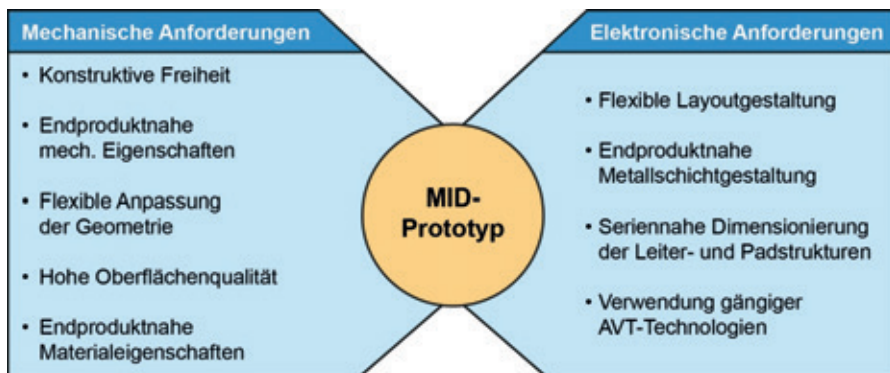


Bild 2-11: Anforderungen an Prototypen für die Technologie MID in Anlehnung an [Got13]

Bei MIDs liegt der Fokus bei der Prototypenentwicklung zum einen auf der Herstellung des Grundkörpers. Dieser ist, bedingt durch den zeit- und kostenintensiven Spritzguss, häufig der begrenzende Faktor bei der Herstellung. Zum anderen müssen die elektronischen Funktionen über ein möglichst flexibel anpassbares Layout erzeugt werden. Je nachdem welche Verfahren für die Grundkörperherstellung eingesetzt werden, begrenzen diese die Verfahren der möglichen Strukturierungsprozesse. Im Bereich der Metallisierung hat sich für die Verfahren, die einen zusätzlichen Metallisierungsschritt benötigen, eine Becherglasmetallisierung für Prototypen und Kleinserien etabliert [Got13], [Fra13] und wird daher im Rahmen der Arbeit nicht näher betrachtet.

2.5.2 Verfahren zur Herstellung des Grundkörpers

Da der bei MID übliche Spritzguss zur Herstellung des Grundkörpers Zeit- und kostenintensiv ist, sind insbesondere für diesen Prozessschritt Alternativen zu identifizieren. Die Fertigungsverfahren zur Herstellung des Grundkörpers bestehen nach DIN 8580 aus sechs Hauptgruppen. Diese Hauptgruppen lassen sich weiter in zahlreiche Untergruppen unterteilen. Generative Fertigungsverfahren sind aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften nicht eindeutig einer Gruppe zuzuordnen, gehören aber grundsätzlich der ersten Gruppe „Urformen“ an. Prinzipiell lassen sich generative bzw. additive Verfahren gegenüber subtraktiven Verfahren (z.B. Fräsen, Drehen) und formativen Verfahren (z.B. Tiefziehen) abgrenzen [DIN8580], [BHS13].

2.5.2.1 Generative Fertigungsverfahren

Unter dem Begriff der generativen Fertigungsverfahren fallen alle Verfahren, die eine gewünschte Geometrie durch das Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen erzeugen. Diese Volumenelemente sind i.d.R. Schichten mit gleicher Dicke. Generative

Fertigungsverfahren finden sowohl Anwendung in der Herstellung von Mustern und Prototypen (Rapid Prototyping) als auch in der Fertigung von Produkten (Rapid Manufacturing). Darüber hinaus können Werkzeuge und Werkzeugeinsätze (Rapid Tooling) erstellt werden [BBW+13], [BHS13].

Aufgrund des Schichtbauprinzips weisen generative Fertigungsverfahren besondere Eigenschaften auf. Die Schichtgeometrie wird direkt aus 3D CAD Daten generiert, weshalb keine produktspezifischen Werkzeuge notwendig sind. Die wesentlichen Materialeigenschaften werden während des Bauprozesses erzeugt. Darüber hinaus kann ein Bauteil grundsätzlich in beliebiger Orientierung hergestellt werden, wodurch die Spannproblematik entfällt. Den Ausgangspunkt bildet ein vollständig geschlossenes Volumenmodell, das virtuell in Schichten geschnitten und der Maschine übergeben wird. Diese erzeugt mithilfe der Daten das physikalische Modell. Alle auf dem Markt befindlichen Maschinen können mit dem gleichen STL¹² Datensatz angesteuert werden [Geb13], [BHS13].

Die Formgebung erfolgt bei allen generativen Fertigungsverfahren in der xy-Ebene und ist damit zweidimensional. Die Dreidimensionalität wird durch das Aneinanderfügen von Einzelschichten entlang der z-Achse erzeugt. Generative Verfahren lassen sich deshalb in die beiden Teilschritte Generieren einer Schicht und Verbinden einer Schicht mit der Vorhergehenden aufteilen. Durch diese Vorgehensweise entspricht das Verfahren streng genommen einem 2½D Verfahren. Die Bauteile sind in der xy-Ebene sehr präzise, weisen in z-Richtung aber dreidimensionale stufige Gebilde auf. Die Stufen sind abhängig von der technisch möglichen Schichtstärke. Die Schichtstärken betragen zwischen 0,1 mm - 0,05 mm. Bei Mikrobauteilen kann mit einer Schichtstärke von bis zu 5 nm gearbeitet werden. Generativ gefertigte Bauteile weisen damit unterschiedliche Genauigkeiten in x-y- und z-Richtung auf. Dies wird in Bild 2-12 verdeutlicht. Es ist eine Bohrung parallel (links) und senkrecht zur Schichtebene (rechts) dargestellt [Geb13].

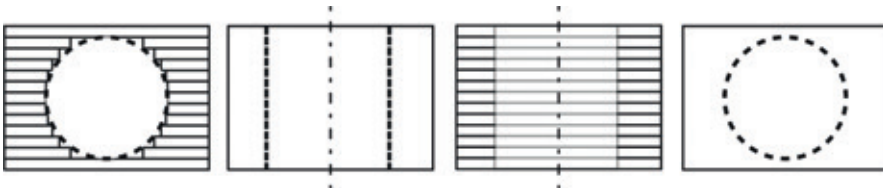


Bild 2-12: Beispiel einer prinzipbedingten Stufung bei generativen Verfahren [Geb13]

Klassifikation

Für die generative Fertigung existiert eine Vielzahl möglicher Verfahren. Diese differenzieren sich durch den Aggregatzustand und die Art des Ausgangsmaterials und des technologischen Prinzips der Modellerstellung. Für eine systematische Betrachtung der generativen Verfahren hat sich eine Klassifikation nach DIN 8580 durchgesetzt (Bild 2-13).

¹² STL (Surface Tessellation Language bzw. Standard Triangulation Language) ist ein neutrales Dateiformat, das sich für generative Verfahren etabliert hat.

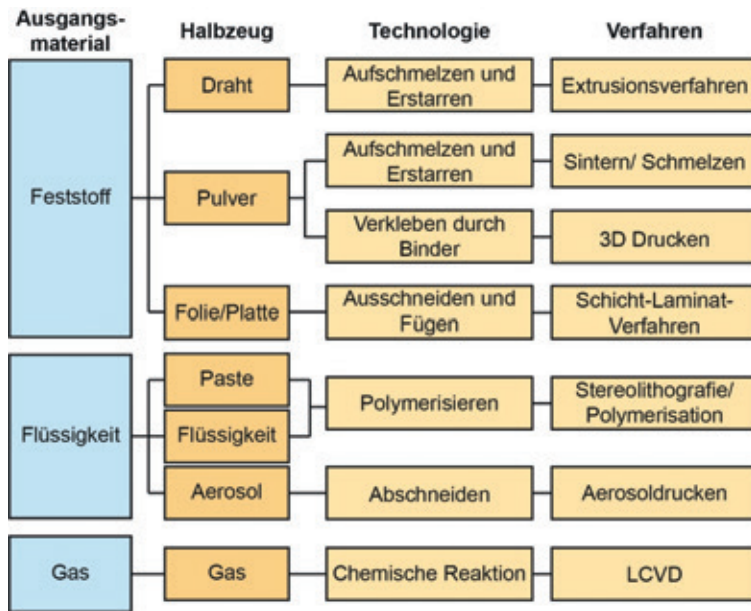


Bild 2-13: Klassifikation generativer Verfahren nach DIN 8580 [Geb13]

Darin wird in der ersten Instanz nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials unterschieden. Die zweite Gliederungsebene wird nach der Erscheinungsform im Sinne eines Halbzeugs klassifiziert. Die dritte Ebene zeigt den Mechanismus der Schichterzeugung auf und die vierte Ebene enthält die generische Bezeichnung des Verfahrens [DIN8580].

Generieren aus der festen Phase

Unter der Bezeichnung Fused Layer Modeling (FLM) oder Fused Deposition Modeling (FDM) sind extrudierende Verfahren bekannt geworden. Bei diesen Verfahren schmilzt eine Düse einen thermoplastischen Draht auf und erzeugt mittels zeilenförmigen, kontinuierlichen Bahnen die Bauteilstruktur. Bei einem ähnlichen Verfahren werden diskontinuierlich Tröpfchen aufgetragen. Dieser Vorgang ist berührungslos und wird über ein Piezo-Element in der Düse realisiert. Das Verfahren wird ballistisches Verfahren genannt, ist aber nicht so weit verbreitet wie das FDM [BHS13], [Geb13].

In einem Pulverbett angeordnete Pulver oder Granulate stellen den Ausgangsstoff für Sinter- oder Schmelzverfahren dar. Sie werden auf einer Schichtebene aufgetragen und werden dort mithilfe energiereicher Einzelbestrahlung (z.B. Laserstrahlen) aufgeschmolzen und zu einem festen Körper verbacken. In Anlehnung an nicht-generative Sinterverfahren werden diese Verfahren Selektives Lasersintern oder Laserstrahlschmelzen genannt [Geb13], [BHS13].

Das Pulver-Binder Verfahren erzeugt feste Schichten durch das Verkleben von Granulaten mithilfe eines flüssigen Binders (Klebstoff). Sie wird wegen ihrer Ähnlichkeit zu 2D

Printverfahren auch 3D Drucken genannt. Ein Druckkopf verteilt den Binder direkt auf dem Pulver bzw. Granulat, das daraufhin entlang der gewünschten Kontur miteinander verklebt. Überschüssiges Pulver kann im Anschluss einfach abgeblasen werden [Geb13], [BHS13].

Ein weiteres Verfahren ist das Zuschneiden und Fügen von Folien (Laminated Object Manufacturing). Dabei werden sehr dünne Folien aufeinandergeschichtet, mit dem bestehenden Teil verbunden und anschließend mittels Laser oder Fräse konturiert. Im Sinne der Klassifikation der generativen Fertigungsverfahren ist dieses Verfahren nur bedingt zuzuordnen, da es subtraktive Vorgänge beinhaltet [Geb13].

Generieren aus der flüssigen Phase

Das flüssige Ausgangsmaterial besteht aus un- oder niedrigvernetzten Monomeren vom Typ Acrylat, Epoxidharz oder Vinyletherharz. Diese liegen als Flüssigkeit oder Paste vor und werden einer ultravioletten Strahlung ausgesetzt. Hierdurch wird eine spontane Polymerisation ausgelöst, bei der sich das flüssige Monomer vernetzt und zu einem festen Polymer reagiert. Das Stereolithographie-Verfahren (STL) nutzt diese Reaktion, um Bauteile generativ aufzubauen [Geb13], [BHS13]. Ein weiteres ähnliches Verfahren, das diesen Effekt nutzt ist das sogenannte Clipping, bei dem zusätzlich durch das Einleiten von Sauerstoff in einer kontrollierten Randzone eine verfrühte Polymerisation vermieden wird. Sobald die Trägerplattform die Randzone verlässt erfolgt eine spontane Polymerisation der UV-bestrahlten Flächen. Das Besondere an dieser Technologie ist, dass das Modell von oben nach unten aufgebaut wird, da es kopfüber aus dem Harzbad herausgezogen wird [Car15-ol].

Generieren aus der Gasphase

Bei diesem Verfahren werden ausgehend von einem gasförmigen Ausgangsstoff Partikel auf ein Substrat abgeschieden. Es wird dabei zwischen chemischem und physikalischem Abscheiden unterschieden. Beim chemischen Abscheiden werden reaktionsfreudige Gase durch externe Energiequellen zu lokalen Reaktionen angeregt, wodurch feste Stoffe abgelagert werden. Beim physikalischen Abscheiden werden Partikel in der flüssigen Phase einer Zweiphasenströmung gelöst und transportiert. Diese werden durch lokales Verdampfen gezielt abgeschieden.

Herausforderungen generativer Verfahren

Die größte Herausforderung von generativen Verfahren ist die maximal zu erreichende Genauigkeit. Diese ist zum einen vom gewählten Verfahren und der damit verbundenen Maschine abhängig. Beispielsweise lässt sich mit der Stereolithographie eine höhere Genauigkeit erzielen als mit dem Fused Layer Modeling (FLM). Zum anderen ist die gewählte Schichtstärke entscheidend. Je kleiner die Schichtstärke gewählt wird, umso genauer kann ein Produkt gefertigt werden. Dies erhöht wiederum den zeitlichen Aufwand [BHS13], [BBW+13].

Seit der Einführung der ersten Stereolithografie-Systeme sind viele weitere generative Verfahren entwickelt worden. Diese weisen unterschiedliche Restriktionen hinsichtlich ihrer mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Genauigkeit und des Nachbearbeitungsaufwands auf. In der Regel wirken sich die Fertigungsrestriktionen der einzelnen Verfahren direkt auf die Produktgestalt aus. So sind CAD-Modelle eines Produktes für ein bestimmtes Verfahren nicht ohne weiteres auf ein anderes Verfahren übertragbar.

2.5.2.2 Halbzeug-Fräsen

Eine alternative Möglichkeit für die Fertigung des Grundkörpers besteht in der konventionellen frästechnischen Bearbeitung von thermoplastischen Halbzeugen. Als Halbzeuge dienen spritzgegossene oder extrudierte Platten oder Quader. Dieses Verfahren ist auf kleine MID-Bauteile beschränkt, da Halbzeuge mit zunehmender Wandstärke zur Lunkerbildung (Bildung von kleinen Hohlräumen im Werkstück) neigen. Zusätzlich können eingefrorene, mechanische Spannungen durch die Bearbeitung des Halbzeugs relaxieren und zu Verzug oder Rissbildung führen. Um Verzug zu vermeiden, empfehlen sich grundsätzlich eine Temperung und eine beidseitige Bearbeitung des Halbzeugs. Die Parameter für den Fräsprozess sind so zu wählen, dass eine hohe Oberflächenqualität mit geringer Gratbildung und Oberflächenrauheit erzielt wird [Fra13].

2.5.2.3 Spritzguss

Das Spritzgießen ist das Standardverfahren für die Herstellung von Kunststoffgrundkörpern. In der Serienfertigung spart es Kosten und garantiert gleichzeitig eine hohe reproduzierbare Qualität. Dies wird durch den Einsatz von etablierten MID-Herstellverfahren bestätigt. Spritzgusswerkzeuge sind in der Regel aus gehärtetem Stahl mit Mehrfachkavitäten gefertigt um lange Standzeiten, hohe Stückzahlen und eine hohe Oberflächenqualität sicherzustellen. Jedoch sind diese Werkzeuge in ihrer Herstellung sehr teuer und nicht flexibel änderbar.

Um eine vergleichbare Bauteilqualität im Rahmen eines Rapid Manufacturing zu erreichen, werden sog. Stammwerkzeuge eingesetzt. Stammwerkzeuge sind Spritzgießwerkzeuge, die mit separat hergestellten Formeinsätzen bestückt werden. Die Formeinsätze können dabei aus Aluminium oder Stahl gefräst bzw. generativ gefertigt sein [Fra13].

Einsätze aus Aluminium: Aluminium weist im Gegensatz zu Stahl eine geringere Festigkeit auf und bietet somit Vorteile im Bereich der spanenden Bearbeitung. So lassen sich mit geringerem Kosten- und Zeitaufwand mittels Rapid-Tooling-Verfahren Formeinsätze fertigen. Der große Nachteil von Werkzeugeinsätzen aus Aluminium liegt in der geringen Standzeit. Die Verwendung von Kunststoffen mit abrasiven Füllstoffen führt zu einem schnellen Werkzeugverschleiß wodurch vor allem filigrane Strukturelemente abgenutzt werden. Des Weiteren können aluminiumhaltige Metallpartikel auf der Bauteiloberfläche

zurückbleiben was in späteren Prozessschritten zu ungewollten Fremdmetallisierungen führen kann. Dies erfordert einen anschließenden Reinigungsprozess [Fra13], [GT15-ol].

Einsätze aus generativen Verfahren: Für die Fertigung von Formeinsätzen mit generativen Verfahren können bspw. Verfahren wie das Selektive Lasersintern oder das Selektive Laserschmelzen (SLM) eingesetzt werden. Das SLM ist dem SLS vom Bauprozess sehr ähnlich. Allerdings ist das Ausgangsmaterial ein Metallpulver. Beim SLS können alle kommerziell erhältlichen Thermoplaste eingesetzt werden. Zurzeit sind minimale Schichtdicken von 20 µm realisierbar. Die Kosten steigen proportional zum Volumen, jedoch nicht zu der Komplexität des Bauteils an. Dadurch bietet es sich an mit diesem Verfahren besonders kleine, komplexe Kavitäten herzustellen [Fra13].

Die Standzeit einer im SLS oder SLM Verfahren hergestellten Kavität ist jedoch eingeschränkt und reicht nicht an die Schusszahlen von gehärteten Stahlformen heran. Die Oberfläche des Werkzeugs ist verfahrensbedingt rauer als vergleichsweise spanend gefertigte Erzeugnisse und erfordert eine nachfolgende Oberflächenglättung [Fra13], [Geb13].

Einsätze aus nicht gehärtetem Stahl: Werkzeugeinsätze aus nicht gehärtetem Stahl können wie Aluminiumeinsätze mittels Fräsverfahren gefertigt werden. Der Aufwand steigt jedoch mit zunehmender Komplexität und abnehmender Strukturgröße stark an. Die Vorteile von nicht gehärteten Stahleinsätzen liegen in der hohen Präzision, der mechanischen Belastbarkeit und der hohen Oberflächengüte. Die Qualität entspricht dabei der von späteren Serienbauteilen. Jedoch sind damit auch höhere Kosten verbunden. Die Standzeit der ungehärteten Spritzgusseinsätze liegt bei mehreren tausend Stück. Zusätzlich kann durch nachträgliche Oberflächenhärteverfahren, wie beispielsweise Nitrieren, die Standzeit signifikant erhöht werden [Fra13], [GT15-ol].

2.5.2.4 MID-spezifische Verfahren

Aus der Fülle möglicher alternativer Fertigungsverfahren zur Herstellung eines MID-Grundkörpers haben sich die Verfahren Stereolithographie (STL), selektives Lasersintern (SLS), Fused Layer Modelling (FLM/FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Vakuumgießen, Halbzeugfräsen und der Spritzguss mit verschiedenen Prototypen-Werkzeugen als anwendbar herausgestellt. Bild 2-14 gibt einen Überblick über die Stärken und Schwächen dieser geeigneten Verfahren für das MID-Prototyping.

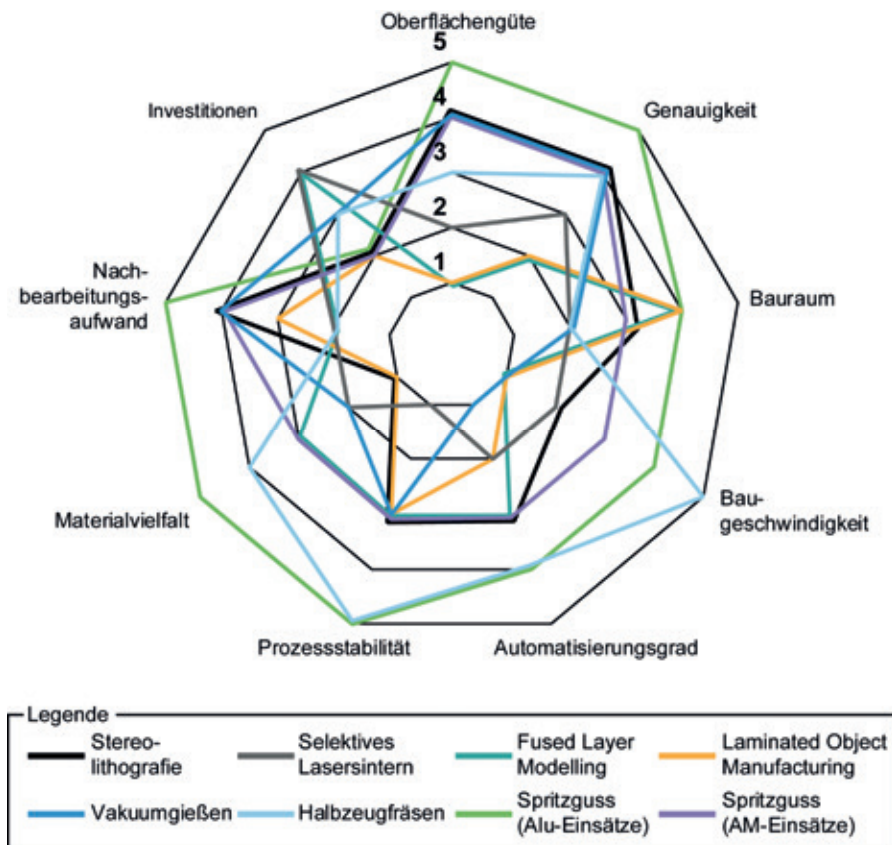


Bild 2-14: Gegenüberstellung typischer MID-Prototyping-Verfahren

Die hervorragende Genauigkeit des Stereolithographie-Verfahrens (STL) ist ein großer Vorteil gegenüber anderen Prototyping-Verfahren [BBW+13], [Fas12]. Die beim selektiven Lasersintern üblicherweise erreichbaren höheren Festigkeiten gegenüber SLA-Bauteilen sind für das Prototyping von untergeordneter Relevanz. Aufgrund der guten Materialeigenschaften und der großen Auswahlmöglichkeit bei Werkstoffen ist beim selektiven Lasersintern vielmehr ein Trend zur Serienproduktion erkennbar [BBW+13], [Geb13]. Die günstige und kompakte Bauart der FLM-/FDM-Maschinen macht das Verfahren vor allem für Kleinunternehmen und Privatanwender interessant. Die schlechte Oberflächenqualität und der daraus resultierende hohe Nachbearbeitungsaufwand für das Prototyping räumlicher Schaltungsträger machen das Verfahren zurzeit noch uninteressant [BBW+13], [Geb13].

Generative Fertigungsverfahren besitzen eine Vielzahl an nutzbaren Potentialen gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren. Das größte Potential ist die hohe Gestaltungs-

freiheit. Diese ist auf die werkzeuglose Fertigung und den flexiblen Einsatz von Werkstoffen zurückzuführen. Aufgrund der werkzeuglosen Fertigung gibt es so gut wie keine geometrischen oder fertigungstechnischen Begrenzungen. Es können komplexe Geometrien realisiert werden, die auf konventionelle Weise, bspw. Spritzguss oder Fräsen, nicht herstellbar sind. Zusätzlich sind durch die Integration von CAD-Bearbeitungsprogrammen Variationen und Personalisierungen zeitnah realisierbar. Allerdings sind die Konstruktionsdaten nicht ohne weiteres austauschbar. Individuelle verfahrensspezifische Konstruktionsanpassungen sind beim Wechsel von einem auf das andere System notwendig. Dennoch bieten generativ erzeugte Grundkörper ein hohes Potential zur Erstellung des Grundkörpers für Prototypen in der frühen Phase der Entwicklung von MIDs. Die verfahrensbedingten spezifischen Restriktionen erhöhen jedoch die Komplexität des Entwicklungsprozesses.

2.5.3 Verfahren zur Strukturierung des Grundkörpers

Die Strukturierung des Grundkörpers ist notwendig, um den mechanischen Prototypen zusätzliche elektronische Funktionen zu geben. Mittels der zusätzlichen Strukturierung werden so mechatronisch integrierte Prototypen erzeugt. Die Strukturierung erfolgt klassischerweise über die in Kapitel 2.3.1 genannten Verfahren. Eine signifikante Einschränkung resultiert jedoch aus der tatsächlichen Wahl des Verfahrens zur Herstellung des Grundkörpers. Durch eingeschränkte Materialien, wie beispielsweise bei den generativen Verfahren, sind die klassischen Prozessketten und -kombinationen nicht ohne weiteres abbildbar. Eine additive Laserdirektstrukturierung setzt beispielsweise einen Kunststoffspritzguss mit einer hohen Spritzwerkzeuggüte, sowie den Einsatz der mit den Additiven gefüllten Thermoplaste voraus. Hieraus ergeben sich Einschränkungen.

2.5.3.1 Laserdirektstrukturierung

Im Rahmen des AiF-Projekt PROMID - Herstellung funktionaler Schaltungsträger mittels Rapid Prototyping für MID-Anwendungen - sind Versuche zur Herstellung additiv erzeugter MIDs getätigt worden. Das Forschungsvorhaben hatte das Ziel, mittels der direkten Rapid Prototyping-Verfahren Selektives Lasersintern (SLS) und Fused Deposition Modeling dreidimensionale MID-Prototypen, ausgestattet mit möglichst seriennahen Bauteileigenschaften und elektrischer Funktionalität, herzustellen. Eine Grundsätzliche Machbarkeit konnte nachgewiesen werden. Jedoch führte die bei beiden Verfahren auftretende Oberflächenrauigkeit auch bedingt durch die verfahrensspezifischen Treppeneffekte zu Fremdmetallisierungen. Aus diesem Grund wurde eine serienreife der Verfahren nicht bescheinigt, sondern der Einsatz von Lacken empfohlen, die die entsprechenden Additive enthalten [SMG+10]. Die Firma LPKF Laser & Electronics AG hat daraufhin einen Lack entwickelt, mit dem beliebige Kunststoffkörper in kurzer Zeit mit einer laseraktivierbaren Beschichtung versehen werden können (ProtoPaint LDS) [Fra13], [Joh10], [Rem12].

Für die Laserstrukturierung wird auf dem Kunststoffkörper eine ca. 30 - 40 µm dicke Lackschicht aufgetragen. Für das Prototyping ist es ausreichend, nur die Bereiche zu lackieren, die tatsächlich mit Leiterbahnen versehen werden. Anschließend wird der Lack bei Temperaturen um 70 °C ausgehärtet. Der Kunststoffkörper muss diesen Temperaturen ohne Verzug standhalten, weshalb bei der Wahl des Kunststoffs auf eine ausreichende Wärmeformbeständigkeit geachtet werden muss. Im Anschluss erfolgt die Laserstrukturierung des Bauteils. Die Strukturierung mittels Laser und die anschließende Metallisierung unterscheiden sich kaum von herkömmlichen LDS-Spritzgießteilen [Fra13], [Got13].

2.5.3.2 Druckverfahren

Die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Druckverfahren haben gemein, dass die Strukturierung und Metallisierung in einem Prozess erfolgen. Weiterhin benötigen die beschriebenen Prozesse keine spritzgegossenen Thermoplaste als Basissubstrat, weswegen sie sich grundsätzlich für die Prototypenfertigung eignen. Grundsätzlich muss aber festgehalten werden, dass sich nicht jedes Druck-Verfahren für jedes Basissubstrat eignet. Die höheren Temperaturen des Plasmadust® von bis zu 150°C beispielsweise, eignen sich nicht für STL-Grundkörper, die in der Regel einen niedrigeren Schmelzpunkt haben. Zum Einsatz kommen daher eher Prozesse wie das Aerosol-Jet-Verfahren®, das bereits auf seine Tauglichkeit für das MID-Prototyping untersucht wurde [APR+10]. Hier gilt es allerdings zu beachten, dass die Oberfläche unter Umständen vorbehandelt werden muss, da beispielsweise Lasersinterteile durch ihre poröse Struktur wie ein Schwamm für die Tinten wirken können [AGF+12], [Got13].

Die selektive Strukturierung der Grundkörper ist ein entscheidender Schritt zur Entwicklung funktionsfähiger Prototypen. Unflexible Verfahren wie das Folienhinterspritzen, das 2K-Spritzgießen oder das Heißprägeverfahren sind hierfür gänzlich ungeeignet. Die beschriebenen flexibleren Verfahrensansätze zeigen aber, dass eine direkte Strukturierung von verschiedenartiger Grundkörper grundsätzlich möglich ist. Die direkte Fertigung räumlicher Schaltungsträger mittels generativer Verfahren ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Zwischenschritte zur Aufbereitung des Grundkörpers sind notwendig, da diese beispielsweise zu raue bzw. nichtaktivierbare Oberflächen besitzen.

2.6 Problemabgrenzung

Räumlich-integrierte mechatronische Systeme, als MID realisiert, bieten hohes Potential für innovative Produktideen. Eine hohe Funktionsdichte auf kleinem Bauraum und eine damit einhergehende Miniaturisierung sind Erfolgsfaktoren für eine Vielzahl mechatronischer Produkte. Um eine erste Idee in ein erfolgreiches Produkt zu überführen, bedarf es einer systematischen Herangehensweise, die den spezifischen Herausforderungen der Technologie MID gerecht wird. MID-Bauteile sind interdisziplinäre Produkte. Durch die Integration von Mechanik und Elektronik müssen verschiedene Bereiche berücksichtigt

werden, die jeweils ihre eigenen Restriktionen besitzen und spezielle Methoden und Werkzeuge bei der Entwicklung benötigen. Eine voneinander getrennte Entwicklung kann zu nicht beachteten Wechselwirkungen führen. Die Wechselwirkungen betreffen nicht nur die unterschiedlichen Teilbereiche, sondern existieren auch zwischen Produkt und Produktionssystem. Die Gestaltung des Schaltungsträgers beeinflusst beispielsweise das MID-Herstellverfahren und umgekehrt. Deswegen ist bei der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger auf eine fachdisziplinübergreifende, integrative Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem zu achten

Die bereits existierenden MID-spezifischen Vorgehensmodelle berücksichtigen dabei in der Regel nur Teilaspekte, die für eine erfolgreiche Umsetzung von MID-Produkten notwendig sind (vgl. Kapitel 3). Es bedarf eines Ansatzes, bei dem die Gesamtheit der Aktivitäten im Produktentstehungsprozess, von der Idee bis zur Fertigung, integriert wird. Ein Lösungsansatz liegt in der integrativen Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem, die mit Hilfe von Prototypen frühzeitig unterstützt wird. Aufgrund der starken Prozessabhängigkeiten, die sowohl die Produkt- als auch die Prototypenfertigung betreffen, sind validierte Aussagen zur Machbarkeit und Umsetzung einer komplexen Produktidee häufig erst zu einem späten Entwicklungszeitpunkt möglich. Für die angestrebte Systematik ergeben sich daher folgende **Herausforderungen**:

1) Abschätzung der Machbarkeit einer Produktidee: Die Machbarkeit einer Produktidee ist insbesondere bei räumlich integrierten Systemen stark von den in Frage kommenden Produktionssystemen abhängig. Um Machbarkeitsanalysen hinsichtlich der potentiellen Produktionssysteme zu tätigen, muss daher eine **systematische Spezifikation** der Produktidee erfolgen. Aufbauend auf den Strukturierungsansätzen für den Produktentstehungsprozess, wie z.B. dem 3-Zyklen-Modell nach GAUSEMEIER, muss diese Spezifikation alle notwendigen Informationen aus Produkt- und Fertigungssicht adressieren. Einen idealen Ansatzpunkt für **frühzeitige Analysen** bietet die Phase der Konzipierung im Rahmen einer integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem [VDI 2206]. Als Resultat der Phase liegt die sog. Prinziplösung vor, welche die Wirkungsweise und den Systemaufbau festlegt [GFD+09] und die Basis für die Konzipierung des Produktionssystems darstellt [Nor12]. In der Phase der Konzipierung treffen somit erstmals Produktidee, Produktspezifikation und Fertigungskonzept aufeinander.

2) Berücksichtigung von Wechselwirkungen im Produktentstehungsprozess: Die zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem sind noch nicht ausreichend untersucht worden. Im Entwicklungsprozess werden häufig **technologiespezifische Leitfäden** zur Konstruktion von Baugruppen eingesetzt. Die Varianz möglicher Herstellprozesse wird damit nicht berücksichtigt, so dass eine frühzeitige Festlegung auf ein unter Umständen nicht optimales Verfahren damit einhergeht. Es bedarf einer Systematik, die den Entwickler verfahrensneutral hin zu einer optimalen Produktlösung führt, dabei jedoch alle entsprechenden Fertigungsverfahren berücksichtigt. Einen geeigneten Ansatz bietet die **funktionsbasierte Entwicklung**. Funktionen beschreiben

lösungsneutral den allgemeinen und gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen [PBF+07]. Erst die Umsetzung der Funktionen mittels Lösungselementen, physikalischer Wirkprinzipien, Funktionselementen und konkreten Produkten schränkt die Machbarkeit hinsichtlich der Produktionsfähigkeit ein.

3) Frühzeitige Eigenschaftsabsicherung im Produktentstehungsprozess: Zur Eigenschaftsabsicherung werden im Produktentstehungsprozess eine Vielzahl unterschiedlicher Muster und Prototypen verwendet [VDI2206]. Der Fokus liegt heutzutage vielfach auf virtuellen Prototypen im Rahmen des Digital Engineerings¹³. In diesem Zusammenhang wird häufig der Begriff virtuelle Produktentwicklung (VPE) verwendet. Unter VPE wird die durchgehende rechnerinterne Modellbildung bei der Produktentwicklung mit der Zielsetzung der Weiterverwendung dieser Modelle für Simulation, Validierung und Verifikation verstanden [EGG+12], [Kra04]. Im Bereich MIDs haben sich virtuelle Muster jedoch noch nicht am Markt durchgesetzt. Dies liegt daran, dass nur wenig etablierte Software-Tools verfügbar sind, die eine integrierte elektronische und mechanische Konstruktion zulassen. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Herstellungsverfahren nur schwer abbildbar. Physikalische Prototypen erlauben hingegen nur bedingt Rückschlüsse auf die finalen Fertigungsparameter der Serienfertigung. Auch ist häufig unklar zu welchem Zeitpunkt Prototypen sinnvoll der Produktentstehungsprozess unterstützen können. Nichtsdestotrotz bieten sie dem Entwickler in vielerlei Hinsicht eine Unterstützung im Produktentstehungsprozess räumlich integrierter Schaltungsträger.

Eine integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, von der Idee bis zum Fertigungskonzept, wird in Zukunft unabdingbar für die Entwicklung räumlicher Schaltungsträger sein. Insbesondere additiv gefertigte Prototypen können diesen Entstehungsprozess unterstützen. Um die Vielzahl an Herausforderungen im Produktentstehungsprozess von MID zu beherrschen, bedarf es einer *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung räumlicher Schaltungsträger*. Dabei werden folgende Handlungsfelder adressiert:

Handlungsfeld 1: Machbarkeitsanalyse

Grundlage jeder Entwicklung ist die Machbarkeit der umzusetzenden Produktidee. Um diesen Entscheidungsprozess zu unterstützen, bedarf es einer frühzeitigen Absicherung der generellen Machbarkeit. Hierzu ist es erforderlich, die notwendigen Kriterien zur Umsetzung eines MID-Produkts zu identifizieren und zu spezifizieren. Hieraus können dann mit einfachen Analysen initiale Prozessketten abgeleitet und so Aussagen zur Machbarkeit bestimmt werden.

¹³ Digital Engineering bezeichnet die durchgängige Nutzung digitaler Methoden und Werkzeuge beim Produktentstehungs- und Produktionsprozess [Sch11].

Handlungsfeld 2: Entwicklung von MIDs

Die starken Abhängigkeiten von Produkt und Produktionssystem sind ein wesentliches Merkmal der Technologie MID und müssen bei der Entwicklung von MIDs im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden. Es bedarf einer grundlegenden Abbildung der Abhängigkeiten, welche Prozesse grundsätzlich kompatibel sind. Des Weiteren muss abgebildet werden, wie sich unterschiedliche Ausprägungen, beispielsweise über die Verwendung unterschiedlicher Lösungselemente zur Erfüllung ein und derselben Funktion, im domänenspezifischen Entwurf auf die potentiellen Produktionsprozesse auswirken.

Handlungsfeld 3: Produktverifikation mit Prototypen

Prototypen sind ein adäquates Mittel zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und frühzeitigen Verifikation der spezifizierten Anforderungen. Die unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung von Prototypen für räumlich integrierte mechatronische Systeme decken dabei unterschiedliche Aspekte der Produktverifikation ab. Es bedarf einer systematischen Strukturierung der Möglichkeiten und Potentiale prototypenbasierter Eigenschaftsabsicherungen für die Technologie MID. Der Fokus bei prototypenspezifischen Verfahren liegt dabei insbesondere auf additiv gefertigten Grundkörpern, im Gegensatz zu den Verfahren zur Herstellung des Produkts.

Handlungsfeld 4: Toolunterstützung des Entwicklungsprozesses

Die komplexen Abhängigkeiten von Produkt und Prozess, die im Rahmen der Entwicklung von MID-Produkten berücksichtigt werden müssen, sind in der Regel nur Experten zugänglich. Das systematische Vorgehen muss sich dabei an bewährten Ansätzen orientieren. Dennoch bedarf es einer toolbasierten Unterstützung, die es auch unerfahrenen Entwicklern ermöglicht, MID-Produkte von der Idee zur Umsetzung zu führen.

2.7 Anforderungen an die Systematik

Aus der Problemanalyse ergeben sich folgende Anforderungen an eine Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung räumlicher Schaltungsträger:

A1) Durchgängigkeit: Der Produktentstehungsprozess räumlicher Schaltungsträger ist durch eine Vielzahl von Abhängigkeiten geprägt. Neben den Wechselwirkungen im fachdisziplinspezifischen Entwurf und der Berücksichtigung entsprechender Produktionssysteme, hat auch die strategische Produktplanung einen erheblichen Einfluss auf das spätere Produkt. Voraussetzung für eine durchgängige Produktspezifikation ist daher eine einheitliche Definition relevanter Parameter (vgl. HF 1, Kap. 2.4.2 und Kap. 2.6).

A2) Ganzheitlichkeit: Die grundsätzliche Machbarkeit einer Produktidee und deren konkrete Ausprägung hängen von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab (Einsatzbereich, Materialien, Funktionen, konstruktive Wirkprinzipien, usw.). Voraussetzung für

eine ganzheitliche Systematik ist daher die Kenntnis über die essenziellen, am Produktentstehungsprozess beteiligten, Faktoren (vgl. HF 1, HF 2, Kap. 2.3, Kap. 2.4.4 und Kap. 2.4.5).

A3) Frühzeitige Analysen: Bei der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger ist es essenziell, frühzeitig die potentielle Machbarkeit zu ermitteln. Voraussetzung für die Systematik ist daher die frühzeitige Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen (vgl. HF 1 und Kap. 2.4).

A4) Berücksichtigung der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem: Der Schlüssel zur erfolgreichen Entwicklung räumlicher Schaltungsträger liegt in dem Wissen über konsistente Produkt- und Produktionssystem-Paarungen. Voraussetzung für die Systematik ist daher eine Abbildung dieser Beziehungen (vgl. HF 2, HF 3, Kap. 2.3 und Kap. 2.5).

A5) Systematische Lösungssuche: Die integrale Bauweise räumlicher Schaltungsträger ermöglicht neuartige Lösungsprinzipien. Voraussetzung für eine optimale Gesamtlösung ist dabei die Berücksichtigung des Wechselspiels von genereller Produkthanforderung, konstruktiver Lösung und verfahrensspezifischer Restriktion (vgl. HF 1, HF 2, HF 3, Kap. 2.3, Kap. 2.4 und Kap. 2.5).

A6) Strategische Planung der Entwicklungsunterstützung mit Prototypen: Prototypen sind ein adäquates Mittel um frühzeitig Eigenschaften abzusichern und Fehler im Produktentstehungsprozess zu vermeiden. Voraussetzung für den Einsatz von Prototypen ist daher ein umfassendes Wissen über die Möglichkeiten und Einschränkungen der verschiedenen Arten von Prototypen im Entwicklungsprozess von MIDs (vgl. HF 3, Kap. 2.4.3 und Kap. 2.5).

A7) Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl der Verfahren: Sowohl für das fertig entwickelte Produkt, als auch für die zur Entwicklung benötigten Prototypen, existieren verschiedene Verfahren, die sich in ihrer Leistungsfähigkeit unterscheiden. Produktmerkmale, insbesondere die Gestalt, und Anforderungsprofile an die Prototypen beeinflussen die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Verfahren. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens muss daher durch die Systematik unterstützt werden (vgl. HF 2, HF 3, Kap. 2.3 und Kap. 2.5).

A8) Verständlichkeit: Die Systematik soll insbesondere in der Technologie MID unerfahrene Entwickler bei der Entstehung von MID-Teilen unterstützen. Das erfordert eine Systematik, die die Komplexität der Problemstellung, einfach und verständlich umsetzt (vgl. HF 4 und Kap. 2.4).

A9) Rechnerunterstützung durch eine Wissensbasis: Aufgrund der Komplexität der Abhängigkeiten in der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger, muss das in der Systematik enthaltene Wissen über Entwicklungstätigkeiten, Methoden, Richtlinien und Wechselwirkungen für den Entwickler einfach abrufbar sein. Die Systematik muss daher

durch eine Wissensbasis unterstützt werden. In dieser soll das Vorgehen und das Wissen strukturiert abgelegt und verarbeitet werden (vgl. HF 4).

A10) Anwendbarkeit auf MIDs: Für viele der aufgezeigten Problemstellungen existieren bereits Lösungsansätze in anderen Bereichen. Die Systematik muss entsprechende Ansätze berücksichtigen und auf die spezifischen Bedürfnisse von MIDs anpassen.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden Systematiken, Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme, insbesondere räumlich integrierter Systeme, untersucht. Des Weiteren werden Ansätze zur Verwendung von Prototypen im Produktentstehungsprozess untersucht. Kapitel 3.1 widmet sich zuerst dem Kern der Arbeit, der Analyse bestehender Methoden zum frühzeitigen Einsatz von Prototypen im Produktentstehungsprozess. Kapitel 3.2 widmet sich der frühzeitigen Abschätzung der Machbarkeit technischer Systeme. Kapitel 3.3 beschreibt Systematiken zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Anschließend folgen in Kapitel 3.4 Methoden zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Aufbauend auf den Anforderungen an die Systematik aus Kapitel 2.7 erfolgt in Kapitel 3.5 ein Abgleich mit dem Stand der Technik. Hieraus wird der Handlungsbedarf abgeleitet.

3.1 Prototypen im Produktentstehungsprozess

Das Prototypen den Produktentwicklungsprozess unterstützen können ist unumstritten [Geb13], [KT14], [VDI3404], [VDI3405]. Die Analyse des Stands der Technik zeigt jedoch, dass kaum Ansätze existieren, die den Einsatz von entwicklungsbegleitenden Prototypen unterstützen. Insbesondere der Auswahlprozess verschiedener Prototypen und prototypenspezifischer Fertigungsverfahren wird nur unzureichend adressiert. Im ersten Schritt werden daher Ansätze vorgestellt, die den entwicklungsbegleitenden Einsatz von Prototypen und Verifikationsmustern strukturieren. Weiterhin werden Klassifikationen, die Prototypen in den Produktentstehungsprozess einordnen, aufgegriffen.

Da derzeit keine durchgängige Systematik existiert, werden in den nachfolgenden Kapiteln 3.2 bis 3.4 entsprechend die relevanten Ansätze für die Bereiche Machbarkeit, Produktentwicklung und integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung diskutiert.

3.1.1 Verifikationsmodelle im multidisz. Design nach KONDOH ET AL.

KONDOH und TEZUKA haben ein Modell aus einer Studie heraus entwickelt, dass aus einem Metamodell und einem Verifikationsmodell besteht und deren Zusammenspiel verdeutlicht [KT14]. Das Metamodell entspricht einer Entwicklungssituation bei einem bestimmten Entwicklungsschritt, der manchmal subjektiv vom Entwickler erfasst wird. Es repräsentiert die Problemgestaltung des Entwicklers, die Strategie zur Erforschung der Lösungen und die relevante Designhypothese. Da jedes Entwicklungsproblem einzigartig ist, sind selten existierende Methoden, Theorien oder Disziplinen direkt anwendbar. So muss sich der Entwickler selektiv auf bestimmte Aspekte (oder Teile) des Problems konzentrieren, um den Lösungsraum zu erforschen. Sobald eine Entwicklungsrichtung festgelegt wurde, sollte alle Auswirkungen mithilfe praktikabler Methoden, physischen Experimenten und Prototypen, mathematischen Berechnungen, Brainstorming-Sessions

zwischen Experten und Umfragen der potentiellen Kunden durchgeführt werden. Unter Verifikationsmodell versteht man dabei jegliche Art von Aktionen, die verwendet werden können, um die Auswirkungen der im vorangegangenen Metamodell festgelegten Entwicklungsrichtung zu verifizieren. KONDOH und TEZUKA sprechen von einem zickzackförmigen Co-Evolutionsprozess, zwischen entwicklungsspezifischen Metamodellen und einer Vielzahl an Verifikationsmodellen (Bild 3-1).

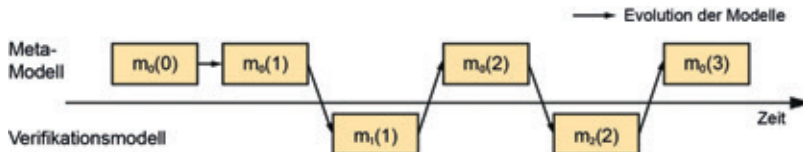


Bild 3-1: Co-Evolution von Metamodellen und Verifikationsmodellen [KT14]

Der generisch aufgebaute Co-Evolutionsprozess entspricht damit einem Entwicklungsprozess, indem jeder Entwicklungsschritt und jede neue Stoßrichtung mithilfe von Absicherungsaktivitäten verifiziert werden sollte.

Resümee

KONDOH und TEZUKA beschreiben mit ihrem Ansatz die Herausforderungen in einem domänenübergreifenden Entwicklungsprozess. Die Notwendigkeit, frühzeitig Modelle und Prototypen einzusetzen wird dabei deutlich herausgestellt. Der co-evolutionäre Ansatz bringt dies zum Ausdruck. Das Modell ist generisch formuliert und lässt sich somit auf die Entwicklung von MIDs übertragen.

3.1.2 Integration von Rapid Prototyping in den PEP nach KRAUSE

KRAUSE entwickelte ein Rapid Prototyping Toolkit, um den Produktentstehungsprozess zu unterstützen [KCS+97]. Er fokussierte dabei das Zusammenspiel von digitalen und physischen Prototypen im gesamten Entwicklungsprozess. Das RP-Toolkit bietet erste funktionale Module zur Reparatur von Oberflächen, zur technologischen Planung verschiedener RP-Verfahren sowie Mechanismen für die Realisierung von STEP-basierten Prozessketten. Ein wesentlicher Aspekt ist die benutzergesteuerte Festlegung und Anpassung der technologischen Parameter, um die Anforderungen an den Prototypen zu erfüllen. Durch die Verwendung von prozessspezifischen Produktstrategien kann die Prototypenqualität darüber hinaus verbessert werden.

KRAUSE verortet den Einsatz für digitale und physische Modelle ab der Gestaltungsphase und beschreibt, wie diese durchgängig genutzt werden können. Die durchgängige Verwendung digitaler Produktmodelle ist dabei die Grundlage für den sinnvollen integrativen Einsatz von Rapid Prototyping, da ohne diese Modelle die entsprechenden Maschinendaten für die Fertigungsmaschinen nicht generiert werden können. Bild 3-2 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen digitalen Modellen und dem Einsatz physischer Prototypen [KCS+97].

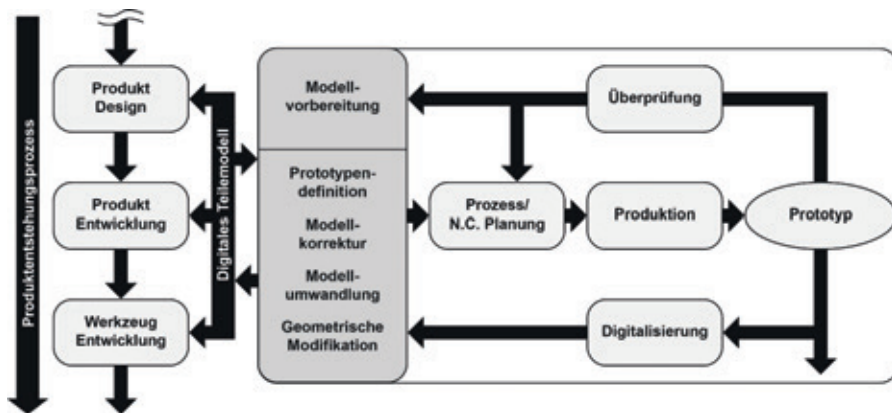


Bild 3-2: Integration von Rapid Prototyping in die Produktentwicklung [KCS+97]

Die weitere Methodik fokussiert das Zusammenspiel von realen Prototypen und der Erzeugung von digitalen Datenmodellen (beispielweise STL-Dateien¹⁴), was im Kontext dieser Arbeit weniger relevant ist.

Resümee

KRAUSE beschreibt in seinem Ansatz das Zusammenspiel von digitalen Daten und realen Rapid Prototyping Modellen. Insbesondere die Tatsache, dass Datenmodelle als Grundlage der frühzeitigen Nutzung von Prototypen erforderlich sind, ist im Kontext dieser Arbeit von hoher Bedeutung. Der beschriebene Ansatz setzt erst in der Phase der Grobgestaltung an. Durch den immer früheren Einsatz von durchgängigen digitalen Modellen verschiebt sich das Zusammenspiel von digitalen und physischen Prototypen zunehmend in Richtung der frühen Phasen. Inwieweit dies auch für räumlich integrierte Schaltungsträger und die dort notwendigen Prototypen gilt, wird im Rahmen des Ansatzes nicht beschrieben.

3.1.3 Klassifikation von Prototypen nach VDI 3404/3405

Bei der Herstellung eines neuen Produkts wird während der Entwicklung eine Vielzahl von unterschiedlichen Prototypen eingesetzt. Diese werden so gefertigt, dass gewünschte Eigenschaften und Funktionen getestet werden können. Eigenschaften, die zu einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess nicht benötigt werden, werden nicht im Prototypen implementiert. Der anfängliche hohe Abstraktionsgrad eines Prototyps wird im Laufe der Entwicklung immer konkreter. Die benötigten Prototypen müssen schnell und einfach her-

¹⁴ Das STL-Format (Standard Tessellation Language) ist eine Standardschnittstelle vieler CAD-Systeme. Das Format stellt geometrische Informationen dreidimensionaler Datenmodelle für die generative Fertigung bereit. Da Stereolithografie das erste Verfahren war, das diese Geometriebeschreibung genutzt hat, findet man häufig auch die ungenaue Übersetzung STereoLithography [Geb13].

stellbar sein, weshalb die Wahl des geeigneten Herstellverfahrens bzgl. des Rapid Prototypings entscheidend ist [Geb13]. Eine erste Klassifikation der Prototypenmodelle liefert die VDI-Richtlinie 3404¹⁵ [VDI3404], welche die folgenden fünf Klassen umfasst:

Konzeptmodell: Das Konzeptmodell bildet frühestmöglich ein dreidimensionales physisches Bild des Produktdesigns/-konzepts ab (Solid Image). Der wichtigste Aspekt ist dabei die Anmutung hinsichtlich des grundsätzlichen Erscheinungsbildes und die Visualisierung der Proportionen. Material, Funktionen, Qualität der Oberfläche oder Details, die nicht für wichtige Proportionen von Bedeutung sind, können häufig vernachlässigt werden. Die Modelle müssen möglichst einfach, schnell und günstig herzustellen sein, um sie in notwendiger Häufigkeit zur Verfügung zu stellen. Eine hohe mechanische Belastbarkeit ist nicht erforderlich. Idealerweise werden generativ erzeugte Bauteile eingesetzt.

Geometrieprototyp: Der Geometrieprototyp überprüft die geometrischen Parameter wie Maß, Form und Lage. Zusätzlich werden die Montierbarkeit, parameterbeeinflussende Details und Proportionen untersucht. Materialeigenschaften, Oberflächenqualität und mechanische Belastbarkeit sind nicht von besonderer Bedeutung. Der Abstraktionsgrad ist hoch. Wesentliche Funktionen sind in der Regel nicht implementiert. Die Reproduzierbarkeit ist für gesicherte Aussagen im Sinne der Qualitätssicherung wichtig.

Funktionsprototyp: Der Funktionsprototyp wird verwendet, um einzelne oder mehrere Funktionen zu testen. Eine Funktion ist in diesem Kontext als physikalische Eigenschaft definiert, die darüber hinaus auch mechanisch-technologische Charakteristiken wie Dehnung oder Belastbarkeit aufweist. Aspekte der äußeren Erscheinung sowie Proportionen oder Details sind nicht relevant, solange sie keine Funktion beeinträchtigen. Materialeigenschaften müssen dem Endprodukt entsprechen, da die mechanische Belastbarkeit möglichst identisch sein soll. Der Funktionsprototyp stellt aufgrund seiner zunehmenden Komplexität einen erhöhten Anspruch an die Herstellverfahren. Wie beim Geometrieprototypen ist die Reproduzierbarkeit enorm wichtig.

Technischer Prototyp: Der technische Prototyp dient der Überprüfung des Bauteils in Versuch und Vorserie. Je nach zu überprüfender Eigenschaft werden unterschiedliche Aspekte in den Vordergrund gestellt. Aus diesem Grund kann es bei technischen Prototypen auch zu Abweichungen vom Serienverfahren kommen.

Produkt: Das Produkt entspricht in sämtlichen Eigenschaften dem späteren Serienprodukt. Die einzige Abweichung kann es hinsichtlich des Herstellverfahrens geben. Im Vorfeld kann es zu Bauteilversuchen kommen, um die Gesamtfunktion zu überprüfen. Das Produkt ist im Sinne der generativen Fertigungstechnik kein Prototyp, sondern dem Direct Manufacturing bzw. dem Rapid Manufacturing zu zuordnen [VDI3404], [Geb13].

¹⁵ Die VDI Richtlinie 3404 wurde im Dezember 2014 zurückgezogen und durch die nachfolgende VDI Richtlinie 3405 ersetzt. Aus dieser Richtlinie wurde die Modelldefinition entfernt und durch eine einfache Abgrenzung zwischen Prototyp und Endprodukt ersetzt, in der zwischen dem Umfang der geforderten Eigenschaften unterschieden wird. Die VDI Richtlinie 3404 soll jedoch als Orientierung für die Definition von Modellklassen dienen [VDI3405].

Resümee

Hinsichtlich des Prototypings für MIDs bietet die VDI Richtlinie 3404 einen initialen Überblick über die unterschiedlichen Arten von Prototypen und die damit erzielbaren Resultate. Allerdings wird die Interdisziplinarität der Technologie MID nicht aufgegriffen und daraus resultierende Wechselwirkungen nicht mit einbezogen. Darüber hinaus gibt es fast keine Verfahrensempfehlungen, so dass die Richtlinie nur als grober Rahmen angesehen werden kann.

3.1.4 MID-spezifische Prototypen-Klassifikationen nach Kück

Die integrative Bauweise räumlicher Schaltungsträger stellt erhöhte Anforderungen an Umfang und Gestaltung von spezifischen Prototypenklassen. Allein die Verifikation der mechanischen und elektronischen Funktionselemente führt zu gänzlich unterschiedlichen domänenspezifischen Prototypenkonzepten. Die klassisch mechanischen Prototypen lassen sich beispielsweise gut mit der VDI 3404 beschreiben. Elektronische Prototypen hingegen werden zu einem viel stärkeren Maß mithilfe virtueller Modelle verifiziert, bevor Prototypen erzeugt werden. KÜCK ET AL. haben zu diesem Zweck eine spezielle MID-Klassifikation erstellt, die die Besonderheiten der Technologie berücksichtigt und vier Modelltypen umfasst.

Anschaungsmuster: Das Anschauungsmuster stellt das einfachste Muster dar. Es gibt die Geometrie des Serienteils wieder, ohne elektrische Funktionen zu beinhalten. Das Leiterbahnlayout kann manuell oder durch Bedrucken erstellt werden. Die Bestückung des Grundkörpers mit Bauelementen wird bspw. mittels Kleben realisiert. Der Grundkörper kann mit einem beliebigen Verfahren hergestellt werden, wobei keine besonderen Anforderungen an den verwendeten Werkstoff gestellt werden. Das Anschauungsmuster beinhaltet keine Funktionen und lässt deswegen keine Rückschlüsse auf mögliche Restriktionen oder Fehler zu. Zusätzlich weichen die elektrischen und mechanischen Eigenschaften stark vom späteren Serienprodukt ab. Trotzdem ist dieses Modell bei vielen Fragestellungen in der Konzeptionsphase des MID-Produkts hilfreich, wie beispielsweise der Visualisierung der Miniaturisierung und Systemintegration, der Verifikation des Leiterbildes und des Zusammenbaus oder der Verifikation der Machbarkeit und der 3D-Bestückung.

Konzeptmodell: Das Konzeptmodell ist eine Weiterentwicklung des Anschauungsmusters, mit dem wichtige Teilfunktionen und Eigenschaften der MID-Baugruppe verifiziert werden können. Hierfür muss nicht zwingend die gesamte Geometrie des Bauteils dargestellt werden. Neben den mechanischen Funktionen können zudem elektronische Funktionen geprüft werden. Für die Funktionalität eines Sensors ist die Position und Ausrichtung entscheidend. KÜCK ET AL. empfehlen hierfür eine Kombination aus einem Rapid-Prototyping-Kunststoffteil und dem LPKF ProtoPaint LDS Lack zur Realisierung der Elektronik (vgl. 2.5.3.1). Je nach Anforderungsprofil können für die Fertigung von Kon-

zeptmodellen vorhandene Spritzgusswerkzeuge oder generative Fertigungsverfahren eingesetzt werden. Auf diese Weise sind Konzeptmodelle bereits frühzeitig und kostengünstig einsetzbar. Das Konzeptmodell hilft bei der Beantwortung von Fragen, wie beispielsweise der Verifikation einer Teilfunktion oder der Materialkompatibilität, der Bewertung der Fertigungstechnologie oder der Einschätzung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

Funktionsmuster: Das Funktionsmuster wiederum soll die gesamte Funktion, Geometrie und Komplexität des Serienbauteils abbilden. Einschränkungen, z.B. beim Fertigungsprozess, der mechanischen Festigkeit oder den Betriebsbedingungen, werden in Kauf genommen, so dass beliebige Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen können. Im Gegensatz zum Konzeptmodell empfehlen KÜCK ET AL den Einsatz des Originalwerkstoffs, der beispielsweise mit Rapid Tooling-Verfahren oder spanender Halbzeug-Bearbeitung in Form gebracht werden kann. Besonders die vollständige Darstellung der Funktionalität unterscheidet das Funktionsmuster von den vorangegangenen Mustern. Es dient damit der Freigabe zur Entwicklung der MID-Baugruppe.

Prototyp: Der Prototyp ist nach KÜCK ET AL. das finale Serienmuster zur Freigabe der (Vor-)Serie. Zusätzlich kann die Validierung des Produkts beim Anwender erfolgen. Das Serienmuster muss aus diesem Grund mit dem Serienbauteil möglichst identisch sein und darf sich in keinem wesentlichen Merkmal unterscheiden. Der Grundkörper muss zwingend aus dem Originalwerkstoff mittels Spritzguss hergestellt werden. Das Spritzgusswerkzeug wird dabei, um Kosten zu sparen, mit nur einer Kavität ausgeführt und im Zuge des Serienanlaufs um weitere Kavitäten erweitert. Weitere Prozessschritte wie Strukturierung, Metallbeschichtung, Bestückung und Verbindungstechnik sind qualitativ mit dem Serienbauteil identisch. Serienmuster sind daher mit dem größten Zeitaufwand und den höchsten Kosten verbunden. Sie liefern dafür eindeutige, aussagekräftige Ergebnisse über die Qualität und die Zuverlässigkeit des Serienbauteils [Fra13].

Ausgehend von dieser Modelldefinition lassen sich den einzelnen MID-Modellklassen bereits mögliche Fertigungsverfahren für den Grundkörper zuordnen (Tabelle 3-1). Diese Zuordnung berücksichtigt die klassenspezifischen Anforderungen an Umfang, Geometrie, Gestaltung und Funktionalität [Fra13].

Tabelle 3-1: Zuordnung möglicher Fertigungsverfahren zu den Modellklassen nach KÜCK ET AL. in Anlehnung an [Fra13]

Prozess Muster	Stereo- lithographie	Selektives Lasersintern	Fused Deposition Modelling	Halbzeug- Fräsen	Spritzguss mit Einsatz	Spritzguss (Aus Serien- produktion)
Anschauungsmuster	×	×	×			
Konzeptmodell	×	×	×	×		
Funktionsmodell	×	×	×	×	×	
Serienmuster					×	×

Resümee

Die Modelldefinition nach KÜCK ET AL. liefert eine gute Beschreibung des MID-Prototypings. Erste Verfahren sind bereits unterschiedlichen Klassen zugeordnet worden. Der Anwender erhält einen guten Überblick über die unterschiedlichen Muster und Prototypen. Allerdings wird nicht klar, an welcher Stelle im Produktentstehungsprozess die jeweiligen Typen eingesetzt werden sollen und wie sie den Entwicklungsprozess unterstützen. Auch geht die Klassifikation nicht auf Standards (z.B. IPC-Richtlinien) und branchenspezifische Besonderheiten ein (z.B. Hochtemperatur-Muster in der Automobilindustrie), so dass beispielsweise eine Zuordnung von Test- und Prüfrichtlinien nur schwer möglich ist.

Neben den beiden beschriebenen Klassifikationen gibt es weitere, zum Teil unternehmensspezifische Klassifikationen, die im Kontext dieser Arbeit jedoch keine weiteren Erkenntnisse liefern. Der Vollständigkeit halber sei jedoch noch auf die Modelldefinition des Verbands Deutscher Industrie Designer (VDID) [Geb13] und die Klassifikation von Harting Mitronics [GT15-ol] verwiesen.

3.2 Frühzeitige Abschätzung der Machbarkeit

Hinsichtlich der Machbarkeit eines technischen Systems werden zwei Aspekte unterschieden. Auf der einen Seite ist die technische Realisierbarkeit einer Produktidee bzw. eines Produktkonzepts von vordringlichem Interesse. Auf der anderen Seite wird, nach der Beurteilung der technischen Realisierbarkeit, die Wirtschaftlichkeit der Produktentwicklung bzw. des Produktkonzepts untersucht. In der Praxis werden diese Begriffe häufig synonym verwendet, bzw. als Kombination der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit verstanden. Die rein wirtschaftliche Bewertung steht dabei immer im Verhältnis zu zuvor definierten Anforderungen (Kosten/Nutzen, Kosten/erzielbarer Preis usw.). Von besonderem Interesse im Kontext dieser Arbeit sind dabei die Herstellkosten der technischen Lösung, die im Verhältnis mit den definierten Anforderungen eine maßgebliche Aussage über eine sinnvolle Realisierbarkeit des Produktkonzepts ermöglichen.

3.2.1 Technologieentwicklungsprozess nach SCHUH

Die Technologieentwicklung hat das Ziel, die Vorgaben aus der Technologieplanung effizient umzusetzen. Dies bedeutet, dass die Anforderungen an die Entwicklung neuer Produkte oder an Verbesserungen bereits im Unternehmen mit existierenden Technologien und den existenten Ressourcen zu realisieren sind. Dafür ist ein stringenter Technologieentwicklungsprozess erforderlich, der bereits im Ideenstadium einer Technologie eingesetzt werden kann (Bild 3-3).

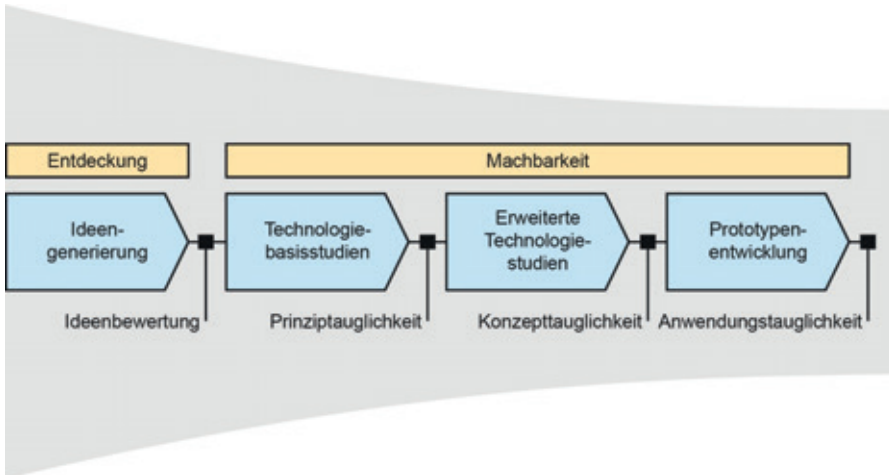


Bild 3-3: Technologieentwicklungsprozess nach SCHUH [SK11]

SCHUH unterteilt die Machbarkeitsanalyse in drei Phasen:

- Eine **Technologiebasisstudie** dient dem systematischen Sammeln von Informationen, um eine Idee hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit, ihres Potentials und des erforderlichen Aufwands bewertbar zu machen. Basisstudien verfolgen damit das Ziel, die notwendigen Informationsbedarfe in der zuvor festgelegten Detaillierung zur Verfügung zu stellen. Aus diesen Informationen können dann die Technologieentwicklungsprojekte geplant und gegeneinander bewertet werden [SK11]. Inhalte der Basisstudie sind die Recherche in technischer Literatur und wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die Suche nach Patenten, die Identifikation von alternativen Technologien und die Bewertung der benötigten und vorhandenen Ressourcen. Die Basisstudie als erster Schritt der Technologieentwicklung beleuchtet also die technologischen Rahmenbedingungen üblicherweise zunächst theoretisch, ohne tatsächlich Versuche unter Laborbedingungen durchzuführen. Deshalb bleibt der Aufwand dieser Phase noch gering und die Dauer liegt bei wenigen Wochen. Ein Produktbezug kann und sollte möglichst bereits in dieser frü-

hen Phase hergestellt werden. Insbesondere ist festzustellen, welche Schlüsselfähigkeiten der neuen Technologie in der Entwicklung erzielt werden müssen um leistungsfähige neue Produkteigenschaften zu ermöglichen [CEK02].

- Bei einer grundsätzlichen Tauglichkeit eines Prinzips für den vorgesehenen Einsatzbereich, wird eine **erweiterte Technologiestudie** eingeleitet. Diese führt die als Ergebnis der Basisstudie ausgewählten und geplanten Technologieprojekte zu einem konkreten Ergebnis, indem tatsächliche Lösungen erarbeitet und die Machbarkeit für den spezifischen Anwendungsfall (sog. „Laborreife“) nachgewiesen werden. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen muss wiederum eine Entscheidung bezüglich der Fortsetzung des entsprechenden Projektes getroffen werden. Neben der Prüfung der technischen Machbarkeit gehören zu der erweiterten Technologiestudie auch wirtschaftliche Analysen und Ermittlungen hinsichtlich sowohl technischer, als auch wirtschaftlicher Chancen und Risiken.
- In der darauf aufbauenden **Prototypenentwicklung** wird ein erster Prototyp (also ein erstes Versuchsmodell) aufgebaut, das oft eine vereinfachte Version des geplanten Endobjektes darstellt und einem spezifischen Zweck dient. Der Prototyp dient der Vorbereitung der Produkt- bzw. Prozessentwicklung auf dem Weg zur Serienproduktion und wird ohne Nutzung der rationellen Fertigungsmöglichkeiten der Massenproduktion erstellt. Die Prototypenentwicklung stellt somit die Schnittstelle zwischen Technologieentwicklung und Produkt- und Prozessentwicklung dar. Sie trägt dafür Sorge, dass die Ergebnisse der erweiterten Technologiestudie in Form eines Musters, Prototyps oder Prozesses den Produktprogrammen zugeführt werden. Damit legt sie die Grundlage für die Tätigkeit der Produktentwickler und Produktdesigner und stellt die dafür notwendigen Informationen zusammen. Die Prototypenentwicklung unterscheidet sich von den vorhergehenden Phasen dahingehend, dass sie konkrete Vorgaben und Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls berücksichtigen muss, während vorher hauptsächlich die technische Machbarkeit nachgewiesen wurde.

Die Prototypenentwicklung kann, abhängig von Industrie und Technologiebereich, äußerst unterschiedliche Facetten annehmen. Ziel dieser Phase ist der Nachweis der Anwendungstauglichkeit und die Untersuchung der Bandbreite der Technologie und deren Nutzen für das Unternehmen. Teil dieser Untersuchungen sind neben experimentellen Arbeiten, Analyse und Auswertung von Ergebnissen beispielsweise auch Umweltuntersuchungen, weiterführende Analysen von Konkurrenztechnologien und Technologieschutzstrategien. Ein zentrales Ergebnis muss die genaue technische Definition von resultierenden Produkten oder Prozessen darstellen, die sich insbesondere auch auf die Fertigungsmöglichkeiten ausdehnen müssen [CEK02].

Resümee

Der Technologieentwicklungsprozess nach SCHUH beinhaltet die Phasen Technologiebasisstudie, erweiterte Technologiestudie und Prototypenentwicklung. Die Technologieentwicklung im weiteren Sinne beinhaltet dabei die Arbeiten der angewandten Forschung, der Vorentwicklung, der Technologieentwicklung im engeren Sinne sowie die frühen Arbeiten von Entwicklungsdienstleistern. Maßgebliches Ziel eines methodischen Technologieentwicklungsprozesses ist dabei die Sicherstellung der Anwendungstauglichkeit von in Produkten und deren Herstellung eingesetzten Technologien. Insbesondere dem frühzeitigen Einsatz von Prototypen kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

3.2.2 Integrations- und Umsetzungsstrategien nach GOTH

Nach GOTH ergeben sich durch die Komplexität der Prozesskette, den hohen Grad an Interdisziplinarität sowie die Abhängigkeit zwischen Produktfunktionen und Produktionsprozess Besonderheiten bezüglich der Produktentwicklung bei MID. Als Voraussetzung für eine funktionsorientierte und fertigungsoptimale Konzeption in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht sieht er ein umfassendes Prozessverständnis an. Das Wissen über eine fertigungstechnische Realisierbarkeit bildet damit, neben der Erfüllung der technischen Anforderungen, eine essenzielle Grundlage für die Umsetzung erfolgreicher MID-Projekte. Bild 3-4 erläutert die komplexen Herausforderungen einer fertigungsgerechten und funktionsorientierten Produktkonzeption [Got13].

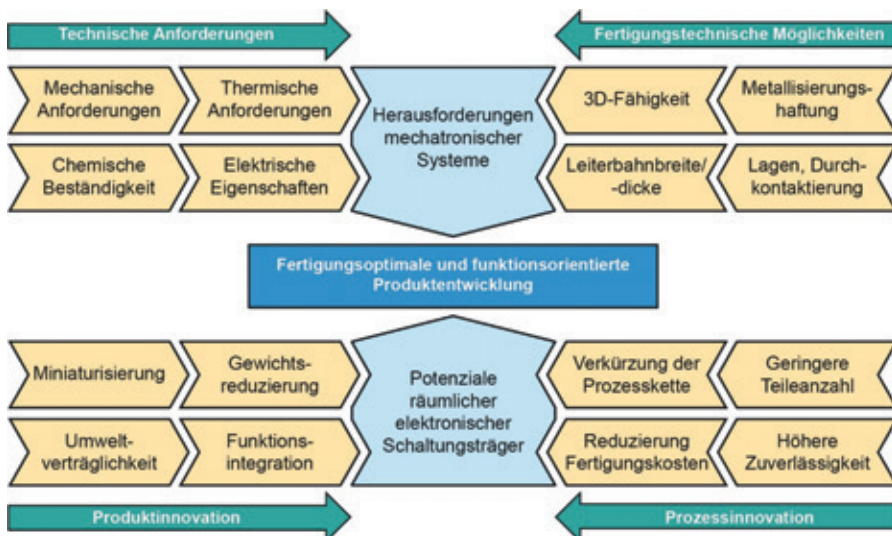


Bild 3-4: Herausforderungen einer fertigungsgerechten und funktionsorientierten Produktkonzeption nach GOTH [Got13]

Neben der Beherrschung der Technologiekomplexität ist gleichzeitig die Identifikation erfolgsversprechender Produktideen essenziell. Trotz der zahlreichen Vorteile der Technologie MID und erfolgreicher Serienanwendungen ist der Einstieg für Unternehmen in die Technologie als Anwender oder Hersteller sowie die Umsetzung neuer Produktideen nach wie vor ein schwieriger Prozess. In der unternehmerischen Praxis besteht oft ein negativer Zusammenhang zwischen dem aktuell erreichten wirtschaftlichen Erfolgsniveau und der Bereitschaft zur Nutzung neuer, risikobehafteter Technologien. Häufig wird demnach erst in Phasen wirtschaftlicher Schwierigkeiten, wenn die erforderlichen finanziellen Ressourcen begrenzt sind, der Versuch unternommen die eigene Marktposition durch technologische Neuerungen zu verbessern. In Anlehnung an SPECHT ET AL. [SBA02] und MEIER [Mei02] wird ein Technologie- und Innovationsmanagementprozess skizziert, der auf die Besonderheiten räumlicher Schaltungsträger eingeht (Bild 3-5). Dabei stehen die Bereiche unternehmensexterne Technologieentwicklungen und unternehmensinterne Technologiekompetenzen im Fokus.

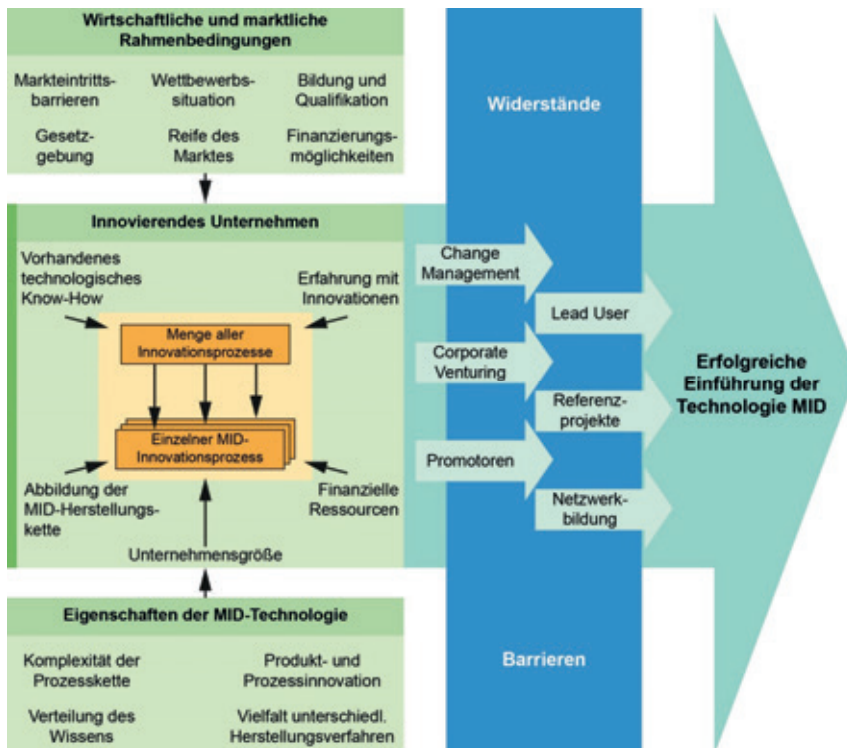


Bild 3-5: Einflussfaktoren und Strategien für den MID-Innovationsprozess [Got13]

Unternehmensexterne Technologieentwicklungen

Im Bereich der unternehmensexternen Technologieentwicklungen stehen klassische Markt- und Wettbewerbsanalysen im Fokus. Ziel ist es, frühzeitig vielversprechende

Technologietrends zu erkennen und auf ihre Eignung für das eigene Produktportfolio zu bewerten. Speziell in der Technologie MID ist ein ausgeprägter Technology Push vorhanden, so dass für unterschiedliche Anforderungen differenzierte Lösungsmöglichkeiten und Prozesse zur Verfügung stehen. Auf Seiten des Market Pull gibt es derzeit noch begrenzte Aussagen, da die Zahl an Referenzprodukten bisher begrenzt ist. Der steigende Bedarf nach innovativen Miniaturisierungslösungen wird in den nächsten Jahren jedoch für eine Verbesserung des Nachfragepotentials sorgen.

Unternehmensinterne Technologiekompetenzen

Im Bereich der unternehmensinternen Technologiekompetenzen steht die Bestimmung der Kernkompetenzen des Unternehmens im Fokus. Ziel ist es, die relative Bewertung der technologischen Innovationsleistung des Unternehmens zu bewerten. Die Kernkompetenzen bilden sich dabei aus den vorhandenen Ressourcen sowie den Fähigkeiten, diese gewinnbringend einzusetzen. Da Neuentwicklungen in der Regel auf vorhandenen Kompetenzen des Unternehmens aufbauen, hängt der erfolgreiche Einstieg in die MID-Technologie maßgeblich von der Auswahl der richtigen Technologiebereiche ab. Entscheidend ist, dass es sich nicht für jedes Unternehmen anbietet, sich zu einem MID-Komplettanbieter hinzuentwickeln. Vielmehr sollten eher maschinenbaulich orientierte Unternehmen primär unbestückte MIDs entwickeln und produzieren, wohingegen Hersteller klassischer elektronischer Baugruppen sich auf die 3D-Bestückung konzentrieren sollten und die Grundkörper beispielsweise über externe Dienstleister beziehen.

Mit einem klassischen Markt- und Technologieportfolio zur Integration der Umwelt- und Unternehmensanalyse schließt GOTH anschließend die Lücke zur Integration der beiden voran genannten Bereiche. Aufbauend darauf schlägt er verschiedene strategische Instrumente zur Überwindung der Barrieren hinsichtlich der Technologie MID vor, wie beispielsweise Joint Ventures oder Referenzprojekte durch Lead Users [Got13].

Resümee

Neben dem klassischen Technologie- und Innovationsmanagementprozess, wie er beispielsweise von SCHUH propagiert wird, bietet GOTH eine wichtige Erweiterung hinsichtlich der MID-spezifischen Komplexität der Prozesskette. Die Identifikation der idealen unternehmensspezifischen Technologien und daraus resultierenden Prozesskette ist ein entscheidender Faktor für eine erfolgreiche Umsetzung von MID-Projekten. Die identifizierten allgemeinen Einflussfaktoren und Strategien für den MID-Innovationsprozess bieten darüber hinaus ein gutes Hilfsmittel für einen Strategieprozess. Hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit wird das frühzeitige Prototyping ebenfalls als wichtiger Faktor für die Machbarkeit angesehen. Es werden jedoch kaum Handlungsempfehlungen gegeben, die den Entwickler beispielsweise bei der Verfahrensauswahl unterstützen.

3.2.3 Wirtschaftlichkeitsanalysen zur Abschätzung der Machbarkeit

Häufig werden wirtschaftliche Analysen herangezogen um die Umsetzbarkeit einer Produktidee zu ermitteln. Dabei gibt es in der Regel zwei Stoßrichtungen. Auf der einen Seite erhofft man sich bei einem Technologiewechsel einen Mehrwert, auf der anderen Seite stehen reglementierende maximale Produktentstehungskosten im Vordergrund. Die beiden gängigsten Ansätze werden im Folgenden vorgestellt. Anschließend wird ein erweiterter MID-spezifischer Ansatz von FRANKE diskutiert.

Kosten-Nutzen-Analysen (Cost-Benefit Analysis)

Unter Kosten-Nutzen-Analysen versteht man eine Vielzahl ähnlicher Vorgehensmodelle, die Entscheidungen anhand ihrer Konsequenzen aus Sicht des analysierenden Planers bewerten. Die Methoden werden häufig bei der Bewertung von Investitionsprojekten im öffentlichen Sektor eingesetzt. Mit Hilfe der Methoden wird in der Regel die Vorteilhaftigkeit, also der Nutzen einer Entscheidung bewertet. Bei der klassischen Kosten-Nutzen-Analyse (Cost-Benefit Analysis, CBA) werden Kosten und Nutzen für unterschiedliche Varianten gemessen oder bestimmt. Die Variante mit dem höchsten Gesamtergebnis oder der besten Rentabilität wird ausgewählt. Als vorteilhaft gilt diejenige Alternative mit dem höchsten Nettonutzen. Er wird aus der Differenz von Nutzen und Kosten gebildet. Im Vorfeld wird deshalb versucht nicht monetäre Größen (z.B. Zuverlässigkeit) in monetäre Größen umzuwandeln (z.B. Kosten durch Rückrufaktionen). Das Vorgehen lässt sich dabei in 3 Phasen unterteilen (Bild 3-6).

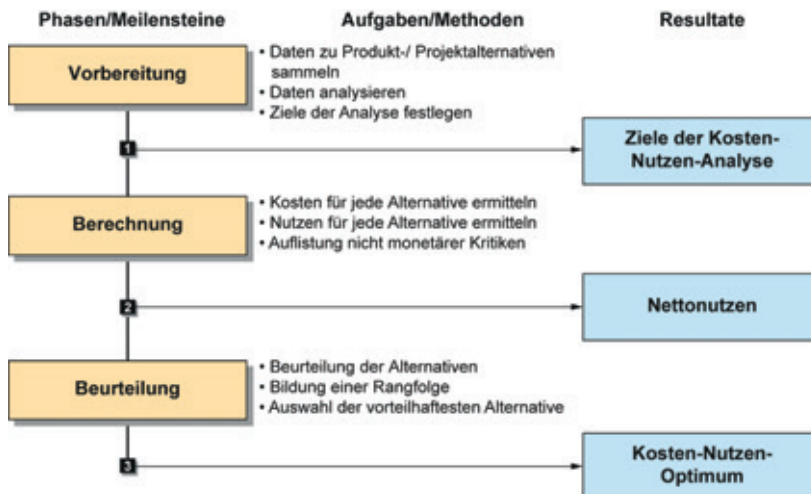


Bild 3-6: Phasen der Kosten-Nutzen-Analyse

Trotz unterschiedlicher Zielausprägungen, sind die Grundphasen jedoch ähnlich:

- In der ersten Phase, der **Vorbereitungsphase**, werden die notwendigen Daten zu den Alternativen gesammelt und analysiert. Darüber hinaus erfolgt in dieser Phase die Zielformulierung.
- In der anschließenden **Berechnungsphase** werden Kosten und Nutzen für jede Alternative ermittelt. Hierzu werden häufig klassische Methoden der Investitionsrechnung herangezogen, wie beispielsweise die Kapitalwertmethode. Ergebnis der zweiten Phase ist dann der sog. Nettonutzen. Zusätzlich sind in dieser Phase die Kriterien aufzuführen, die sich nicht monetär bewerten lassen.
- In der abschließenden dritten Phase, der **Beurteilungsphase**, werden die Alternativen bewertet und in eine Rangfolge überführt. Diejenige, die den gestellten Anforderungen am ehesten entspricht wird dann ausgewählt.

Insbesondere im öffentlichen Sektor haben sich eine Reihe Varianten gebildet, die zum Teil stärker einen minimalen Kosteneinsatz fokussieren (Cost-Minimization Studies, CM oder Cost-Effectiveness Studies, CEA) [SK11].

Zielkostenrechnung (Target Costing)

Die Zielkostenrechnung (Target-Costing) ist weniger ein Instrument des Controllings, sondern vielmehr eine gesamtheitliche Managementmethode zur strategischen Entscheidungshilfe. Die Zielkostenrechnung hat ihren Ursprung in der japanischen Wirtschaft und wurde im Jahr 1965 vom Automobilhersteller Toyota entwickelt. Anfang der 90er Jahre gelangte die Methode über die USA nach Deutschland [Sei93]. Die Zielkostenrechnung fokussiert dabei die Fragestellung, was ein Produkt maximal für Kosten erzeugen darf, um es am Markt absetzen zu können. Ausgangspunkt bildet dabei die Annahme, dass es für jeden (Käufer-)Markt einen erzielbaren Preis gibt. Die Zielkostenrechnung kommt in den frühen Phasen der Produktentwicklung zum Einsatz, da hier frühzeitig die Kostenstrukturen im Hinblick auf die Markt- und Kundenanforderungen definiert und fixiert werden müssen¹⁶. Die Zielkostenrechnung stellt ein Hilfsmittel dar, um die Bedürfnisse des Marktes in allen Phasen der Produktentstehung zu berücksichtigen. Es entsteht eine Entscheidungskette über alle Phasen der Produktentstehung hinweg, fokussiert auf die Kosten [Hor93]. Die Zielkosten werden anhand eines Schema ermittelt (Bild 3-7).

¹⁶ Vergleiche Methoden des Simultaneous Engineering in den frühen Phasen der Produktherstellung [Ehr09].

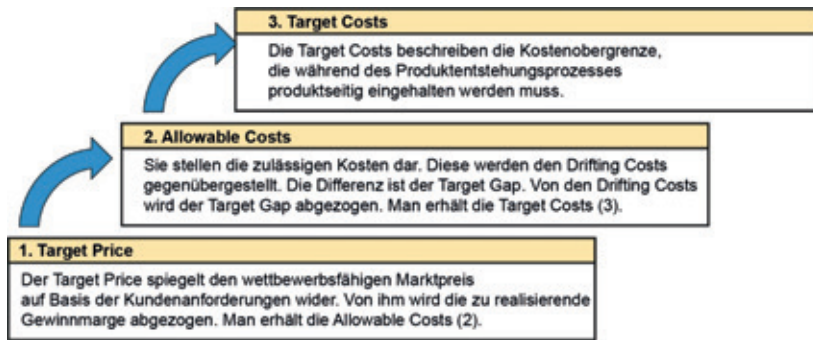


Bild 3-7: Vorgehen zur Ermittlung der Target Costs [GWR09]

Im ersten Schritt wird der Zielpreis (Target Price) ermittelt. Dieser spiegelt den wettbewerbsfähigen Marktpreis auf Basis der Kundenanforderungen wieder. Von diesem wird die angestrebte Gewinnmarge (Target Profit) abgezogen. Das Ergebnis bilden die zulässigen Kosten (Allowable Costs). Die zulässigen Kosten stellen die maximalen Kosten dar, die für das Produkt auftreten dürfen. Diese weichen oftmals von den zu erwartenden Standardkosten (Drifting Costs) ab, die in der Regel auf Basis von Know-how und Erfahrungswissen des Unternehmens ermittelt werden. Die Differenz der beiden Größen (Target Gap) beziffert den Kostenreduktionsbedarf. Unter Berücksichtigung von externen und internen Einflussfaktoren werden die Zielkosten (Target Costs) festgelegt. Sie stellen im Produktentstehungsprozess die Kostenobergrenze dar, die produktseitig eingehalten werden muss.

Resümee

Die Kosten-Nutzen-Analysen betrachten sowohl die Kosten als auch den Nutzen von alternativen Lösungen. Die Methoden legen den Fokus auf Entscheidungsprobleme der Investitionsrechnung, ohne direkt Analysemethoden zur technologieorientierten Realisierbarkeit von Projekten zur Verfügung zu stellen. Die Zielkostenrechnung geht von einem produktspezifischen individuellen Marktpreis aus, der zu Beginn der Produktentwicklung ermittelt wird. Auf Basis des Marktpreises und einer erhofften Gewinnmarge werden frühzeitig Kostenobergrenzen für die Produktentwicklung festgelegt. Diese können bis auf Funktionsebene des Produkts runtergebrochen werden, so das maximale Kosten für Produktfunktionen festgelegt werden können. Die Zielkostenrechnung bildet eine gute Ergänzung zur Kosten-Nutzen-Analyse, geht jedoch ebenfalls nicht auf technologische Aspekte der Realisierbarkeit einer Produktidee ein. Vielmehr sorgt die strenge Anwendung der Methode bei neueren innovativen Technologien eher dafür, auf konventionelle bekannte Technologien zu setzen, da diese geringere Unsicherheiten in der betriebswirtschaftlichen Kalkulation aufweisen (vgl. [Got13]).

3.2.4 Prozessübergangskosten nach Franke

Das von FRANKE entwickelte Bewertungsverfahren hat im Kern eine Methode zur Bewertung der Prozessübergangskosten [Fra95]. Dabei wird ermittelt, wann ein Übergang von konventionellen Technologien zu MID wirtschaftlich sinnvoll ist. Hierbei werden die elementaren Kosten für die Fertigungsprozesse der konventionellen und der neuen Fertigungstechnologie ermittelt und anschließend für jeden Prozessschritt gegenübergestellt. Die Summenbildung der Prozessübergangskosten über jeden Prozessschritt gibt Aufschluss über positive oder negative Kostenveränderungen zwischen der konventionellen und der neuen Fertigungstechnologie. FRANKE erarbeitet Kostenstrukturen für MID-Herstellverfahren, um den Bezug zu den Fertigungstechnologien herzustellen. Die strategische Entscheidung steht dabei im Vordergrund. Die Bewertung erfolgt zunächst über Wirkungsketten, die dazu dienen, die grundsätzlichen Technologiemerkmale den entsprechenden Fertigungsprozessen zuzuordnen. Darauf aufbauend werden dann die Prozessübergangskosten bestimmt. Auf diese Weise wird ein Vergleich von neuer Technologie und etablierten Verfahren möglich.

Die wesentlichen Eigenschaften und Merkmale zur Bewertung der Technologie MID gliedern sich in vier Bereiche: Strategische Attraktivität, Funktionsintegration, Kosten-/Nutzenveränderung aufgrund neuer Fertigungsprozesse und Kosten-/Nutzenveränderungen durch attraktivere Produkte. Für die Kalkulation der Herstellkosten hat FRANKE das (Vor-)Kalkulationssystem MIDIS-C¹⁷ entwickelt. Es ermöglicht eine Kostenabschätzung von MID-Produkten bereits in einer frühen Phase mit Hilfe von quantifizierten Kalkulationsformeln. Diese betrachten Material-, Fertigungs- und Sondereinzelkosten. Aufsummiert bilden sie die Herstellkosten [Fra95].

Resümee

Die Prozessübergangskosten und das dazugehörige Kalkulationssystem MIDIS-C ermöglichen eine frühzeitige Kalkulation der Kosten für ausgewählte MID-Verfahren. Die Methode der Prozessübergangskosten erlaubt eine detaillierte Betrachtung der Fertigungskosten des MID-Bauteils. Da die Methodik jedoch nur einen Ausschnitt der Prozesskette abbildet und nur ähnliche Fertigungsprozesse gegenübergestellt, sind weitere Ansätze erforderlich. Insbesondere im Hinblick auf die Machbarkeitsbewertung werden rein monetäre Faktoren berücksichtigt.

3.3 Entwicklung mechatronischer Systeme

Zur Entwicklung mechatronischer Systeme existiert eine ganze Reihe von Vorgehen und Systematiken, von denen die für diese Arbeit bedeutsamen Ansätze im Folgenden untersucht werden.

¹⁷ MIDIS-C: Molded Interconnect Devices Information Service-Calculation

Beim Einsatz generativer Verfahren für die Herstellung von Prototypen, bei denen die Wahl des idealen Verfahrens extrem von Bauteilgeometrie und Anforderungen an das Bauteil abhängt, müssen Entwickler häufig auf bewährte Ansätze aus der Entwicklungsmethodik der klassischen Produktionsverfahren zurückgreifen, wie sie in diesem Kapitel beschrieben werden. Diese werden den Besonderheiten der generativen Verfahren jedoch häufig nicht gerecht. Im Gegensatz zu klassischen Verfahren lassen sich mit den gängigen generativen Verfahren fast alle Arten von Strukturen und Bauteilgeometrien herstellen (Wandstärken an dieser Stelle einmal ausgenommen). Aus diesem Grund wird zum Abschluss noch der Ansatz zur Produktentwicklung generativ erzeugter Produkte nach BREUNINGER vorgestellt, der allerdings nicht zu den Entwicklungsmethoden für mechatronische Systeme zählt.

3.3.1 VDI-Richtlinie 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 – Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte und Systeme beschreibt ein allgemeines Vorgehen zur Entwicklung technischer Produkte. Um den Entwickler hierbei zu unterstützen, enthält die Richtlinie ein systematisches Vorgehensmodell, das die Problematik auf einen allgemeinen Problemlösungsprozess überträgt. Dieser Prozess gliedert sich in insgesamt sieben Phasen (Bild 3-8).

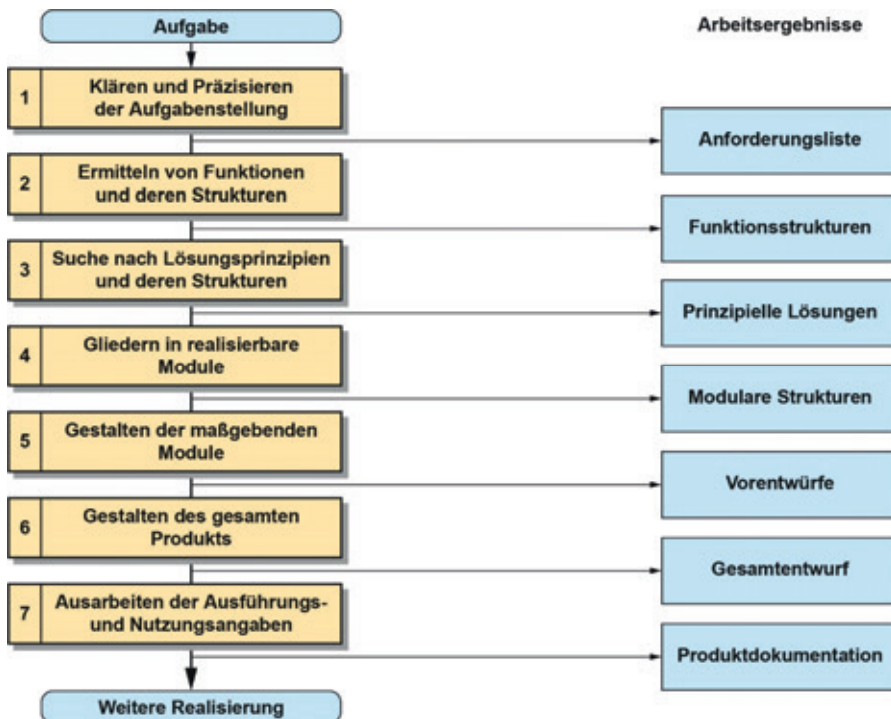


Bild 3-8: Vorgehensmodell zum Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221

Für die erste Phase *Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung* ist der Ausgangspunkt eine zuvor formulierte Aufgabe. Als Ergebnis entsteht die Anforderungsliste. Diese wird über den gesamten Entwicklungsablauf auf dem aktuellen Stand gehalten. In der zweiten Phase erfolgt die Ermittlung von Funktionsstrukturen. Für die ermittelten Funktionen werden in der dritten Phase Lösungsprinzipien und deren Strukturen gesucht. Als Ergebnis liegt die Prinziplösung vor. Diese wird in der nächsten Phase in realisierbare Module gegliedert. Dabei werden die Hauptfunktionen in Teilfunktionen zerlegt und für die unterste Ebene nach Lösungsprinzipien bzw. Wirkprinzipien gesucht. Diese werden grob gestaltet, um Vorentwürfe für die fünfte Phase zu erhalten. In der sechsten Phase werden die Vorentwürfe durch Details verfeinert bis ein Gesamtentwurf vorliegt. Den Abschluss des Gesamtprozesses bildet die Produktdokumentation, in der maßstabsgerechte Zeichnungen und Stücklisten angefertigt werden [VDI2221]. Das bereits eingeführte Bild 2-10 verdeutlicht die Zuordnung der unterschiedlichen Phasen der Produktentstehung mit den Phasen des Rapid Prototyping und des Rapid Manufacturing [Geb13].

Resümee

Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt ein allgemeines, stark vom Maschinenbau geprägtes, Vorgehen zur Entwicklung technischer Produkte. Sie ist prinzipiell domänenübergreifend einsetzbar. Das Vorgehen wird durch umfangreiche Beispiele detailliert beschrieben. Die VDI-Richtlinie 2221 empfiehlt den Einsatz von Methoden und rechnerbasierten Werkzeugen wie Produktmodellen sowie Daten und Wissensbasen. Auf Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem, wie bei MIDs üblich, wird nicht eingegangen. Nach GEBHARDT sind in den frühen Phasen nur einfache Prototypen vorgesehen [Geb13].

3.3.2 VDI-Richtlinie 2206

Wie bereits in Kapitel 2.4.3 erläutert, existiert mit der VDI 2206 ein domänenübergreifender Leitfaden für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Bei komplexen mechatronischen Systemen wird ein iteratives Vorgehen vorgeschlagen, um von ersten Laborumustern bei steigenden Reifegraden hin zu finalen Produkten zu gelangen. Ein entscheidender Faktor ist, dass die Prototypen und Muster jeweils zur Eigenschaftsabsicherung dienen und so die Produktentwicklung im folgenden Zyklus mit einem gesteigerten Produkt und Prozessverständnis fortgeführt werden kann (Bild 3-9).

Aufgrund der starken Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem geht die Richtlinie in einem Exkurs auf den integrativen Entwurf von Produkt und Produktionssystem ein [VDI2206], [Nor12]. Da Produkt und Produktionssystem von Beginn an integrativ betrachtet werden müssen, schlägt die Richtlinie eine iterative Vorgehensweise für den Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse vor. Sie orientiert sich am V-Modell für den Entwurf mechatronischer Systeme und stellt keine allgemeingültige Vorgehensweise dar, sondern muss situationsspezifisch im Unternehmen an den Produktentwurf angepasst werden.

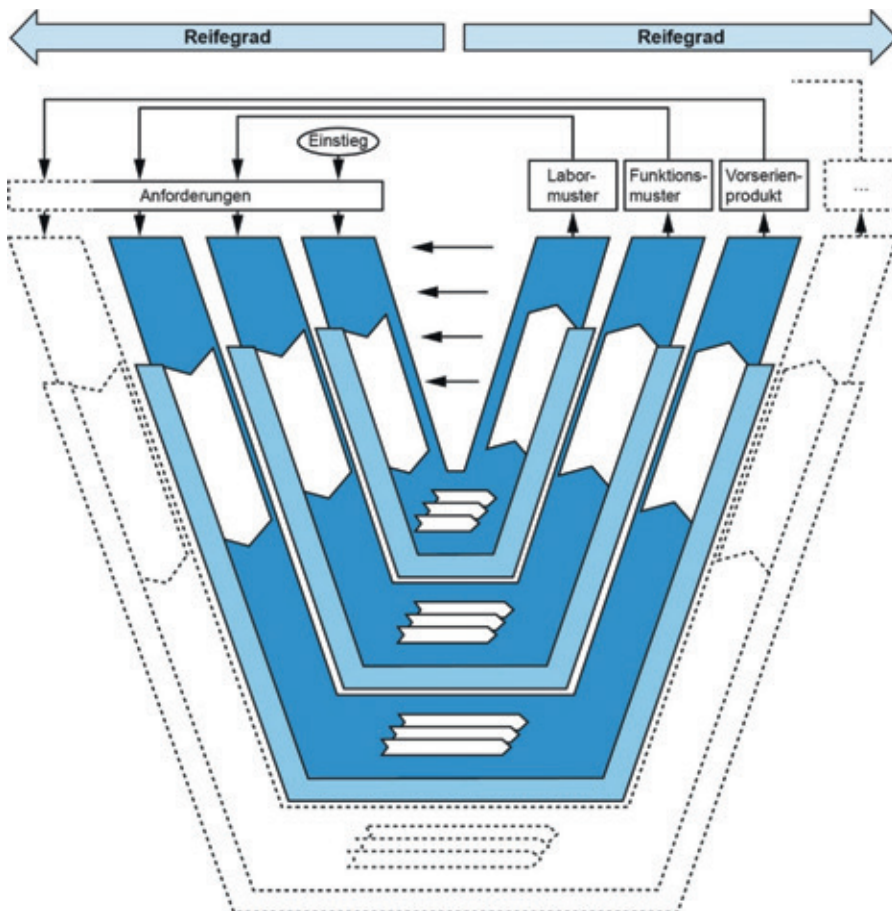


Bild 3-9: Durchlaufen mehrerer Makrozyklen mit steigender Produktreife [VDI2206]

Resümee

Die VDI-Richtlinie 2206 liefert ein übergeordnetes Vorgehensmodell für die Produkt- und Produktionssystementwicklung mechatronischer Systeme. Das Vorgehensmodell beinhaltet explizit die Phase Konzipierung des Produktionssystems und die Verwendung von Prototypen im Produktentstehungsprozess. Die Richtlinie wird jedoch nicht so detailliert, so dass die Wahl geeigneter Herstellverfahren oder Entwicklungsmethoden dem Entwickler überlassen bleibt. Insbesondere die starken Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem bei integrierten mechatronischen Systemen werden nur unzureichend berücksichtigt.

3.3.3 Suche und Informationsbereitstellung nach AVENARIUS

AVENARIUS untersucht in seiner Arbeit verschiedene Arten von Lösungselementen mit dem Ziel, diese Entwicklern rechnerbasiert zur Verfügung zu stellen. Ein Lösungselement stellt dabei:

„eine realisierte, bewährte Lösung zur Erfüllung einer Funktion dar. Diese Lösung kann elementar sein, wie, z.B. eine Schraube, aber auch komplex, wie ein mechatronisches Funktionsmodul oder ein autonomes bzw. vernetztes mechatronisches System“ [Ave02].

Ziel seiner Arbeit ist es, ein mechatronisches System aus Kaskaden von Lösungselementen, d.h. hierarchischen Strukturen aus realisierten und bewährten Lösungen, aufzubauen. Dazu gliedert er die Funktionsstruktur in einem iterativen Prozess auf, um so möglichst vielen Teilfunktionen geeignete Lösungselemente zuzuordnen. Funktionen und Lösungselemente verfügen dabei über die Flussbeziehungen Energie-, Stoff- und Informationsfluss [Ave02].

Zur gezielten Suche von Lösungselementen identifiziert AVENARIUS unterschiedliche Suchstrategien, die sich auch mit IT-Systemen gut umsetzen lassen. Zu den bedeutendsten Suchstrategien, insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung zählen die Suche anhand von:

- **Technischen Verben:** In der aufgabenstellungsbezogenen Suche werden Lösungselemente anhand der gestellten Anforderungen bzw. zu erfüllenden Aufgabenstellung identifiziert. Die Suche greift hier auf die verwendeten Verben der Aufgabenstellung zurück und gleicht diese mit der Sammlung technischen Verben nach BIRKHOFFER ([Rot00]) ab, die für die Aufgabenbeschreibung verwendet werden sollten.
- **Funktionsgrößen:** Die funktionsgrößenbezogene Suche nach Lösungselementen beruht auf der korrekten Verwendung der Flussbeziehungen und unterstützt eine domänenübergreifende Suche, die beispielsweise rein auf der Wandlung von Energie- in Informationsflüsse beruht. Um die Komplexität der Lösungen einzuschränken begrenzt AVENARIUS sich hier in Anlehnung an ROTH [Rot00] auf die Verwendung der Intensitäts- und Quantitätsgrößen, also die wesentlichen Funktionsgrößen. Dadurch reduziert sich die Anzahl möglicher Funktionsgrößen auf 22.
- **Hierarchischen Produktstrukturen:** Die hierarchische Suche eignet sich nicht für eine wirkprinzipübergreifende Suche nach Lösungselementen, sondern kann abhängig von der zugrundeliegenden Struktur zur detaillierten Suche nach Lösungselementen eingesetzt werden. Hierzu wird, je nach Sicht auf das System (Teile- oder Funktionsstruktur), jeweils weiter runterkaskadiert und entsprechende Alternativen angeboten.

Resümee

Die Arbeit von AVENARIUS bietet einen guten Überblick über verschiedenste Methoden zur Lösungselementsuche in den frühen Phasen der Entwicklung technischer Systeme. Allerdings zeigen die aufgezeigten Ansätze Schwachstellen auf. Die Suche nach technischen Verben erfordert eine exakte Spezifikation der Anforderungen. Die funktionsgrößenbezogene Suche nach Lösungselementen beruht auf der physikalisch korrekten Verwendung und Modellierung der Flussbeziehungen, die auch insbesondere schon in der frühen Phase bekannt und modelliert sein müssen. Die Verwendung des Rahmenwerks nach KAISER könnte helfen dies Problem zu beheben [Kai13]. Die hierarchische Suche eignet sich nur bedingt für MIDs, da es nur geringe Kaskadierungsebenen gibt. In Kombination mit einer funktionsorientierten Sichtweise und Hilfsmitteln wie dem von PEITZ vorgeschlagenen Konstruktionskatalog erscheint der Ansatz vielversprechend.

3.3.4 Produktoptimierung nach PEITZ

Die Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen nach PEITZ dient der Optimierung herkömmlicher mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID. Dabei werden die konventionellen Produkte bezüglich ihrer Stärken und Schwächen analysiert, um Optimierungspotential aufzudecken. Besteht Potential, können mit der Methodik alternative MID-Lösungskonzepte entwickelt werden. Diese sind hinsichtlich Nutzen und Herstellkosten bewertbar und dienen als Basis für weitere Entwicklungsphasen. Die Methodik setzt in der frühen Phase der Entwicklung an und verfolgt das Ziel, wesentliche Potentiale der Technologie MID durch eine ausgereifte Konzipierung auszunutzen. Bild 3-10 skizziert das systematische Vorgehen für eine zielorientierte Produktoptimierung.

Die Produktoptimierung beginnt auf Basis einer konventionellen mechanisch elektronischen Baugruppe. Der erste Schritt ist die Ausformulierung der Aufgabenstellung. Dafür wird der Nutzen der Baugruppe bestimmt und die an sie gestellten Anforderungen analysiert. Darauf aufbauend legt der Entwickler die Ziele der Produktoptimierung fest. In der zweiten Phase erfolgt eine Analyse der herkömmlichen Baugruppe. Diese ist charakterisiert durch die Aufdeckung von Schwachstellen und bezieht sich sowohl auf das Produkt selbst (Gestalt/Funktionen) als auch auf das zugehörige Produktionssystem. Zudem sind die Herstellkosten Gegenstand der Analyse. Der Entwickler bewertet die untersuchte Baugruppe hinsichtlich der vorher definierten Ziele und bestimmt somit ihre Anforderungserfüllung. Die Konzepte des MID-Bauteils und des MID-Herstellprozesses werden in der Methodik in einem iterativen Zyklus erarbeitet, da vielfältige Wechselwirkungen zwischen ihnen bestehen. Ziel der Bauteilkonzipierung ist eine Prinziplösung. Dafür werden zuerst die Funktionen des MID-Bauteils bestimmt.

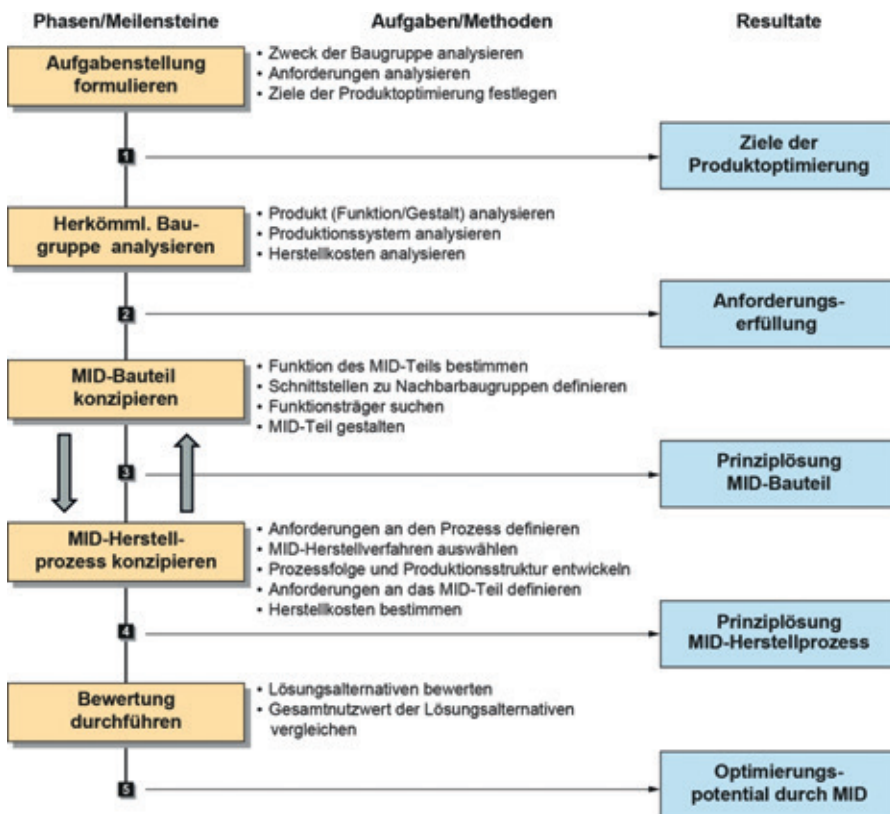


Bild 3-10: Vorgehensmodell zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID [Pei08]

Mit Hilfe eines Konstruktionskatalogs sucht der Entwickler Funktionsträger zur Umsetzung dieser Funktionen (Bild 3-11). Anschließend wird die Prinziplösung anhand eines vierstufigen Vorgehensmodells erarbeitet. Zuerst wird der Funktionsträger mit seinen geometrischen Restriktionen positioniert. Wichtig ist, dass die mechanischen oder elektronischen Anschlussstellen beachtet werden. Danach wird im zweiten Schritt der Schaltungsträger gestaltet. Anschließend können weitere Funktionsträger positioniert werden. Zum Abschluss wird dann noch das Konzept des Leiterbahnlayouts festlegt.














































Lösung		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Funktion								
Elektrische MID-Funktionen	El. Energie transportieren							
	Mit Nachbargruppe kontaktieren							
	El. Bauteile kontaktieren (AVT)							
	Elektromagn. Felder schirmen							
	Vor hohen Strömen sichern							
	Stromkreis schließen / öffnen							
Mechanische MID-Funktionen	Bauteile tragen							
	Kraft übertragen							
	Vor Umwelteinflüssen schützen							
	Thermische Energie leiten							
	Bauteile stabilisieren							
	Bauteile markieren							
	Baugruppe kontaktieren							

Bild 3-11: Erweiterter MID-Konstruktionskatalog in Anlehnung an PEITZ [Fra13]

In der folgenden Phase wird der Herstellprozess konzipiert. Dafür dienen die ausgearbeiteten Eigenschaften der Prinzipiellösung als Basis. Das am besten geeignete MID-Herstellverfahren wird ausgewählt und in den nächsten Phasen hinsichtlich der genauen Prozessfolge und Produktionsstruktur weiter definiert. Zusätzlich werden die Herstellkosten der Lösung bestimmt. Die beiden Konzipierungsphasen werden als Kreislauf solange durchlaufen, bis ein optimales Gesamtkonzept festgelegt ist. Abschließend erfolgt eine Bewertung der erarbeiteten Lösung mit Hilfe einer Stärken-Schwächen Analyse. Dadurch erhält der Entwickler eine Übersicht über das erreichbare Optimierungspotential der Baugruppe durch die Technologie MID.

Resümee

Die Entwicklungsmethodik nach PEITZ erlaubt die Optimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID. Der Fokus liegt dabei auf einer ausgereiften Konzipierung des Produkts und der zugehörigen Herstellprozesse. Die funktionsbasierte Entwicklung unter Zuhilfenahme eines Konstruktionskatalogs erscheint vorteilhaft für die komplexe Entwicklung räumlicher Schaltungsträger. Der Ansatz von PEITZ legt den Fokus auf die Optimierung von herkömmlichen Produkten mithilfe der Technologie MID. Betrachtet wird dabei im Rahmen einer Ziel-Nutzwert-Analyse welche vorteilhaften Eigenschaften durch die Technologie MID an einem konkreten Produkt möglich sind. Nicht betrachtet werden allerdings die grundsätzliche Neuentwicklung technischer Produkte sowie die Machbarkeit eben dieser Ideen.

3.3.5 Entwicklung mechatronischer Systeme nach KAISER

KAISER hat eine Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID erarbeitet [Kai09]. Sie strukturiert den Entwicklungsprozess und integriert Methoden sowie Richtlinien mit dem Ziel, die Komplexität in der Entwicklung zu reduzieren. Dabei werden die Abhängigkeiten zwischen Geometrie und Produktionssystem sowie den Prozessen der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) berücksichtigt. Ergebnis ist eine detaillierte Spezifikation des MID-Produkts und des dazugehörigen Fertigungssystems.

Kern der Systematik ist ein generisches Vorgehensmodell, das dem Entwickler als Leitfaden dient. Darin sind Phasen, Meilensteine und entsprechende Ziele definiert, die während des Entwicklungsprozesses zu erarbeiten sind (Bild 3-12). Zudem werden Methoden aufgezeigt, die in den einzelnen Phasen eingesetzt werden können. Des Weiteren beschreibt die Systematik nach KAISER ein spezifisches Vorgehensmodell, das beispielhaft für die Laserdirektstrukturierung ausgeprägt ist. Dieses detailliert die Entwicklungsaufgaben des allgemeinen Vorgehens.

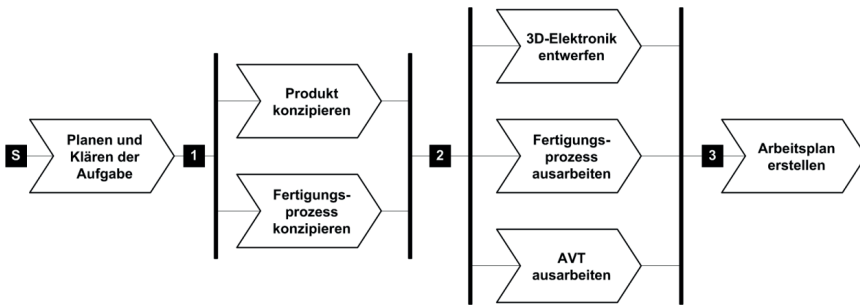


Bild 3-12: Generisches Vorgehensmodell nach KAISER [Kai09]

Die Phasen und Meilensteine des generischen Modells werden im Folgenden charakterisiert:

Planen und Klären der Aufgabe: In dieser Phase erfolgt die Ermittlung der Produktanforderungen. Diese gliedern sich in technische sowie wirtschaftliche Anforderungen. Ausgehend vom Entwicklungsauftrag wird so eine vorläufige Anforderungsliste erstellt, die im nachfolgenden Entwicklungsprozess weiter zu detaillieren ist.

Meilenstein 1: Spezifizierter Entwicklungsauftrag und vorläufige Anforderungsliste.

Produkt konzipieren: Auf Basis der Anforderungsliste werden die Produktfunktionen definiert und über eine Funktionsstruktur verknüpft. Anschließend werden Lösungselemente zur Erfüllung der Funktionen gesucht und kombiniert. Dadurch legt der Entwickler eine prinzipielle Gesamtlösung fest. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung dieser Prinzipallösung anhand technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte, zum Beispiel über eine Nutzwertanalyse. Unter Berücksichtigung fertigungsbedingter Restriktionen werden daraufhin die Wirkstruktur und die prinzipielle Gestalt des Bauteils erarbeitet.

Prozess konzipieren: Die Konzipierung des Fertigungsprozesses erfolgt parallel zur Produktkonzipierung. Einerseits ergeben sich auf Grund der prinzipiellen Produktlösung Einschränkungen hinsichtlich der Fertigungsprozesse. Andererseits bestehen fertigungsbedingte Restriktionen, ausgelöst durch die an der Produktion angewendeten Verfahren. Der Entwickler muss auf dieser Grundlage das am besten geeignete MID-Herstellverfahren auswählen.

Meilenstein 2: Produkt- und Produktionskonzepte in Form einer detaillierten Anforderungsliste mit der prinzipiellen Gestalt sowie den festgelegten Arbeitsvorgängen und Fertigungsmitteln.

3D-Elektronik entwerfen: In dieser Phase findet der Entwurf des genauen dreidimensionalen MID-Schaltungslayouts statt. Dazu wird mit Hilfe von Gestaltungsprinzipien zuerst eine Grobgestalt festgelegt, die anschließend hinsichtlich Form, Werkstoff sowie Toleranzen detailliert ausgearbeitet wird. Zur Erfüllung der elektronischen Funktionen wählt der Entwickler elektronische Bauelemente aus, die über das Layout verknüpft werden.

Nach Überprüfung des Schaltungslayouts mit verfahrensspezifischen Design-Regeln (z. B. Leiterbahnabstände, -breiten) und ggf. erforderlichen Anpassungen, bildet ein vollständig entwickeltes räumliches Schaltungslayout den Abschluss dieser Phase.

Fertigungsprozess ausarbeiten: Auf Basis der Konzipierung von Produkt und Fertigungssystem wird die Fertigungsprozesskette genauer ausgearbeitet. Dafür betrachtet der Entwickler nochmals die Verträglichkeit zwischen Produkt und MID-Herstellverfahren. Außerdem werden Anlagen sowie Handhabungssysteme, zum Beispiel für die Strukturierung oder die Bestückung, festgelegt. Die Ausarbeitung der AVT erfolgt parallel und wird abschließend integriert.

Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten: In dieser Phase erfolgt die spezifische Auswahl der Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik. Diese wird in entscheidendem Maße von den in der Konzipierung festgelegten Produkteigenschaften beeinflusst. Beispielsweise wirkt sich die Temperaturbeständigkeit des Werkstoffs auf die Auswahl des Verbindungsmediums aus. Aufbauend auf die Verfahren bestimmt der Entwickler die Anlagen und Werkstoffe und definiert notwendige Prozessparameter. Als Ergebnis liegt die ausgearbeitete AVT-Fertigungsprozesskette vor.

Meilenstein 3: Gesamtentwurf des MID-Produkts und der entwickelten Fertigungsprozesskette (Mechanik, Schaltungslayout, AVT).

Arbeitsplan erstellen: Im letzten Schritt dieser Entwicklungsmethodik wird die Arbeitsplanung festgelegt, die sich in die Bereiche Arbeitsablauf- und Arbeitsmittelplanung gliedert. In der erstgenannten werden Arbeits- und Montagepläne sowie Maschinensteuerprogramme erstellt. Unter Berücksichtigung von Stückzahl, Toleranzen und Kapazitäten werden in der Arbeitsmittelplanung die Maschinen und Vorrichtungen ausgelegt [Kai09].

Resümee

Die Systematik nach KAISER liefert einen Leitfaden für den gesamten MID-Entwicklungsprozess. Dabei wird die integrative Entwicklung aus Produkt und Produktionssystem ebenso berücksichtigt wie die Interdisziplinarität der Entwicklungsaufgabe. Hierzu stellt KAISER auch das Konzept einer Wissensbasis vor, die eine erste rudimentäre Abfragemaske zur Produktspezifikation enthält. KAISER berücksichtigt bereits den Einsatz von Prototypen im Entwicklungsprozess, mangels damaliger technischer Möglichkeiten jedoch domänengetrennt in mechanische und elektronische Prototypen. Des Weiteren geht er nicht auf die unterschiedlichen Reifegrade von Prototypen entlang des Produktentstehungsprozesses ein. Die Systematik beschränkt sich zudem in der spezifizierten Ausarbeitung auf die Laserdirektstrukturierung und beginnt bereits beim Entwicklungsauftrag.

3.3.6 Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik nach WATTY

Die Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik nach WATTY unterstützt die Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte. Sie hilft dem Entwickler, indem sie den komplexen Entwicklungsprozess strukturiert. Dafür wurde ein allgemeines methodisches Vorgehen erarbeitet, das zur Vermeidung unnötiger Iterationsschritte beiträgt. Die Methodik ermöglicht die systematische Ablage von Wissen und damit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Entwicklungsprojekte. Sie ist flexibel angelegt, um die unterschiedlichen Anwendungsgebiete und Herstellungstechnologien der Mikrosystemtechnik abzudecken. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Technologie MID. Das Vorgehensmodell der Methodik, das sich stark am V-Modell orientiert, liefert eine Grundlage, die an konkrete Aufgabenstellungen angepasst werden kann. Zu Beginn gilt es, die Aufgabenstellung zu präzisieren. Dafür werden die Anforderungen an das Produkt aus internen und externen Quellen ermittelt. Diese legen die Eigenschaften des Produkts fest und stellen den Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung dar. Außerdem bestimmen sie die Zielvorgaben und bilden einen Maßstab für spätere Bewertungen. Die nachfolgende Entwicklung unterteilt sich in die drei Arbeitsabschnitte Systemkonzept, Integrierter Entwurf der Komponenten und Systemausarbeitung [Wat06], [VDI2206]:

Systemkonzept: Ziel der Phase ist die Festlegung eines prinzipiellen Lösungskonzepts für das System. Das Konzept ist domänenübergreifend angelegt und beschreibt die Wirkweise sowie Verknüpfungen der Teilsysteme. Dafür wird eine Funktionsstruktur aufgestellt, die die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen gliedert. Anschließend sucht der Entwickler Wirkprinzipien und Lösungselemente zur Erfüllung dieser Teilfunktionen. Kombiniert ergeben diese die Wirkstruktur des Produkts zur Erfüllung der Funktionen (vgl. [PBF+07]). Anschließend wird die Wirkstruktur durch reale Bauelemente spezifiziert. Hierbei ist es sinnvoll, mehrere Varianten zu erstellen, um ein breitgefächertes Lösungsspektrum zu generieren. Abschließend bewertet der Entwickler die Varianten und wählt in Bezug auf die Anforderungen das am besten geeignete Konzept aus. Zusätzlich werden die Herstellverfahren schon in diesem Abschnitt ausgewählt, um ihre Konzipierung parallel zur Entwicklung des Produktkonzepts voranzutreiben [Wat06].

Integrierter Entwurf der Komponenten: In Anlehnung an die Entwurfsmethodik nach PAHL/BEITZ werden die Komponenten zuerst grob, dann fein gestaltet [PBF+07]. Dafür wird das System in gestaltbestimmende Hauptkomponenten und Nebekomponenten strukturiert. Zuerst erfolgt die Gestaltung der Hauptkomponenten unter Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen. Anschließend werden die ausgewählten Konzepte hinsichtlich der Nebekomponenten und Softwaresysteme ausgearbeitet. Am Ende überprüft und bewertet der Entwickler das gestaltete Gesamtsystem anhand der ermittelten Anforderungen. Die technologische Herstellbarkeit wird bspw. durch den Einsatz von Gestaltungsrichtlinien permanent in die Entwicklung einbezogen [Wat06].

Systemausarbeitung: Zu Beginn dieser Phase erfolgt die Zusammenführung der einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem und die damit verbundene gegenseitige Abstimmung. Anschließend werden Funktionen und die technologische Machbarkeit detailliert überprüft. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Simulation des Gesamtsystems und der einzelnen Komponenten zur Auslegung des Produkts und der notwendigen Absicherung. Es gilt, die besonderen Anforderungen an die Simulation von Mikrosystemen (z.B. AVT, EMV) zu berücksichtigen. Die erarbeitete Lösung wird weiter optimiert, so dass abschließend ein vollständig entwickelter Gesamtentwurf vorliegt [Wat06].

Die Methodik nach WATTY beinhaltet Methoden, die auf die Mikrosystemtechnik angepasst oder neu erstellt wurden. Beispiele sind die Anforderungsermittlung für Mikrosysteme, eine Auswahlmatrix für Material und Herstellungstechnologien sowie Designrichtlinien zur Produktgestaltung. In der Arbeit werden diese Methoden unter anderem auf die Technologie MID spezifiziert [Wat06].

Resümee

In der Methodik nach WATTY wird ein Vorgehen zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik entwickelt. Es ist allgemeingültig ausgelegt und nicht auf einzelne Technologien beschränkt. Die Methodik strukturiert somit den Entwicklungsprozess und erlaubt eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Projekte. Durch den allgemeinen Aufbau ist auch eine Anwendung auf die MID-Entwicklung möglich, allerdings wird dies in der Arbeit nur in Teilen evaluiert. Sie beziehen sich hauptsächlich auf das 2K-Verfahren. Ein Nachteil des Ansatzes ist die frühzeitige Festlegung auf ein Produktionsverfahren. Dadurch wird der mögliche Lösungsraum im domänenspezifischen Entwurf bereits frühzeitig eingeschränkt. Außerdem fehlen genaue Handlungsempfehlungen in Bezug auf andere Fertigungsprozessschritte (z.B. Laserstrukturierung) oder den Einsatz von Prototypen im Entwicklungsprozess.

3.3.7 Entwicklungsleitfäden

Im Rahmen der Entwicklung von MID-Produkten werden insbesondere bei der Konkretisierung, also im Hinblick auf die Gestaltung des Produktes, unterstützende Entwicklungsleitfäden eingesetzt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf konkreten verfahrensspezifischen Gestaltungsrichtlinien. Diese ermöglichen eine fertigungsgerechte Konstruktion und zeigen wichtige Aspekte entlang der Prozesskette auf. Vielfach werden diese Leitfäden von den Unternehmen selbst entwickelt und beinhalten daher Prozess-Know-how aus der Praxis. Im Folgenden werden die bekanntesten Leitfäden, die darüber hinaus öffentlich zugänglich sind, kurz vorgestellt.

Leitfaden für die Laserdirektstrukturierung nach LPKF

Der LPKF-LDS®-Leitfaden des Unternehmens LPKF ermöglicht die Entwicklung und Produktion innovativer MID-Bauteile mithilfe des LDS-Verfahrens. Dabei liefert die vom

Unternehmen bereitgestellte Gestaltungsrichtlinie dem Entwickler verlässliche Kennwerte und Empfehlungen bezüglich einer fertigungsgerechten Produktgestaltung. Diese beruhen in der Regel auf den technischen Parametern der am Prozess beteiligten Anlagen und auf Erfahrungen des Unternehmens hinsichtlich bereits realisierter Anwendungen. Die Inhalte der Gestaltungsrichtlinie beziehen sich sowohl auf die Entwicklung des Produkts selbst als auch auf die beteiligten Fertigungsmittel.

Der LDS-MID-Entwickler erhält damit einen Leitfaden, der die Prozessschritte Spritzgießen, Strukturierung, Metallisierung und AVT umfasst. Da sich der LDS-Prozess nur mit bestimmten Materialien realisieren lässt, liefert der Leitfaden bereits eingangs einen Überblick über die freigegebenen Werkstoffe. Die Designregeln liefern dabei relevante Konstruktionsmerkmale wie die Leiterbahnbreite und deren Abstände sowie empfohlene Kantenradien und Leiterbahnpositionen. Im Bereich des Spritzgusses werden ergänzende Hinweise zu den spezifischen Anforderungen der Technologie gegeben, die über die klassischen Spritzgussanforderungen hinausgehen, wie beispielsweise die Position der Anspritzpunkte und Bindenähte. Für den Prozessschritt der Strukturierung gibt der Leitfaden detaillierte Informationen zu Laserparametern, Teilehalterungen und weiteren Prozessparametern. Parameter für eine fehlerfreie Metallisierung werden ebenfalls erläutert [Fra13], [Lpk11].

Neben dem Leitfaden für die Laserdirektstrukturierung nach LPKF existieren noch Weitere, die zum Teil von Unternehmen entwickelt wurden. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise der **Leitfaden zur Gestaltung von MID-Produkten nach HARTING** zu nennen, der zum Teil öffentlich zugänglich ist und neben Richtlinien für die Laserdirektstrukturierung auch Design-Grundregeln für den 2K-Spritzguss definiert. Darüber hinaus werden detaillierte Informationen zu konkret bei HARTING im Einsatz befindlichen Maschinen gegeben [Fra13]. Des Weiteren sind die Gestaltungsrichtlinien der FORSCHUNGS-VEREINIGUNG RÄUMLICH-ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3D-MID E. V. zu nennen, die im Rahmen des ersten Handbuchs erstellt wurden. Die Gestaltungsrichtlinien liefern wichtige Informationen für die Verfahren 2K-Spritzguss und Heißprägen [For04].

Resümee

Die Leitfäden zur Gestaltung von MIDs sind ein probates Mittel, um Entwickler bei der konkreten Ausgestaltung eines Produktdesigns zu unterstützen. Materialien, konstruktive und prozesstechnische Parameter werden ebenso dargestellt wie praktikable Lösungen für Metallschichtsysteme und Prüfparameter. Ein großer Nachteil von Leitfäden ist jedoch die Fixierung auf das entsprechende Fertigungsverfahren. Leitfäden dienen somit nur der konstruktiven Ausgestaltung einer Produktidee, für die das Produktionsverfahren bereits festgelegt wurde. Zur Unterstützung des Entwicklers in der kreativen Konzipierungsphase sind sie ungeeignet.

3.3.8 Produktentwicklung generativer Produkte nach BREUNINGER

Die in Kapitel 2.5 vorgestellten Technologien zeigen, dass MID-Prototypen auch durch einen Prozess zur Herstellung des Grundkörpers und darauf aufbauend einen separaten Schritt zur selektiven Metallisierung erzeugt werden können. Daher sind neben den allgemeinen Ansätzen zur integrativen Entwicklung mechatronischer Systeme auch Methoden zur Entwicklung rein mechanisch (generativ) erzeugter Grundkörper interessant. Stellvertretend wird daher der Ansatz von BREUNINGER ET AL. im Folgenden vorgestellt.

Um die Potentiale generativ erzeugter Bauteile auszunutzen, empfehlen BREUNINGER ET AL. einen eigenständigen Produktentwicklungsprozess [BBW+13]. Dieser sollte, aufgrund der besonderen Eigenschaften der Verfahren (z.B. direkte Herstellung der Verifikationsmuster), von klassischen maschinenbaulich geprägten Produktentstehungsprozessen abweichen. Trotz der beispielweise in der VDI 2206 vorgeschlagenen Makrozyklen, sieht Breuninger diese Entwicklungsmethoden als zu linear an. Daher wird ähnlich wie bei KRAUSE insbesondere im Konstruktionsprozess ein iteratives Wechselspiel zwischen virtuellen und physischen Modellen angestrebt.

Der Vorteil dieses iterativen Konstruktionsprozesses ist die Möglichkeit, zu jedem Zeitpunkt die Funktion des Bauteils virtuell oder real zu verifizieren. Daraus lässt sich ableiten, dass die Produktentwicklung bei generativ hergestellten Bauteilen auf zwei Ebenen stattfindet. Auf der virtuellen Ebene werden Schwachstellen des Produktes mittels FEM aufgedeckt und optimiert und auf der realen Ebene werden die Ergebnisse der Simulation überprüft und die Produkteigenschaften durch Tests sichergestellt. Beide Ebenen bilden dabei Iterationsschleifen, die mehrmals durchlaufen werden können.

Um den iterativen Konstruktionsprozess um die frühen Phasen zu erweitern, bedienen sich BREUNINGER ET AL. beim spiralförmigen Produktentwicklungsprozess nach EPPINGER [EU09]. Dieser fasst das nach seiner Meinung entscheidende Stage-Gate Modell¹⁸ nach COOPER [Coo02] und das von BOEHM entwickelte Spiralmodell für die Softwareentwicklung¹⁹ [Boe88] (Rapid Application Development) zusammen und eignet sich damit für die Entwicklung generativ erzeugter Produkte. Die Phasen des spiralförmigen Entwicklungsmodells von BOEHM wurden durch die Arbeitsschritte des Phasenmodells von EPPINGER ersetzt [BBW+13]. Beim spiralförmigen Produktentwicklungsprozess nach EPPINGER werden allerdings nicht immer alle Phasen durchlaufen [EU09]. Die farbigen Kreisabschnitte in Bild 3-13 verdeutlichen, welche Phase in welcher Iterationsschleife durchlaufen werden muss. Bewertungspunkte nach jeder Schleife unterstützen die Qualitätssicherung und dienen der Planung der nächsten Iterationsschleife. Je nach

¹⁸ Beim Stage-Gate Modell ist der Prozess in die fünf Abschnitte Voranalyse, Detailanalyse, Entwicklung, Tests und Anfahren der Produktion sowie Produktionsanlauf und Markteinführung zerlegt. Nach jedem der Abschnitte wird überprüft, ob die festgelegten Aktivitäten vollständig und zufriedenstellend durchgeführt wurden. Erst dann kann mit einem neuen Abschnitt begonnen werden [Coo02].

¹⁹ Das Spiralmodell ist ein flexibles, sich der Projektgröße anpassendes iteratives Modell, dessen Fokus auf der Risikobetrachtung liegt und eine Weiterentwicklung des Wasserfallmodells darstellt [Boe88].

Entwicklungsprojekt können mehr oder weniger Iterationsschleifen geplant werden. Die Phasen werden im Folgenden kurz erläutert.



Bild 3-13: Spiralförmiger Produktentwicklungsprozess nach EPPINGER [EU09]

Planung: Essenzielle Punkte der Planungsphase sind die Produktdefinition sowie eine Zeit- und Ressourcenplanung.

Konzeptentwicklung: Im Anschluss an die Planungsphase startet die eigentlich Konzeptentwicklung. Hier schlagen BREUNINGER ET AL. vor, Kreativmethoden zu nutzen, da es sich bei den generativen Fertigungsverfahren um verhältnismäßig junge Technologien handelt, bei denen viele Problemstellungen ungelöst sind und etablierte Herangehensweisen und Lösungen für diese neuartigen Prozesstechnologien ungeeignet sind.

System-Level Design: Beim System-Level Design werden die Einzelkonzepte planerisch und konstruktiv zusammengefügt und überprüft, inwieweit diese als komplexes Produkt funktionieren.

Detailkonstruktion: In der Phase der Detailkonstruktion wird das Konzept nach und nach in die Form des späteren Serienproduktes überführt. Insbesondere Aspekte wie Leichtbau und Design sind in dieser Phase umzusetzen.

Integration und Test: Die Besonderheiten der generativen Fertigung ermöglichen die direkte Fertigung relevanter Prototypen mit den gleichen Verfahren, die für das finale Produkt zum Einsatz kommen. Diese sollten ausgiebig getestet werden und entsprechende Ergebnisse in die Entwicklung zurückgespiegelt werden.

Serienstart: Bei der generativen Herstellung ist der Übergang zwischen Prototypenherstellung und Serienproduktion fließend. Der funktionierende und ausreichend getestete Prototyp bildet zugleich den Start der Serienproduktion [BBW+13].

Resümee

BREUNINGER ET AL. haben einen Produktentstehungsprozess für generativ erzeugte Produkte entwickelt. Im Fokus liegt dabei die Entwicklung generativ gefertigter Produkte, nicht die Nutzung von generativ erzeugten Prototypen in der Entwicklung anderer Produkte. Ein großer Vorteil der Methode ist jedoch das agile Reagieren auf die Auswirkungen von generativ erzeugten Prototypen. Ein Prototyp für MIDs könnte damit zu einem eigenständigen Produkt werden, das mit diesem abweichenden Produktentstehungsprozess entwickelt wird.

3.4 Integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem

Aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten zwischen Produkthanforderungen und individuellen Prozessrestriktionen im Produktentstehungsprozess muss die Planung des Produktionssystems frühzeitig stattfinden. Üblicherweise werden hierzu Produktgestalt und -werkstoff, die zu produzierende Stückzahl sowie weitere technologische und wirtschaftliche Kriterien herangezogen. Durch die gegenseitige Beeinflussung von Gestalt, Werkstoff und Fertigungstechnologie, ist ihre Festlegung ein komplexes Wechselspiel der einzelnen Einflussgrößen und von mehreren Iterationen geprägt. Die Auswahl ist maßgeblich von der Erfahrung und dem fertigungstechnischen Wissen des Entwicklers abhängig [EA98], [Fall00], [SCA+16], [ZMH+11].

Die Auswahl der geeigneten Fertigungstechnologie steht daher am Beginn der Planung des Fertigungsprozesses. Es gibt eine Reihe rechnerunterstützter Verfahren, die den Entwickler bei der Auswahl unterstützen sollen. Sie bestehen aus Datenbanken, welche die Informationen über Fertigungstechnologien und/oder Werkstoffe speichern und Suchalgorithmen, die anhand der o. g. Eingangsinformationen über das Produkt geeignete Lösungen vorschlagen [Fen05], [SWS03], [Zah05], [ZMH+11]. Die benötigten Eingangsinformationen sind jedoch zum Teil sehr detailliert und eignen sich daher nicht für einen frühzeitigen Einsatz.

Die Ausgangslage für die Produktionssystemplanung bildet dabei immer eine Analyse des Produktes aus Produktionssicht. Aus diesem Grund muss das Produkt bereits frühzeitig entsprechend produktionsgerecht strukturiert werden. Anschließend kann die Auswahl der entsprechenden Fertigungstechnologien erfolgen. Bei integralen Bauteilen, wie sie typisch bei MIDs sind, können in der Regel keine modularen Produktstrukturen gebildet werden, da alle Produktfunktionen mit einem Bauteil realisiert werden. Produktstrukturierungsansätze, wie beispielsweise nach DAHL [Dah90] (s. Anhang A1.1), die die Grundlage vieler der nachfolgend beschriebenen Ansätze bildet, sind bei MIDs nur für die AVT relevant. Viele der im Folgenden vorgestellten Ansätze sind ursprünglich für einen ganz anderen Zweck entwickelt worden, lassen sich aber auf die gestellten Herausforderungen übertragen. Im Folgenden werden die Ansätze vorgestellt, die auch in den frühen Phasen der Produktentstehung eingesetzt werden können.

3.4.1 Generieren alternativer Technologieketten nach FALLBÖHMER

FALLBÖHMER integriert die Tätigkeiten der operativen Technologieplanung in den Konstruktionsprozess, um so die Produktgestaltung und die Auswahl der Fertigungstechnologien frühzeitig zu synchronisieren [FAL00]. Die Entwurfsphase weicht einer gestalterisch-technologischen Entwicklungsphase, die gekennzeichnet ist durch die Integration der Grobgestaltung und Technologiegrobplanung sowie Feingestaltung und Technologiefeinplanung. Parallel zur Erstellung der Grobgestalt wird die räumliche und maßlich zutreffende vorläufige Gestalt des Produktes bzw. des Bauteils festgelegt, so dass eine systematische Zuordnung der Fertigungstechnologie bzw. von Technologieketten möglich ist. Eine Technologiekette definiert FALLBÖHMER dabei als eine

„abstrakte, produktionsmittelunabhängige Kombination von Fertigungstechnologien in definierter Reihenfolge zur Herstellung eines Funktionsträgers“ [Fal00].

Ein Produkt- und ein Technologiedatenmodell sowie eine Technologiezuordnungsmatrix bilden die Grundlage der Methode. Das Vorgehen gliedert sich dabei in sechs Phasen, die nachfolgend beschrieben und in Bild 3-14 verdeutlicht werden.

Technologievorauswahl: Den Ausgangspunkt für das Vorgehen bilden die funktionalen Module bzw. Bauteile des Produktes, die in der Grobgestaltungsphase bereits umgesetzt wurden. Ein Abgleich der Bauteilanforderungen mit den Fähigkeiten der Fertigungstechnologien liefert den Bedarf an form- und eigenschaftsverändernden sowie fügenden Technologien. Den Ausgangspunkt für das weitere Vorgehen und die initiale Technologiekette bildet eine formgebende Kerntechnologie, die den weiteren Aufbau maßgeblich prägt.

Ermittlung der technischen Machbarkeit: Die ermittelten Technologien werden anschließend anhand aller Bauteilmerkmale auf ihre technische Machbarkeit geprüft. Dazu zählen Formelemente, Maß- und Formtoleranzen sowie Oberflächeneigenschaften. Die Eignung einer jeden Technologie wird mit einem fuzzybasierten²⁰ Soll-/Istwert-Vergleich angestellt und für jedes Merkmal ein Überdeckungsgrad berechnet.

²⁰ FALLBÖHMER verwendet beim Übergang von Eingangs- zu Ausgangszustand keinen linearen Zusammenhang, sondern bildet diesen mithilfe von Funktionsbändern ab. Dieser fuzzybasierte Ansatz zum Umgang mit Unschärfen, hilft Informationsunsicherheiten abzufangen.

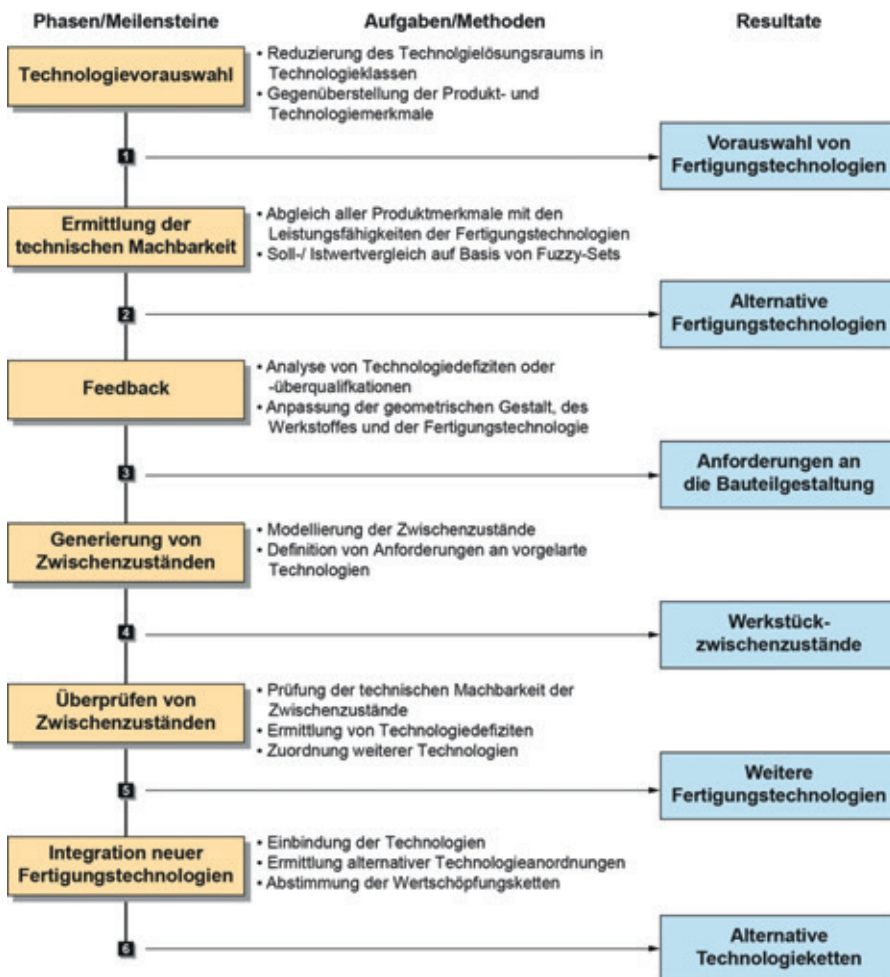


Bild 3-14: Vorgehen zur Generierung alternativer Technologieketten nach FALLBÖHMER [FAL00]

Feedback: In der anschließenden Feedback-Phase diskutieren Konstrukteur und Technologieplaner die Produkt-Technologie-Zuordnung auf Basis der identifizierten Technologiedefizite oder -überqualifikationen. Gestalt, Werkstoff oder Technologie werden ggf. angepasst, um eine vollständige Überdeckung von Anforderungen und Technologiefähigkeiten für jedes Bauteilmerkmal zu erhalten.

Generierung von Zwischenzuständen: Selten kann die initial festgelegte formgebende Kerntechnologie alle Bauteilmerkmale erzeugen. Diese Defizite in den Technologien müssen durch weitere Fertigungstechnologien ergänzt werden. FALLBÖHMER hat zu diesem Zweck sog. Bauteilzwischenzustände eingeführt (Bild 3-15).

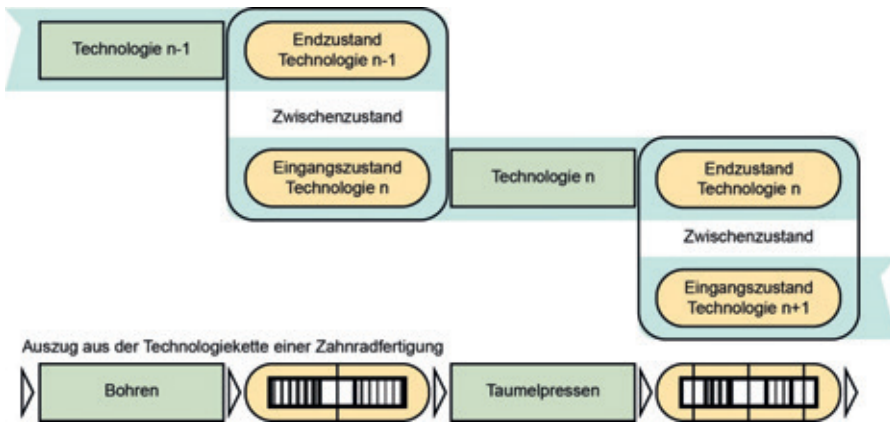


Bild 3-15: Struktur einer Technologiekette nach FALLBÖHMER [Fal00]

Diese Zwischenzustände werden modelliert, indem wesentlichen Produktmerkmale festgelegt werden, die beispielsweise eine Technologie n als Voraussetzung bzw. Eingangszustand benötigt.

Überprüfen von Zwischenzuständen: Die Voraussetzungen bzw. Eingangszustände für eine Technologie n werden mit dem Endzustand der Technologie $n-1$ durch eine Gegenüberstellung der Bauteilanforderungen und der Technologiefähigkeiten verglichen. Das Verfahren entspricht der Produkt-Technologie-Zuordnung, wie sie in den ersten beiden Phasen bereits durchgeführt wurde. Erfolgt keine Übereinstimmung, sind weitere Technologien in die Technologiekette einzufügen.

Integration neuer Fertigungstechnologien: Die Auswahl weiterer Technologien für die Technologiekette erfolgt gemäß dem beschriebenen Verfahren der Technologievorauswahl. Wenn mehrere Technologien die Anforderungen eines Bauteilzwischenzustandes erfüllen, ergeben sich alternative Technologieketten [Fal00].

Resümee

Die Methode zum Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung nach FALLBÖHMER ermöglicht eine frühzeitige Ermittlung von Fertigungstechnologien sowie die Bildung von Technologieketten bereits in der Entwurfsphase des Produktes. Restriktionen aus der Fertigung werden in die Produktentwicklung zurückgespiegelt. Den Ausgangspunkt bildet jedoch die bereits erforderliche Grobgestalt des Produktes. Aussagen zu Formelementen, Toleranzen oder der Oberflächenbeschaffenheit, wie sie in der Methode benötigt werden um die Verfahrensketten abzugrenzen, sind jedoch oftmals in der Konzipierungsphase nicht vorhanden. Die Methode ist maßgeblich für klassische maschinenbauliche Erzeugnisse und deren Prozesse entwickelt worden. Die Methodik eignet sich laut NORDSIEK auch für mechatronische Produkte [Nor12], einige der Ansätze können daher für die Konzipierung von MIDs verwendet werden.

Die Methodik der alternativen Fertigungsfolgen nach TROMMER [Tro01] baut auf dem Ansatz nach FALLBÖHMER auf, und erweitert diesen in der Betriebsmittelebene auf Basis von Technologieketten. Die Methodik ist nicht eigenständig anwendbar und wird daher im Anhang unter A1.2 näher betrachtet.

3.4.2 Produktionsalternativen nach MÜLLER

Die Methodik nach MÜLLER unterstützt den Anwender bei der frühzeitigen Generierung optimaler Produktionsverfahrensketten. Auf Basis unscharfer Produktinformationen sollen Verfahrensketten²¹ geplant werden können, die im Unternehmen vorhandene und neue Fertigungstechnologien berücksichtigen. Die Methodik besteht im Kern aus Wissensmodellen zur Abbildung von Produktionsverfahren und zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen (Interdependenzen) und Alternativen sowie drei Bewertungsmodellen zur Bestimmung einer optimalen Verfahrenskette. Darüber hinaus liefert MÜLLER ein Vorgehensmodell zur Anwendung (Bild 3-16) und einen Leitfaden zur Einführung der Methodik im Unternehmen. Die Wissensbasis über die Produktionsverfahren beruht dabei auf etablierten Arbeiten, wie der DIN 8580 (Fertigungsverfahren) [DIN8580] und der VDI-Richtlinie 2860 (Montage und Handhabung) [VDI2860] sowie weiteren ergänzenden wissenschaftlichen Arbeiten.

MÜLLER verwendet mehrere Hilfsmittel, um die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigungsverfahren zu berücksichtigen. Strukturierungskonventionen für Produkte und Fertigungsverfahren helfen bei deren Gliederung in Klassen und Elemente. Mit Hilfe der so genannten Produkt-Primärverfahren-Matrix werden die Produktelemente maßgeblich wertschöpfenden Fertigungsverfahren, den so genannten Primärverfahren, zugeordnet. Dies ermöglicht die schnelle Auswahl von Fertigungsverfahren. In einer Primärverfahren-Primärverfahren-Matrix werden dann die Abhängigkeiten zwischen den Verfahren in Beziehung gesetzt. Zwangsfolgen, wie beispielsweise zwingend notwendige Reinigungsschritte, werden durch Verfahrensmodule dargestellt. Diese bestehen jeweils aus einem Primärverfahren und fest zugeordneten Vorgänger- oder Nachfolgerverfahren (Sekundärverfahren) [Mül08].

²¹ MÜLLER verwendet den Begriff Verfahrensketten synonym zu dem Begriff Technologiekette, wie ihn FALLBÖHMER definiert hat (vergl. Kap. 3.3.3) [Nor12].

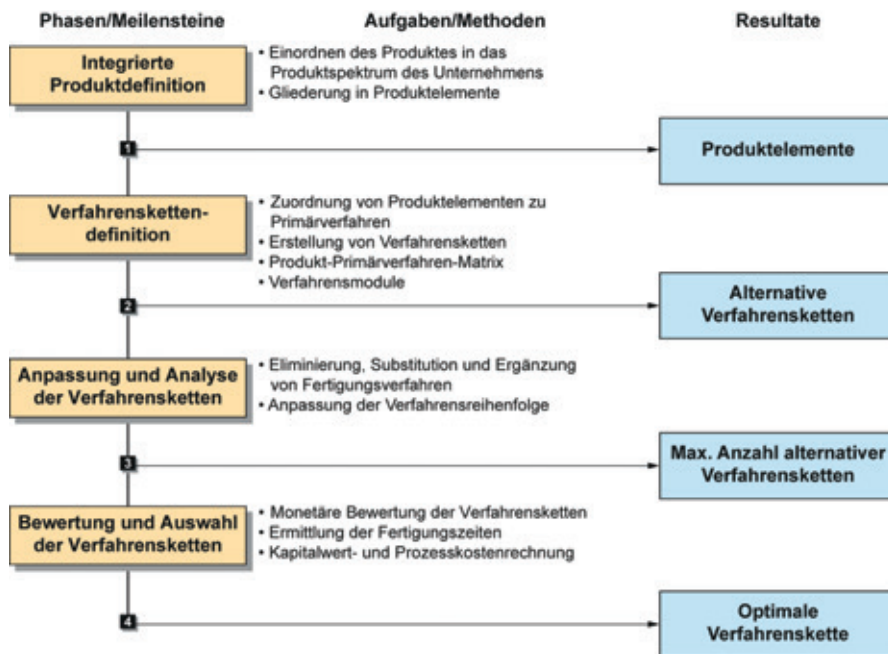


Bild 3-16: Vorgehen bei der entwicklungs- und planungsbegleitenden Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen [Mül08]

Integrierte Produktdefinition: Das Produkt wird zunächst in eine im Unternehmen existierende Produktklasse einsortiert, die es in seinen Maximalausprägungen nach Funktion, Element und Subelement beschreibt. Ein Beispiel ist: Produktklasse (Turbinschaufel), Funktion (Kühlung), Produktelement (Kühlbohrung). Als Eingangsinformationen für die Strukturierung dienen 2D-Zeichnungen, Werkstoffe, Lösungsprinzipien usw. [Nor12].

Verfahrenskettendefinition: Im zweiten Schritt werden den Produktelementen und ihren Alternativen die entsprechenden Fertigungsverfahren mit Hilfe der Produkt-Primärverfahren-Matrix zugeordnet. Die Primärverfahren werden durch Verfahrensmodule detailliert. Für die Bildung der Verfahrensketten kommen die bereits beschriebenen Methoden nach FALLBÖHMER [Fal00] und TROMMER [Tro01] zum Einsatz. Hierbei empfiehlt sich die Verwendung von Wissensbasen. Das Resultat der Phase sind alternative Verfahrensketten.

Anpassung und Analyse der Verfahrensketten: In der nachfolgenden dritten Phase werden die Verfahrensketten entsprechend der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fertigungsverfahren angepasst. Einzelne Verfahren werden dabei eliminiert, substituiert oder ergänzt sowie unter Umständen die Reihenfolge angepasst. Hieraus entsteht die maximale Anzahl an produktspezifischen Verfahrensketten.

Bewertung und Auswahl von Verfahrensketten: Die Bewertung der einzelnen Verfahrensketten erfolgt mit Hilfe qualitativer und quantitativer Zeit- und Kostenbewertungen. Für die wirtschaftliche Bewertung werden die Fertigungskosten sowie längerfristige Aufwände betrachtet. Erstere werden mit Hilfe geschätzter, standardisierter, historisch ermittelter und berechneter Zeiten sowie den Maschinenstundensätzen unternehmensindividuell berechnet, letztere mit der Kapitalwertmethode. Die qualitative Bewertung erfolgt mittels einer Nutzwertanalyse. Das Ergebnis bildet die optimale Verfahrenskette für das betrachtete Produkt [Mül08].

Resümee

Die Methodik nach MÜLLER unterstützt grundsätzlich eine wechselseitige Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Die notwendige Strukturierung erfolgt unternehmensspezifisch und ist somit sehr aufwendig und nur unzureichend übertragbar. Die im Vorgehen erwähnten Produktsubelemente sind für die Phase der Konzipierung viel zu detailliert (bspw. Kühlbohrungen) und der Fokus der Gesamtmethodik liegt eher auf konventionellen Fertigungsverfahren. Nichtsdestotrotz ist der Ansatz der Produkt-Primärverfahren-Matrix sowie der Primärverfahren-Primärverfahren-Matrix zur Identifikation von Wechselwirkungen gut auf MIDs übertragbar. Insbesondere die Verfahrensabhängigkeiten lassen sich so ideal, auch unabhängig vom jeweiligen Produkt, abbilden und idealerweise in eine Wissensbasis überführen.

3.4.3 Auswahl von Fertigungstechnologien nach ASHBY

ASHBY beschreibt in seinem Buch „Materials Selection in Mechanical Design“ zwei sich stark ähnelnde Vorgehensweisen²² auf dem Gebiet der Auswahl von Werkstoffen und Fertigungstechnologien [Ash05]. Beide sind in Softwarewerkzeuge²³ überführt worden.

Die Grundlage des Verfahrens zur Auswahl von Fertigungstechnologien sind eine einheitliche Beschreibung und eine Taxonomie der Fertigungstechnologien. Die Fertigungstechnologien werden dabei in die drei Familien **Fügetechnologien**, **formgebende Technologien** und **Technologien zur Feinbearbeitung** eingeteilt. Die Familien enthalten Technologieklassen, deren Mitglieder die konkreten Technologien sind. Jede Technologie ist durch einen Technologiesteckbrief mit einem Satz vordefinierter Attribute wie fertigmachbare Material- und Gestaltklassen, maximale Bauteilmasse, die wirtschaftliche Losgröße etc. beschrieben [EA98]. Der Auswahlprozess erfolgt über einen Vergleich der Produkteigenschaften mit den Fähigkeiten der Fertigungstechnologien. Die vier Phasen, die bei der Auswahl durchlaufen werden, sind in Bild 3-17 dargestellt.

²² Aufgrund der starken Ähnlichkeit der Ansätze wird im Rahmen der Arbeit nur das Vorgehen zur Auswahl der Fertigungsprozesse vorgestellt.

²³ CES Selector ist eine PC-Anwendung, die es Materialexperten und Produktentwicklungsteams ermöglicht, Werkstoffkennwerte zu finden, zu untersuchen und anzuwenden (<http://www.grantadesign.com>).

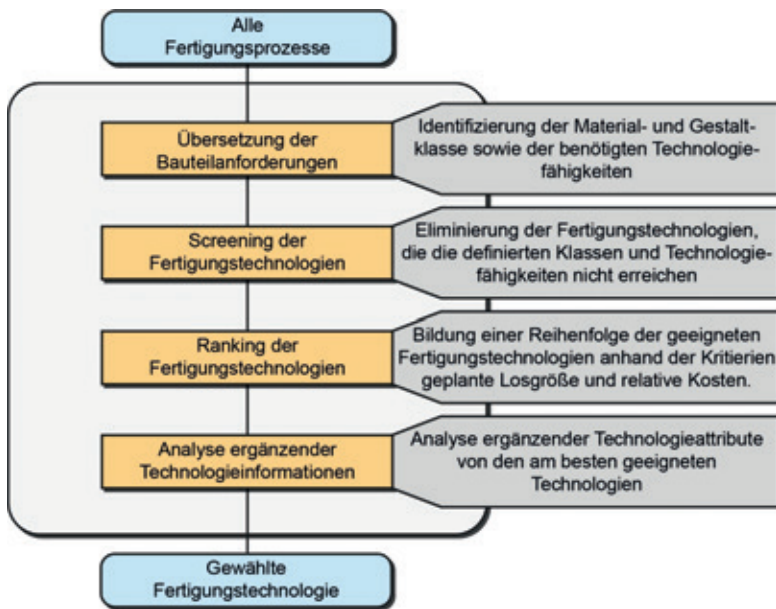


Bild 3-17: Vorgehen zur Auswahl von Fertigungstechnologien nach ASHBY [Ash05]

Übersetzung der Bauteilanforderungen: Das zu fertigende Bauteil wird in eine Material- und Gestaltklasse eingeteilt. Materialklassen sind beispielsweise Stähle, Nichteisenmetalle, Keramiken, Elastomere etc. Anschließend werden weitere Anforderungen an die Fertigungstechnologie definiert. Dazu zählen u. a. die geforderte Toleranz, die Bauteilgröße, das Bauteilgewicht. Ferner wird festgelegt, welche Zielgröße (Kosten, Qualität, Zeit) mit der Fertigungstechnologie maximiert oder minimiert werden soll [Ash05].

Screening der Fertigungstechnologien: Die Fertigungstechnologien, die die geforderten Anforderungen nicht erfüllen, werden systematisch ausgeschlossen. Als Hilfsmittel dienen zum einen Matrizen, die den Technologien die fertigen bzw. bearbeitbaren Werkstoff- bzw. Gestaltklassen gegenüberstellen. Zum anderen unterstützen Diagramme, in denen die Fähigkeitsbereiche der Technologien aufgetragen sind. Ein Beispiel ist das Technologie-Bauteilmasse-Diagramm zur Bestimmung der geeigneten Fertigungstechnologie anhand der Bauteilmasse. Weitere Diagramme beschreiben die Zusammenhänge zwischen Fertigungstechnologie und erreichbaren Wandstärken, Fertigungstoleranzen, Oberflächenrauigkeiten und wirtschaftlichen Losgrößen [Ash05]. Sie werden auch als Ashby-Diagramme bezeichnet. Bild 3-18 zeigt beispielhaft einen Auszug des Technologie-Bauteilmasse-Diagramms.

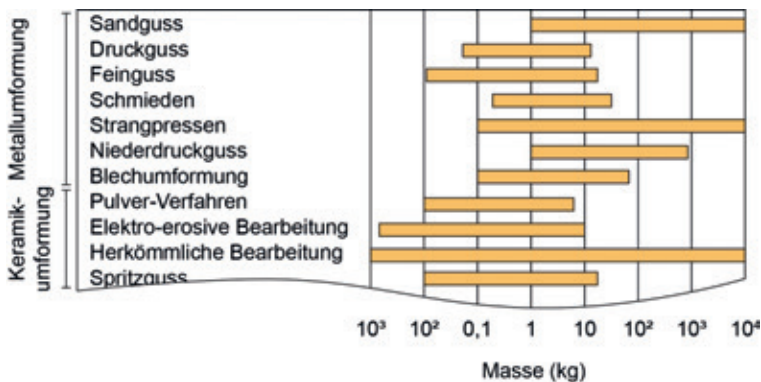


Bild 3-18: Auszug aus dem Technologie-Bauteilmasse-Diagramm nach ASHBY [Ash05]

Ranking der Fertigungstechnologien: Die nach dem Screening übriggebliebenen Fertigungstechnologien werden nach wirtschaftlichen Kriterien bewertet und in eine Rangfolge gebracht. Dazu soll der Entwickler vier einfache Kriterien berücksichtigen: **Standards verwenden, einfache Lösungen bevorzugen, Anwendung der „Design for Assembly“-Regeln** und **nicht mehr Leistungsfähigkeit als notwendig vorsehen**. Darüber hinaus existiert ein Diagramm, das den Zusammenhang zwischen Fertigungstechnologie und wirtschaftlicher Losgröße beschreibt [Ash05]

Analyse ergänzender Technologieinformationen: Mithilfe weiterer Informationen, wie bspw. zu Investitionskosten oder zum Energieverbrauch einer bestimmten Technologie, können die am besten geeigneten Fertigungstechnologien einer detaillierten wirtschaftlichen Bewertung unterzogen werden. Das Resultat dieses letzten Schrittes ist die gewählte Fertigungstechnologie [Ash05].

Das geschilderte Vorgehen lässt sich rechnerunterstützt weit effizienter durchführen als manuell. Dazu sind entsprechende Datenbanken mit den Informationen über die Fertigungstechnologien und Suchmaschinen notwendig. ASHBY ET AL. haben eine solche Software entwickelt und zu einem kommerziellen Werkzeug ausgebaut [EA98].

Resümee

Auswahlverfahren für Fertigungstechnologien stellen generell einen Vergleich zwischen Produktanforderungen und Technologiefähigkeiten her. Der Ansatz von ASHBY bildet da keine Ausnahme. Die Matrizen und Diagramme erlauben jedoch eine Eingrenzung möglicher Fertigungstechnologien bereits auf Basis weniger Bauteilmerkmale. Der Schritt des Technologiescreenings lässt sich in Kombination mit der materialspezifischen Methodik somit bereits frühzeitig anwenden. Auf diese Weise ermöglicht der Ansatz, insbesondere mit Hilfe der softwaretechnischen Umsetzung, auch frühzeitige Abschätzungen der Machbarkeit.

3.4.4 Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK

Die Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK ermöglicht die Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme. Ziel der Systematik ist, Produktentwickler und Fertigungsplaner frühzeitig bei der Erstellung erster Produktionssystemkonzepte zu unterstützen [Nor12]. Die Systematik umfasst ein Vorgehensmodell, eine Spezifikationstechnik und unterstützende Methoden. Das Vorgehen nach NORDSIEK ist in das generelle Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach GAUSEMEIER ET AL. [GDK+11] eingebettet und gliedert sich in drei Hauptphasen, die in Bild 3-19 verdeutlicht werden.

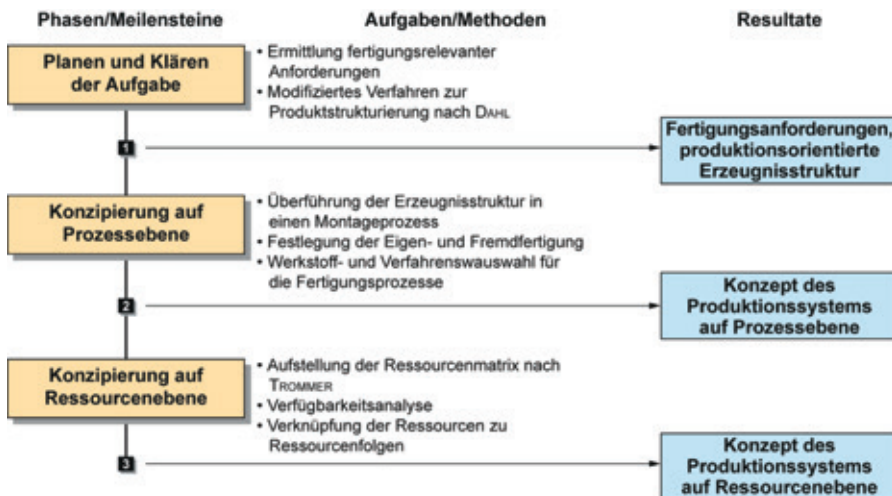


Bild 3-19: Vorgehen für die Konzipierung von Produktionssystemen nach Nordsiek [Nor12]

In den Hauptphasen werden folgende Resultate erzielt:

Planen und Klären der Aufgabe (des Produktionssystems): Den Ausgangspunkt der ersten Phase bildet das Produktkonzept. Zunächst wird die Anforderungsliste auf fertigungsrelevante Anforderungen reduziert. Basierend auf den Informationen aus der Wirkstruktur und der Gestalt des Produkts wird eine produktionsorientierte Erzeugnisstruktur abgeleitet. Hierzu verwendet NORDSIEK das Verfahren zur Produktstrukturierung nach [Dah90]. Die strukturellen Verbindungen gestaltbehafteter Systemelemente werden identifiziert und entsprechend der Funktionshierarchie strukturiert. Darauf aufbauend wird auf Basis der Anzahl der strukturellen Verbindungen der einzelnen Systemelemente die produktionsorientierte Erzeugnisgliederung erstellt.

Konzipierung auf Prozessebene: Die in der ersten Phase erzeugte produktionsorientierte Erzeugnisgliederung wird um lösungsneutrale Montagevorgänge ergänzt und in ei-

nen Montageprozess überführt. Danach werden die Systemelemente mithilfe eines Prüfschemas in Eigen- und Fremdfertigung unterteilt. Für die Elemente, die in Eigenfertigung erzeugt werden, werden die erforderlichen Fertigungsprozesse bestimmt. Die Auswahl erfolgt dabei in Anlehnung an die Methode zur Technologievorauswahl nach FALLBÖHMER [Fal00] in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung.

Konzipierung auf Ressourcenebene: Um frühzeitige Analysen (z.B. bzgl. Wirtschaftlichkeit) durchzuführen, werden die entsprechenden Ressourcen determiniert. Diese werden den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet. Die Auswahl geeigneter Ressourcen erfolgt auf Basis von Ressourcenmatrizen und ist an die Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen nach TROMMER angelehnt [Tro01]. Das Konzept auf Ressourcenebene bildet den Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung des Produktionssystems [Nor12.]

Das generelle Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach NORDSIEK wird in Bild 3-20 beschrieben.

Resümee

Die von NORDSIEK entwickelte Systematik erweitert die Entwicklungsmethodik für die Konzipierung mechatronischer Systeme. Die Basis bildet die Prinziplösung. Ausgehend davon werden Fertigungsverfahren ermittelt und die Bildung von Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen unterstützt. Die Funktionsorientierte Herangehensweise erlaubt eine Übertragung auf integrierte räumlich Schaltungsträger, auch wenn deren Entwicklung und Produktion nicht im Fokus der Systematik stehen. Des Weiteren enthält die Systematik von NORDSIEK einen Ansatz zur Bestimmung der Eigen- oder Fremdfertigung. Dies ist, insbesondere vor dem Hintergrund der für MID typischen verteilten Prozessketten, eine interessante Ergänzung.

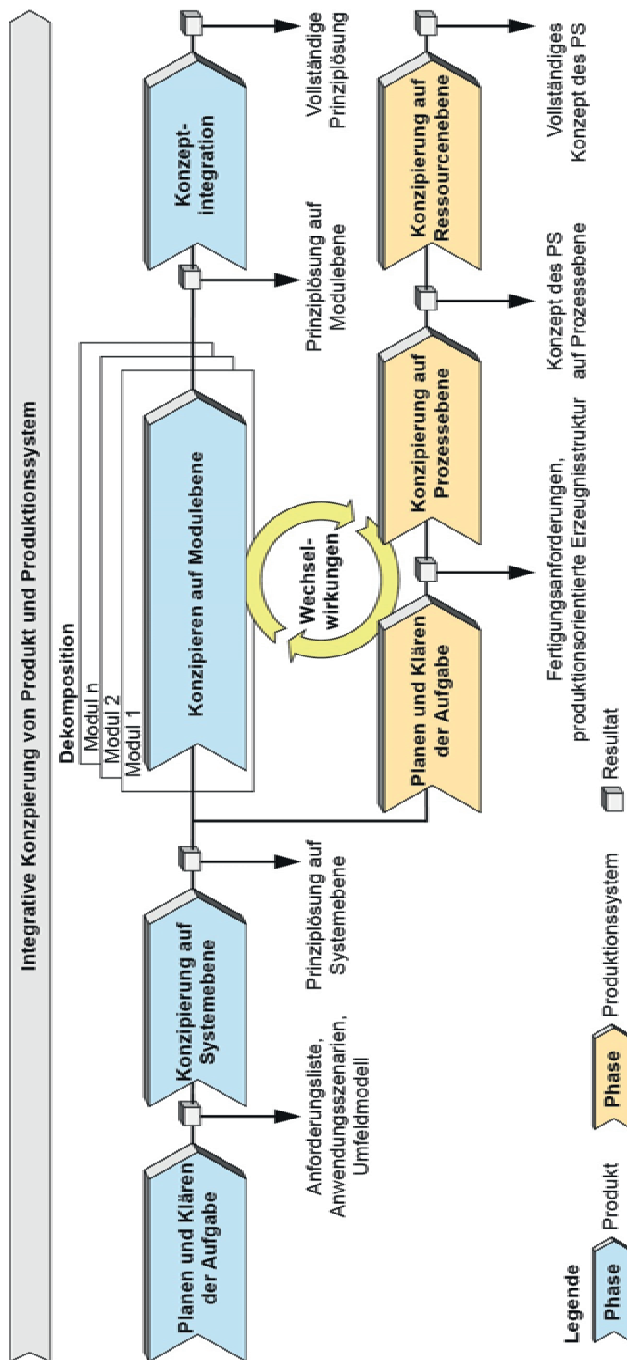


Bild 3-20: Generelles Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem [GDK+11], [Nor12], [Bra14]

3.4.5 Integrierte Planung von Fertigungssystemen nach STEIMER

Das Konzept zur integrierten Planung von Fertigungssystemen auf der Grundlage der frühen Phase der Produktentwicklung nach STEIMER stellt einen ersten Ansatz für eine integrierte Methodik dar, der auf bestehenden Ansätzen, wie dem von NORDSIEK aufbaut. STEIMER erweitert dafür den Betrachtungsgegenstand. Neben der Prinzipiellösung und der Baustruktur des Produkts rücken das **Fertigungsprogramm**, **Materialien** und **Anforderungen an die Fertigungslogistik** in den Fokus [SCA+16]:

Das **Fertigungsprogramm** als anerkannte Schnittstelle zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung definiert die Betriebsfähigkeit des Fertigungssystems. Vier Aspekte stehen im Fokus: Produktarten, Mengen, Referenzperioden und beabsichtigte Kosten. Die Produktarten bestimmen die Eigenschaften und die Abweichung der Teile, den Konfigurationspunkt für die kundenneutrale Teileherstellung und die geforderte Vielfalt an Fertigungsprozessen. Das Produktionsprogramm bestimmt einerseits die wirtschaftlichste Produktionsart (Fertigungsaufgabe) und andererseits das effizienteste Produktionsprinzip (Fertigungsstruktur, Funktionssysteme, Kapazitäten der Produktionsstätte). So beeinflussen die Merkmale des Produktionsprogramms die Funktionen, Abmessungen und Strukturen des Fertigungssystems stark. Insbesondere in den frühen Phasen bestimmen die Ausprägungen des Produktentwurfs die möglichen Fertigungsprozesse stark.

Die Kombination von **Materialien** und **Produktstruktur** einzelner Bauteile beschränkt die Abfolge von Vorgängen, die anwendbaren Technologien und entsprechende Maschinen für Produktion und Montage. Im Gegenzug beeinflussen Technologien und Maschinen die realisierte Produktqualität und bestimmen die erforderlichen Mess- und Prüfgeräte für ihre Inspektion. Hier besteht ein direkter Kompromiss zwischen angeforderter und realisierbarer Qualität, der die Notwendigkeit einer Koordination mit der Produktentwicklung beinhaltet.

Die **Anforderungen an die Fertigungslogistik** bilden ein wichtiges Bindeglied zwischen Produkt- und Produktionssystementwicklung. Ein wesentliches Designprinzip im Rahmen der Produktionssystementwicklung ist es, den Fertigungsfluss zu optimieren. Hier erfolgt eine Wechselbeziehung zwischen den logistischen Eigenschaften des Fertigungssystems und der Produktstruktur. Diese Wechselbeziehung bestimmt Prozessketten, Routingpläne, Materialflüsse, Layoutstrukturen, Durchlaufzeiten und Fertigungsflexibilität. Das bedeutet, die Logistik beeinflusst das konstruktive Produktdesign in Bezug auf ein fertigungsgerechtes Produktdesign und umgekehrt. Gleiches gilt für produktions- und montagegerechte sowie handhabungs- und automationsgerechte Konstruktionen.

Resümee

Das Konzept zur integrierten Planung von Fertigungssystemen nach STEIMER stellt ein erstes Konzept für eine erweiterte Methodik zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem dar. Gleichwohl ist das Konzept noch nicht final ausgearbeitet

und in eine Systematik überführt worden. Die Erweiterung des Betrachtungsgegenstands ist jedoch auch für die integrative Entwicklung von MIDs eine sinnvolle Ergänzung.

3.5 Handlungsbedarf

Die untersuchten Ansätze wurden jeweils mit den in Kapitel 2.7 aufgestellten Anforderungen verglichen. Im Folgenden wird die Bewertung je Anforderung zusammengefasst.

A1) Durchgängigkeit: Die allgemeinen Ansätze zur Entwicklung mechatronischer Systeme werden dieser Anforderung nach einer durchgehenden Herangehensweise gerecht. Fast alle weiteren Ansätze sind zum Teil für spezifische Problemstellungen entwickelt worden und adressieren nur Teilebereiche der Produktentstehung.

A2) Ganzheitlichkeit: Der Großteil der beschriebenen Ansätze berücksichtigt alle für den jeweiligen Produktentstehungsprozess beteiligten Faktoren. Insbesondere jedoch die MID-spezifischen Ansätze zur Produktentstehung adressieren entweder nur spezifische Phasen der Produktentstehung oder fokussieren definierte Fertigungstechnologien.

A3) Frühzeitige Analysen: Bei allen aufgezeigten Ansätzen zur Entwicklung mechatronischer Systeme gilt die grundsätzlich technische Machbarkeit als Grundvoraussetzung und wird daher nicht weiter adressiert. SCHUH schlägt daher bei neuen Technologien einen Technologieentwicklungsprozess vor, bei dem auch verstärkt Prototypen zum Einsatz kommen sollen. Insbesondere in der frühen Phase der Produktentwicklung können so Fehlentwicklungen vermieden werden. Die Forderung nach einer frühzeitigen Machbarkeitsanalyse wird daher nur unzureichend adressiert.

A4) Berücksichtigung der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem: Die meisten Ansätze sind im Kontext der klassischen Konstruktionsmethodik entwickelt worden und setzen zeitlich nach der Konzipierung ein. Insbesondere jedoch die Ansätze zur Technologiekettenbildung sind vor dem Hintergrund der zu entwickelnden Systematik von besonderem Interesse, adressieren jedoch nicht die spezifischen Herausforderungen integrativer Bauteile, wie sie bei MIDs üblich sind.

A5) Systematische Lösungssuche: Viele der aufgezeigten Ansätze unterstützen eine systematische Lösungssuche. Dabei wird jedoch zwischen kreativen Unterstützungsmethoden und abgelegtem Prozesswissen unterschieden. Vor dem Hintergrund der zu entwickelnden Systematik sind jedoch beide Herangehensweisen von Interesse. Die Ansätze, die auf einer Wissensbasis beruhen und somit die Technologiekettenbildung vereinfachen (beispielsweise TROMMER und ASHBY) lassen sich gut in unterstützende Tools implementieren. Sie berücksichtigen jedoch lediglich prozess- oder materialtechnische Einschränkungen, ohne den Produktentwickler bei der Gestaltung zu unterstützen. Deshalb muss die Produktgestalt in der Regel schon (grob) vorliegen. Die Ansätze, die die kreative Arbeit der Produktentwickler unterstützen und beispielsweise auf MID-Konstruktionselementen beruhen (vgl. PEITZ), berücksichtigen jedoch die fertigungstechnischen Restriktionen nicht ausreichend.

A6) Strategische Planung der Entwicklungsunterstützung mit Prototypen: Die wenigsten Ansätze unterstützen einen konsequenten zielgerichteten Einsatz von Prototypen im Produktentstehungsprozess, insbesondere in den frühen Phasen. Einzig die Ansätze, die spezifisch die generative Fertigung im Fokus haben, berücksichtigen dies (vgl. BREUNINGER ET AL.).

A7) Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl der Verfahren: Im Rahmen der Methoden zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem unterstützt nur ein Teil der Ansätze direkt bei der Verfahrensauswahl. Die Systematik nach NORDSIEK integriert viele bekannte Ansätze, beschränkt sich bei der Eigenfertigung und der entsprechenden Verfahrensauswahl jedoch eher auf klassisch maschinenbaulich geprägte Prozesse und Materialien

A8) Verständlichkeit: Von den untersuchten Ansätzen und Methoden sind die meisten gut zu erlernen und anzuwenden, ein entsprechendes Fachwissen vorausgesetzt.

A9) Rechnerunterstützung durch eine Wissensbasis: Von den untersuchten Ansätzen lassen sich insbesondere die Ansätze zur Technologiekettenbildung und -verwendung gut in eine Wissensbasis integrieren. Diese kann, wie beispielsweise bei ASHBY, auch direkt dem Anwender zur Verfügung gestellt werden.

A10) Anwendbarkeit auf MIDs: Einige der betrachteten Ansätze lassen sich auf räumliche Schaltungsträger anwenden oder wurden speziell dafür entwickelt. Insbesondere die Methoden zur integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem und die Ansätze zur Technologiekettenbildung sowie die Methoden zum Einsatz von Prototypen weisen hier Defizite auf.

Der Vergleich (Bild 3-21) zeigt, dass einige der untersuchten Ansätze eine Vielzahl der Anforderungen erfüllen, in anderen Bereichen allerdings auch ausgeprägte Defizite aufweisen. Der Ansatz nach NORDSIEK beispielsweise eignet sich gut für die integrative Produktionssystemkonzipierung in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Durch die Verwendung der Prozess- und Materialkataloge nach ASHBY werden jedoch für mechatronische Systeme wichtige Prozesse und Materialien nicht berücksichtigt. Defizite bestehen außerdem bei den Ansätzen zur Verwendung von Prototypen im Produktentstehungsprozess. Das agile Reagieren auf die Auswirkungen von generativ erzeugten Prototypen in einem spiralförmigen Produktentwicklungsprozess könnte hier einen interessanten Ansatz liefern. Es bleibt festzuhalten, dass keiner der Ansätze die gestellten Anforderungen vollumfänglich erfüllt und auch keine triviale Kombination der Ansätze den Anforderungen vollumfänglich genügt. Es besteht somit Handlungsbedarf, eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* zu entwickeln.

Bewertung der unter- suchten Ansätze hin- sichtlich der gestellten Anforderungen.		Anforderungen									
		Durchgängigkeit	Ganzheitlichkeit	Frühzeitige Analysen	Integr. Entw. v. P und PS	System. Lösungssuche	Strat. Planung	Verfahrensauswahl	Verständlichkeit	Rechnerunterstützung	Anwendbar auf MIDs
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Prototypen im PEP	KONDOH ET AL										
	KRAUSE										
	VDI 3404/3405										
	KÜCK ET AL										
Abschätzung der Machbarkeit	SCHUH										
	GOTH										
	wirtsch. Analysen										
	FRANKE										
Entwicklung mechatronischer Systeme	VDI 2221										
	VDI 2206										
	AVENARIUS										
	PEITZ										
	KAISER										
	WATTY										
	LEITFÄDEN										
	BREUNINGER										
Integrative Entwicklung von P und PS	DAHL										
	FALLBÖHMER										
	TROMMER										
	MÜLLER										
	ASHBY										
	NORDSIEK										
	STEIMER										

Bild 3-21: Bewertung des untersuchten Stands der Technik hinsichtlich der gestellten Anforderungen

4 Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID

Die Problemanalyse in Kapitel 2 hat aufgezeigt, dass die Entwicklung räumlicher Schaltungsträger eine komplexe Entwicklungsaufgabe ist. Insbesondere der Einsatz neuartiger generativer Technologien, wie sie für Prototypen eingesetzt werden können, erhöht den Grad der Komplexität (vgl. Kapitel 2.5). Grundlage einer jeden Produktentwicklung ist primär die Frage nach der grundsätzlichen technischen Machbarkeit. Bei technischen Systemen geht es dabei weniger um die Identifikation naturwissenschaftlicher Grenzen, sondern vielmehr um die Sicherstellung der prozesstechnischen Herstellbarkeit einer Produktidee. Aus der schier unendlichen Anzahl an Möglichkeiten sind diejenigen Verfahren auszuwählen, mit der die entsprechende Produktidee optimal umgesetzt werden kann. Hierzu werden nichtpassende Prozessschritte aus dem Lösungsraum eliminiert. Die verbleibenden Prozesse können dann mit den in Kapitel 3.3 beschriebenen Ansätzen zu Prozessketten zusammengesetzt werden.

Durch den beschränkten Lösungsraum, den die Fertigungstechnologien räumlicher Schaltungsträger aufspannen, und die jeweiligen spezifischen Charakteristika ist eine Identifikation passender Einzelprozesse bekannter Technologien und der damit einhergehenden Bewertung der Machbarkeit möglich. Aufbauend auf den grob abgeschätzten geeigneten Teilprozessen können darauf aufbauend kompatible Prozessketten für das Produktkonzept abgeleitet und in eine Rangfolge bezüglich der Eignung gebracht werden. Da nicht nur Standardtechnologien in den Suchraum einbezogen werden, sondern auch die für die Prototypenentwicklung vordringlichen generativen Fertigungstechnologien, werden diese als mögliche Lösungen im Rahmen der weiteren Konkretisierung mitgeführt. Es gilt, die passenden Prototypen mit den entsprechenden Prozessen zu fertigen, um so den Entwicklungsprozess des räumlichen Schaltungsträgers zu unterstützen.

Die Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID wird im Folgenden dargestellt. In Kapitel 4.1 wird der grundsätzliche Aufbau der Systematik erläutert. Kapitel 4.2 beschreibt die Grundlagen des Einsatzes von MID-Prototypen im Entwicklungsprozess. Die einzelnen Stufen der Systematik, die entsprechenden Vorgehensmodelle und die dafür benötigten Werkzeuge und Methoden werden in Kapitel 4.3 erläutert. In Kapitel 4.4 wird das erarbeitete Software-Tool MID-Plan erläutert. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 eine beispielhafte Anwendung der Systematik anhand des Anwendungsbeispiels MIDster.

4.1 Die Systematik im Überblick

Die *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* besteht aus drei Teilen. Sie hat den Anspruch, den in Kapitel 2 aufgeführten Handlungsfeldern gerecht zu werden und den Anwender beim Entwurf räumlicher Schaltungsträger in der Technologie MID systematisch zu unterstützen. Den Kern der Systematik bildet der frühzeitige Einsatz passender Prototypen im Produktentstehungsprozess von MIDs. Von besonderer Bedeutung ist die Auswahl des korrekten Verfahrens zu Herstellung der Prototypen. Die Systematik setzt sich wie folgt zusammen (Bild 4-1):

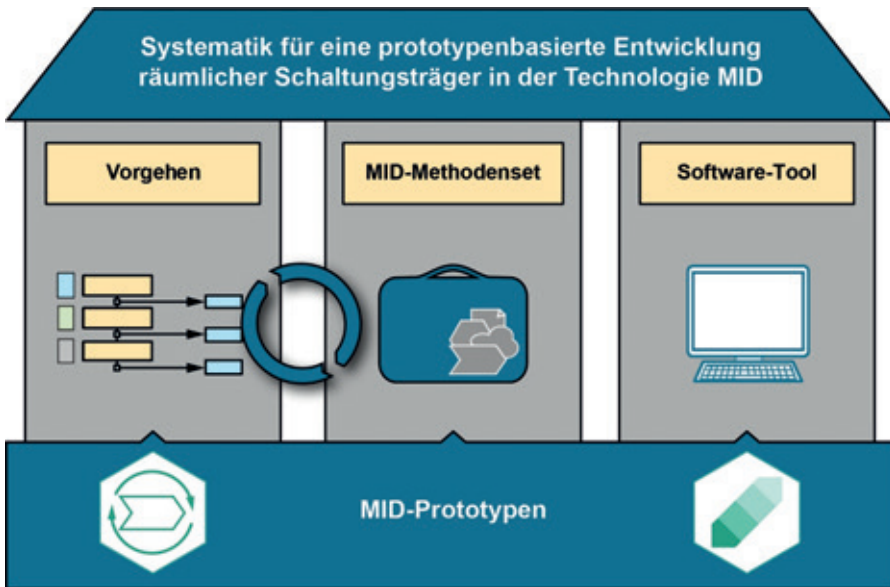


Bild 4-1: Aufbau der Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung räumlicher Schaltungsträger

Vorgehen: Vorgehensmodelle dienen als Leitfäden für die zielgerichtete Entwicklung. Das erste Vorgehensmodell (Stufe 1) deckt dabei die Phasen von der groben Produktidee bis hin zur Prüfung der Machbarkeit ab. Im Kern stehen dabei eine Randbedingungsanalyse (funktional und nichtfunktional) sowie ein Benchmark mit bestehenden Applikationen. Das zweite Vorgehensmodell (Stufe 2) beschreibt das Vorgehen zur detaillierten integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Das dritte Vorgehensmodell (Stufe 3) umfasst den Einsatz frühzeitiger Prototypen zur Eigenschaftsabsicherung von MIDs.

MID-Methodenset: Dieses unterstützt den Produktentstehungsprozess. Dabei sind sowohl methodische Aspekte, wie eine frühe Produktspezifikationen, als auch Werkzeuge

wie Verträglichkeitsmatrizen, erweiterte Konstruktionskataloge und MID-spezifische Prototypenklassen zu nennen, die im Anschluss erläutert werden.

Softwarebasiertes Planungstool: Das ermöglicht auch unerfahrenen Anwendern die Systematik zu nutzen. Hierzu werden die Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge in einer Wissensbasis abgelegt. Insbesondere die Schnittstelle zu bestehenden Wissensdatenbanken, wie der WebMIDIS-Datenbank²⁴ des 3-D MID e.V., wird sichergestellt.

Entscheidend für die Systematik ist das Wechselspiel der Vorgehensmodelle mit den erarbeiteten Werkzeugen und Methoden sowie der zielgerichtete Einsatz von Prototypen im Produktentstehungsprozess. Dies wird in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt.

4.2 MID-Prototypen

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, liegt der Fokus bei der Herstellung von MID-Prototypen auf der frühzeitigen und kostengünstigen Herstellung des Grundkörpers. Die hierfür geeigneten Prozesse werden in einem ersten Schritt in einen **erweiterten Referenzprozess** überführt. Das Wissen über die prozesstechnischen Möglichkeiten der Herstellverfahren und die Bedarfe für den entwicklungsbegleitenden Einsatz von Prototypen wird im Anschluss verdeutlicht.

4.2.1 Erweiterter Referenzprozess

Untersuchungen und Experteninterviews haben gezeigt, dass sich für die Herstellung des Grundkörpers insbesondere die Verfahren Halbzeugfräsen, verschiedene generative Verfahren sowie das Vakuumgießen eignen [AGF+12], [APR+10] [Fra13], [Got13], [Joh10], [Rem12], [SMG+12]. Beim Halbzeugfräsen wird ein zuvor extrudierter Grundkörper spanend bearbeitet und so in die gewünschte Form gebracht. Die generativen Verfahren Stereolithographie, selektives Lasersintern, Fused Deposition Modelling und Laminated Object Manufacturing zeichnen sich durch das schichtweise Auftragen des Materials aus. Demgegenüber wird beim Vakuumgießen eine Form, die in der Regel über einen Silikonabguss erstellt wurde, mittels eines Vakuuminfiltrationsprozesses mit Material gefüllt und anschließend ausgehärtet.

Zusätzlich zur Identifikation geeigneter Prozessketten reicht es bei den prototypenspezifischen Verfahren nicht mehr aus, nur die Basisverfahren zu kennen. Vielmehr müssen verfahrens- und anwendungsspezifische Prozessschritte zur Aufbereitung des Grundkörpers berücksichtigt und in die Prozesskettenbildung einbezogen werden. In einem ersten Schritt wird daher der Referenzprozess für räumliche Schaltungsträger um diese neuartigen Verfahren und Prozessschritte erweitert werden (Bild 4-2).

²⁴ Das WebMIDIS-System dient als zentraler Daten-Pool für Informationen zu MID-Applikationen, -Technologien sowie -Materialien. Es ist eine Weiterentwicklung der MIDIS-C-Datenbank [Pei08], <http://www.midis.3d-mid.de/>

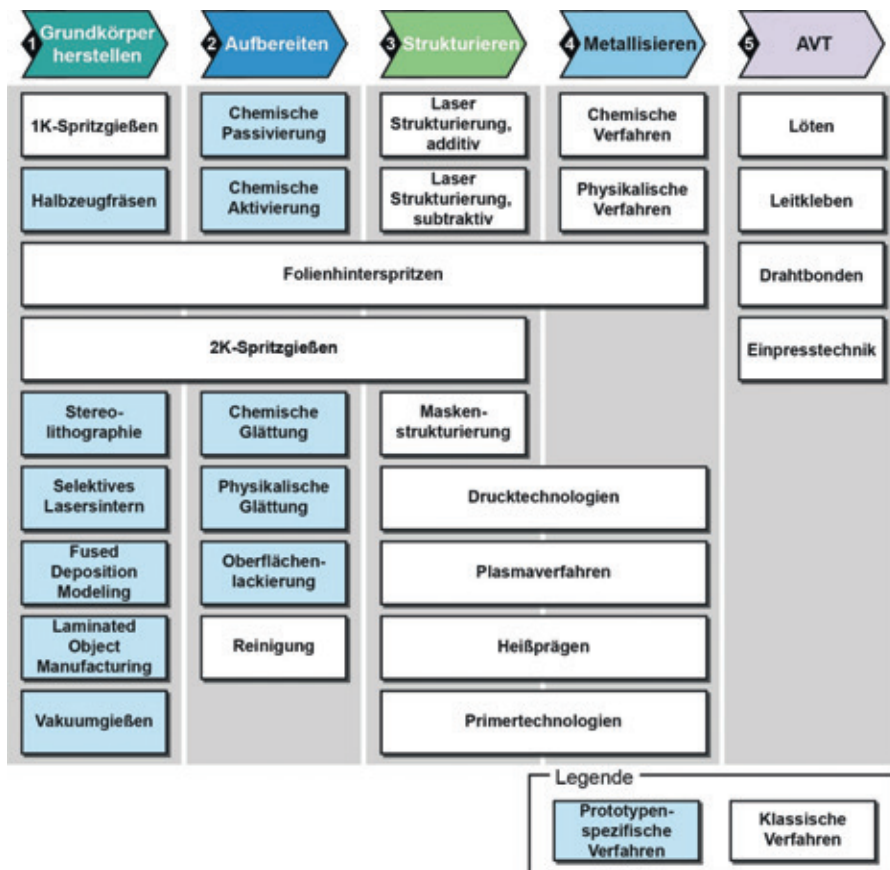


Bild 4-2: Erweiterter Referenzprozess für das MID-Prototyping [JFD16]

Je nach Prozess zur Herstellung des Grundkörpers, eingesetztem Material und beabsichtigtem Strukturierungs- bzw. Metallisierungsschritt müssen die Oberflächen passiviert, aktiviert, geglättet oder beschichtet werden, um die erforderliche Qualität der MID-Prozessflächen sicherzustellen und die nachgelagerten Prozesse zu ermöglichen. So wird beispielsweise eine chemische Passivierung bei der Verwendung von gefrästen LDS-Halbzeugen benötigt, um Fremdmetallisierungen zu vermeiden. Nicht LDS-fähige Halbzeuge müssen im Gegensatz dazu LDS-fähig werden, beispielsweise mittels ProtoPaint-Lackierung. Der Passivierungsschritt entfällt.

4.2.2 Entwicklungsbegleitende Prototypen

Die unterschiedlichen existierenden Produktentstehungsmodelle gliedern sich überwiegend in die Ideen-, Produktplanungs-, Konzeptentwicklungs-, Produktentwicklungs-,

Prototypenerprobungs- und Produktionsmittelentwicklungsphase [Geb13], [VDI2221], [VDI2206]. In der Regel ist allen Modellen gemein, dass ein intensives Wechselspiel zwischen der Entwicklungs- und der Eigenschaftsabsicherungsphase mit Prototypen beschrieben wird. Aufbauend auf dem Ansatz nach GEBHARD (vgl. Bild 2-10) bereits in den frühen Phasen erste Prototypen einzusetzen, ergibt sich für MIDs die Notwendigkeit eben diese zu charakterisieren und die entsprechenden Eigenschaftsabsicherungen vorzuziehen (Bild 4-3).

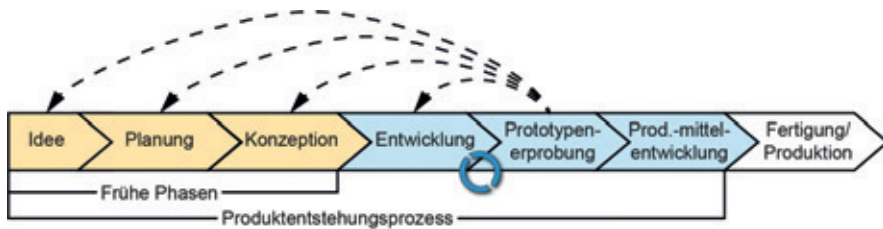


Bild 4-3: Vorziehen der prototypenbasierten Eigenschaftsabsicherung in Anlehnung an GEBHARDT [Geb13]

Unter Eigenschaftsabsicherung wird dabei die Bestätigung verschiedenster Produktanforderungen und Funktionalitäten verstanden. Hierbei kann es sich sowohl um erste geometrische Randbedingungen halten, die bspw. im Rahmen von Design-Thinking-Workshops zur Ideenfindung mit ersten einfachen Modellen abgesichert werden, als auch um konkrete seriennahe Muster zum Anlauf der Produktion.

Um MID-spezifische Prototypen sinnvoll entwicklungsbegleitend nutzen zu können, müssen im ersten Schritt die projektbegleitenden Randbedingungen und Meilensteine identifiziert werden. In der Regel lässt sich hieraus ableiten, dass unterschiedlich „reife“ Modelle in den verschiedenen Phasen der Produktentstehung benötigt werden. Programm- oder Projektmeilensteine wie Design-Freeze oder Start of Production (SOP) lassen bereits einen Rückschluss auf die geforderten entwicklungsbegleitenden Prototypen zu. So muss zum Design-Freeze die finale Gestalt vorliegen, je nach projektspezifischen Anforderungen auch die Positionierung der elektronischen Bauelemente. Zum Start der Produktion muss überdies das Serienmuster bereits umgesetzt worden sein. Branchenspezifische Forderungen (A-, B-, und C-Muster in der Automobilindustrie) wirken ergänzend. Für MIDs gilt darüber hinaus, dass beispielsweise während der Integration der mechanischen und elektronischen Komponenten unter Umständen diverse Prototypen erzeugt werden, um das Konzept zu validieren. Auch Funktionsmuster zur Validierung der elektronischen und mechanischen Funktionen sind vor Anfertigung des Serienmusters notwendig.

Neben den projektbegleitenden Anforderungen sind die **produktspezifischen Anforderungen** an die Eigenschaftsabsicherung der Produktentwicklung mit Prototypen zu ermitteln. In den Produktanforderungen werden dabei häufig Richtlinien und Methoden genannt, mit deren Hilfe die Produktzuverlässigkeit nachgewiesen werden kann bzw. muss.

Diese werden nach Branche und Projekt unterschieden. Zur frühzeitigen Primäridentifikation kritischer Komponenten eignet sich beispielsweise eine FMEA²⁵, für detailliertere Tests ein Highly Accelerated Life Test (HALT)²⁶. Hierfür ist jedoch bereits ein seriennahes Muster notwendig. Da die Zuverlässigkeitsidentifikation nicht im Fokus dieser Arbeit steht, sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, wie beispielsweise die VDI 4003 Zuverlässigkeitsmanagement oder MID-spezifische Ansätze von GOTH und GRÖTZINGER [VDI4003], [Got13] und [Grö15].

4.2.3 MID-Prototypenklassen

Um nun den verschiedenen Phasen der Produktentstehung geeignete Prototypenprozesskonzepte zuzuordnen wurde eine Klassifikation erarbeitet. Diese orientiert sich an den bestehenden Modellen von GEBHARDT und KÜCK ET AL. ([Geb13], [Fra13]), ist aber detaillierter hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen aufgebaut. Darüber hinaus sieht das Modell branchenspezifische Erweiterungen vor.

Um die Anforderungen an eine MID-Klassifikation zu ermitteln, sind im ersten Schritt die Wechselwirkungen von Produktentwicklung und -fertigung systematisch aufgezeigt worden. Hierzu wurde eine Matrix erstellt, die diese Wechselwirkungen abbildet (Tabelle A-1). Der Werkstoffidentifikation und -auswahl kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da insbesondere die thermischen und chemischen Eigenschaften des Werkstoffes den nachfolgenden Prozess signifikant beeinflussen.

Ausgehend von den spezifischen Anforderungen an das MID-Prototyping (vgl. Kapitel 2.5) wurden die vier allgemeinen MID-Prototypenklassen **Geometriemuster**, **Konzeptmuster**, **Funktionsmuster** und **Serienmuster** abgeleitet, die die identifizierten Wechselwirkungen berücksichtigen. Die einzelnen Prototypenklassen stellen alle wesentlichen Ergebnisse heraus, die der jeweilige Prototyp zu diesem Zeitpunkt erfüllen muss bzw. welche Erkenntnisse mittels der Prototypen validiert werden können. Abgerundet werden die Modellklassen durch eine Zuweisung geeigneter Herstellverfahren. Die dabei auftretenden Restriktionen oder bei der Gestaltung zu berücksichtigende Maßnahmen werden ebenfalls dargestellt. Bild 4-4 veranschaulicht den allgemeinen Aufbau der MID-Prototypenklassen und die daraus aggregierten Steckbriefe.

²⁵ Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ist eine analytische Methode der Zuverlässigkeitstechnik. Dabei werden mögliche Produktfehler hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Kunden, ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrer Entdeckungswahrscheinlichkeit mit jeweils einer Kennzahl bewertet [DIN60812].

²⁶ Ein Highly Accelerated Life Test (HALT) ist ein qualitatives Testverfahren mit dem Ziel, vorzugsweise elektronische und elektromechanische Baugruppen noch im Entwicklungsstadium einer beschleunigten Alterung auszusetzen, um Schwachstellen und Designfehler aufzudecken.

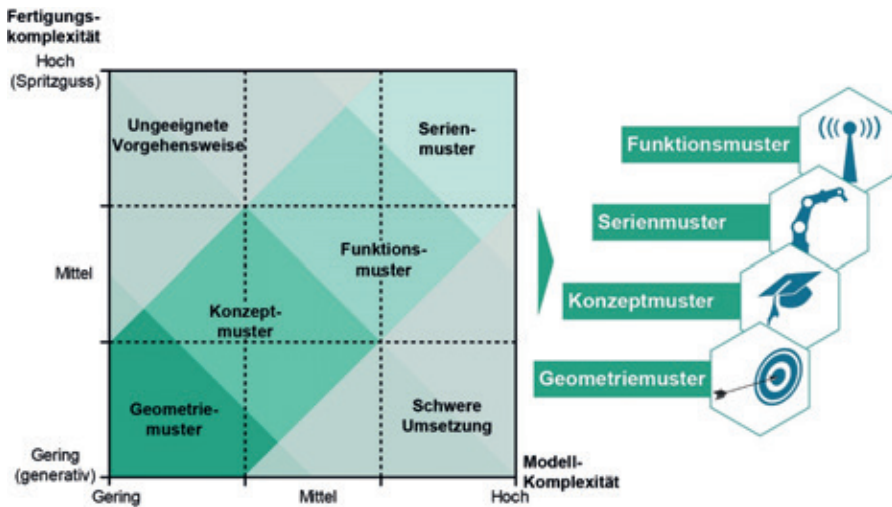


Bild 4-4: Aufbau und Gliederung der allgemeinen MID-Prototypenklassen

Die einzelnen Prototypenklassen sind in steigende **Modell- und Fertigungskomplexität** eingeteilt. Es existieren zwei Zonen in denen keine Prototypenklassen vorliegen. Die erste Zone (oben links) stellt einfache Modellklassen dar, die aufwendig zu fertigen sind. Der hohe Änderungsaufwand und die dabei entstehenden Mehrkosten sind für das Prototyping ungeeignet. Die zweite Zone (unten rechts) beschreibt komplexe Modellklassen, die mit wenig Aufwand gefertigt werden können. Die zu erzielende Komplexität ist jedoch in der Regel durch das verwendete Herstellverfahren begrenzt. Generative Verfahren können zwar einen hohen Grad an mechanischer Komplexität abbilden, für mechatronisch integrierte Prototypen sind jedoch weitere Fertigungsschritte erforderlich.

Die Alleinstellungsmerkmale der Prototypenklassen wurden in Steckbriefen zusammengefasst (Anhang A-4). Diese beinhalten außerdem eine Auflistung der Ergebnisse und Erkenntnisse, die mittels des Prototypens erzielt werden können. Ebenso erfolgt eine qualitative Bewertung des Prototyps. Anhand einer Skala werden die wesentlichen Merkmale der Klasse beurteilt und eingeordnet. Abgeschlossen wird jeder Steckbrief durch die Angabe der zur Verfügung stehenden Herstellverfahren und die dabei zu berücksichtigenden Maßnahmen und Restriktionen. Diese werden um anzuwendende Test- und Prüfverfahren sowie den erforderlichen Gestaltungsrichtlinien ergänzt.

4.2.3.1 Geometriemuster

Das Geometriemuster ist das einfachste Muster und verfügt über keine mechanischen oder elektrischen Funktionen. Es dient lediglich zur Bewertung und Veranschaulichung der geometrischen Struktur der MID-Applikation. Die Dimensionierung der äußeren Form sowie die Ausrichtung der Prozessflächen kann anhand von Einbaustudien verifiziert werden. Darüber hinaus sind Potentiale der Miniaturisierung und Systemintegration

zu bewerten und als Entscheidungsträger für den weiteren Entwicklungsprozess zu verwenden.

Mithilfe des Geometriemusters ist die Machbarkeit für die Leiterbahngestaltung und die AVT zu verifizieren. Dabei kann im ersten Schritt die Zugänglichkeit zu allen Prozessflächen festgestellt werden. Sowohl das Lasersystem für die Laserstrukturierung als auch die Werkzeuge zum Auftragen des Verbindungsmediums und zur Bestückung müssen einen uneingeschränkten Zugriff auf die entsprechenden Prozessflächen besitzen. Dafür sind unter anderem die vorgesehenen Halterungsflächen zu überprüfen. Das Muster ist in den vorgesehenen Positionen sicher zu fixieren und die Prozessflächen dürfen beim Umspannen nicht beschädigt werden. Die korrekte Ausrichtung der Prozessflächen zum Werkzeug kann anhand von Einbaustudien validiert werden. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse sind ggf. die Prozessflächen, die Halterungsflächen oder störende Bereiche anzupassen. Zudem kann bereits ein geeignetes Werkzeug zum Auftragen des Verbindungsmediums sowie zur Bestückung definiert werden.

Im nächsten Schritt sind erste Aussagen über die Leiterbahngestaltung und den Zusammenbau zu treffen. Beim Leiterbild ist auf die korrekte Platzierung aller Kontaktflächen auf den entsprechenden Funktionsflächen zu achten. Zudem sollte sich die Leiterbahnführung bereits an den LDS-Designrichtlinien orientieren. Die vollständige Verifikation der Leiterbahngestaltung erfolgt jedoch erst mit dem Konzeptmuster bzw. Funktionsmuster. Anhand von Zusammenbaustudien sind die Machbarkeit der Bestückung und die Montage der elektronischen Bauelemente zu bewerten. Dabei ist beispielsweise der Winkel des Bestückungswerkzeugs zur Prozessfläche oder der Abstand zu Wandungen zu bewerten. Zusätzlich sollte bereits eine Montagereihenfolge festgelegt werden. Die korrekte Ausrichtung und Positionierung aller Bauelemente ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht entscheidend.

Für die Herstellung des Grundkörpers stehen generative Verfahren zur Auswahl. Auf die Verwendung des Serienwerkstoffs kann verzichtet werden. An die Genauigkeit und Maßhaltigkeit des Körpers sind zu diesem Zeitpunkt noch keine Anforderungen gestellt. Aus diesem Grund brauchen Toleranzen bzgl. der Oberflächengüte nicht eingehalten werden. Das Herstellverfahren des Grundkörpers ist anhand der gestellten Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Kosten und Weiterentwicklungsmöglichkeiten auszuwählen. Auch wenn das Geometriemuster keine hohen Anforderungen an die Genauigkeit des Grundkörpers stellt, ist ein Verfahren auszuwählen, das im Laufe des Prototypings weiterverwendet werden kann und keinen nachträglichen Wechsel verlangt. Hier empfiehlt sich ein Abgleich mit den produktindividuellen Prozessketten der vorangegangenen Phasen. Für hochgenaue Prototypen ist bspw. die Stereolithografie zu bevorzugen. Bei der Planung des Grundkörpers ist eine geeignete Aufbaurichtung vorzusehen, um im weiteren Verlauf die bestmögliche Genauigkeit bzgl. Prozessflächen und Bohrungen zu gewährleisten. Der Stufeneffekt innerhalb von Prozessflächen ist zu vermeiden (vgl. Kapitel 2.5.2). Darüber hinaus sind die Möglichkeiten zur Reinigung des Grundkörpers bzgl. der Zugänglichkeit und der Abflussmöglichkeiten zu überprüfen. Das Leiterbahnlayout kann

manuell aufgemalt, geklebt oder mittels Bedrucken dargestellt werden. Die Leiterbahnen erfüllen keine elektrischen Funktionen, sondern dienen lediglich der optischen Verifikation des Schaltungslayouts und als Vorgabe für die Bestückung der elektronischen Bauelemente. Aus diesem Grund ist keine Metallisierung oder eine Behandlung mit Protopaint LDS Lack notwendig. Die elektronischen Bauelemente sind aufzukleben. Dabei ist die Haftbarkeit oder die Wahl des Klebstoffs nicht von besonderer Bedeutung. Die Bauelemente erfüllen keine Funktion und sollen nur die Machbarkeit der Bestückung verifizieren. Die wesentlichen Informationen des Geometriemusters sind in einem Steckbrief zusammengefasst (Bild A-14 und A-15). Bild 4-5 verdeutlicht beispielhaft das Aussehen des Steckbriefs.

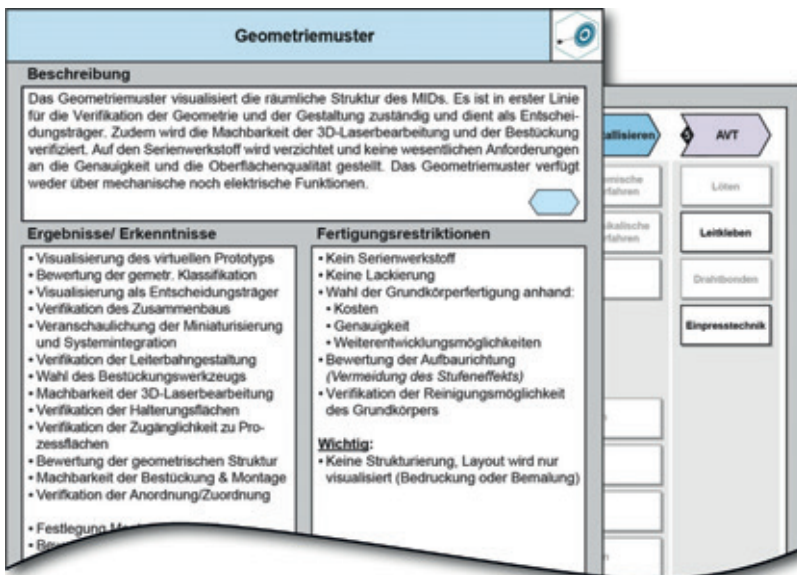


Bild 4-5: Aufbau und Gliederung der allgemeinen MID-Prototypenklassen

4.2.3.2 Konzeptmuster

Im Gegensatz zum Geometriemuster ist der Einsatz des Serienwerkstoffs beim Konzeptmuster zwingend erforderlich. Es sind Teilfunktionen und wichtige Eigenschaften zu überprüfen, die das Material der MID-Baugruppe betreffen. Auf die vollständige Darstellung der Geometrie kann weitestgehend verzichtet werden. Je nach zu prüfenden Eigenschaften kann eine teilweise Darstellung der relevanten Prozessflächen genügen.

In erster Linie sind mit dem Konzeptmuster wesentliche Eigenschaften zu überprüfen, die das verwendete Material betreffen. Der Schwerpunkt liegt vor allem auf der Überprüfung sämtlicher thermischer, elektrischer und chemischer Eigenschaften. Durch die generative Herstellung des Grundkörpers können mechanische Eigenschaften, wie Steifigkeit und

Festigkeit nur eingeschränkt getestet werden. Die Bewertung dieser Eigenschaften ist bei der Verwendung von Spritzgusswerkzeugen nachzuholen. Für die Überprüfung der werkstofflichen Eigenschaften können bereits existierende Test- und Prüfverfahren übernommen werden. Die Testergebnisse sollen den ausgewählten Werkstoff als Serienwerkstoff qualifizieren. Die Verfahren umfassen dabei unter anderem Tests zu Lang- und Kurzzeitbelastungen, Temperaturwechsel, Vibrations- und Schockbeanspruchung, chemische Belastungen, elektrische Eigenschaften und Umwelttests.

Mittels der Test- und Prüfverfahren können bereits erste Einschätzungen über die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit des Endprodukts getätigt werden. Darüber hinaus wird die Materialkompatibilität bzgl. Beständigkeit oder Biokompatibilität verifiziert. Weitere Fragestellungen hinsichtlich spezifischer Eigenschaften, z.B. Entwärmung oder Feuchteverhalten, sind mithilfe des Konzeptmusters überprüfbar.

Neben der Überprüfung der direkten werkstofflichen Eigenschaften sind weitere Eigenschaften zu verifizieren, die vom eingesetzten Material abhängig sind. Aus den bereits gewonnen Erkenntnissen über den Werkstoff, die festgelegten Belastungsformen und der im Geometriemuster verifizierten äußerlichen Geometrie sind kritische Bereiche zu definieren, die hohe Anforderungen an weitere Prozessschritte stellen. Diese betreffen in erster Linie die Metallisierung und die AVT. Für die Metallisierung sind Bewertungen über die Haftfestigkeit, Schichtstärke und Strombelastbarkeit der Metallschichten durchzuführen. Eine partielle Metallisierung ist für diesen Zweck in der Regel ausreichend. Für die Bewertung der Haftfestigkeit stehen Verfahren wie Schäl- und Stirnabzugstests zur Verfügung. Zusätzlich ist die Lötbarkeit des Materials und der Metallschichten zu bewerten. Dies ist notwendig, um ein etwaiges Reflowlöten für den weiteren Prozess zu qualifizieren. Dabei sind die definierten kritischen Bereiche hinsichtlich thermischer Belastungen zu berücksichtigen. Die Bewertung der Lötbarkeit ist am Serienwerkstoff aus dem Serienverfahren durchzuführen, da generative Körper aufgrund der geringen Wärmebeständigkeit keine qualitative Aussage zulassen.

Darüber hinaus sind die Laserstrukturierung und das Leiterbahndesign zu bewerten. Die verwendeten Laserparameter sind auf Zugänglichkeit und Einfallswinkel zu überprüfen und ggf. anzupassen. Die Leiterbahnführung ist mit der Oberflächengestaltung abzustimmen. Hierzu sind im Wesentlichen die LDS-Designrichtlinien einzubeziehen. Vor allem Leiterbahnen in der Nähe von Kanten und Wandungen sowie Kontaktflächen sind ausführlich zu bewerten und bei auftretenden Wechselwirkungen anzupassen.

Im weiteren Verlauf ist die AVT zu beurteilen. Dafür sind zum einen die Anordnung und die Verteilung der Bauelemente zu überprüfen. Für diesen Zweck sind kritische Bereiche miteinzubeziehen. Die Überprüfung dieser Bereiche benötigt nicht die gesamte Darstellung der Geometrie. Zudem können erste Prüfverfahren in Bereichen, die eine hohe Genauigkeit bzgl. Ausrichtung und Positionierung erfordern, durchgeführt werden. Für diesen Zweck stehen optische Prüfverfahren zur Verfügung. Die geforderte Genauigkeit

wird in der Regel noch nicht vollständig erfüllt, jedoch können Aussagen über die Möglichkeiten und Maßnahmen der AVT getätigt werden. Zum anderen ist das zu verwendende Verbindungsmedium auszuwählen und zu testen. Dies sollte im Anschluss an die Lötbarkeitsbewertung erfolgen, um das Verbindungsverfahren für den weiteren Verlauf des Prototypings festzulegen. Zusätzlich kann die exakte Dosierung des Mediums bestimmt werden.

Für die Grundkörperfertigung stehen analog zum Geometriemuster generative Fertigungsverfahren zur Verfügung. Diese werden durch den Prozess Halbzeug-Fräsen und die Adaption von Serienprodukten aus dem Serienwerkstoff ergänzt. Bei Letzterem werden bereits verfügbare Produkte für das Prototyping modifiziert. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, Tests am Originalwerkstoff durchzuführen, die mit Serienverfahren hergestellt worden sind. Das Konzeptmuster erfordert eine höhere Genauigkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität des Grundkörpers, um die Strukturierung, Metallisierung und AVT bereits qualitativ bewerten zu können. In kritischen Bereichen müssen die Wand- bzw. Schichtstärken ggfs. angepasst werden. Bei der Verwendung von generativen Verfahren ist für Untersuchungen der Strukturierung, Metallisierung und AVT eine Behandlung mit ProtoPaint LDS Lack notwendig. Für die AVT stehen Kleb- und Lötverfahren zur Verfügung. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens ist mit dem Konzeptmuster zu qualifizieren. In dem Steckbrief sind die wesentlichen Informationen zum Konzeptmuster zusammengefasst (Bild A-16 und A-17).

4.2.3.3 Funktionsmuster

Das Funktionsmuster stellt die vollständige Geometrie und Funktionalität des Serienprodukts dar. Es beinhaltet wesentliche Erkenntnisse des Geometriemusters und des Konzeptmusters. Die zu erzielenden Ergebnisse sollen einen hohen Detaillierungsgrad und eine hohe Aussagekraft besitzen. Mit dem Funktionsmuster werden abschließende Bewertungen zur Strukturierung, Metallisierung und AVT durchgeführt. Dabei sind vor allem endgültige Aussagen über die Positions- und Ausrichtungsgenauigkeit der elektronischen Bauelemente sowie Dosierungs- und Benetzungseigenschaften des Verbindungsmediums zu gewinnen. Für diesen Zweck können Montagerichtlinien von Leiterplatten herangezogen werden. Mit der vollständigen Bestückung des Prototyps sind zudem abschließende Bewertungen des Werkstoffs durchzuführen. Daher ist es empfehlenswert, den Serienwerkstoff einzusetzen, auch wenn darauf aufgrund niedriger thermischer Ansprüche verzichtet werden kann. Die finalen thermischen und mechanischen Belastungen sind zu bestimmen und mit der Eignung des bisher ausgelegten Musters abzugleichen. Dafür sind erste Tests unter realen Bedingungen durchzuführen.

Für die Fertigung des Grundkörpers im Funktionsmuster können je nach eingesetztem Verfahren Einschränkungen hinsichtlich der mechanischen Festigkeit oder der thermischen Belastbarkeit hingenommen werden. Jedoch werden an die Einhaltung der Genauigkeit und Oberflächenqualität die höchsten Anforderungen gestellt. Die Toleranzen, wie

beispielsweise die Abweichung der Oberflächenrauheit der Prozessflächen von maximal 50 µm sind einzuhalten. Folglich sind für das Funktionsmuster generative Verfahren weniger geeignet. Dies betrifft insbesondere das Fused Deposition Modeling (vgl. Kapitel 2.5.2.1). Im Hinblick auf das Serienmuster ist ein Wechsel auf den in der Regel serienmäßig eingesetzten Spritzguss einzuleiten. Der Wechsel sollte nach dem Abschluss aller gestaltungsbestimmenden Bewertungen erfolgen, um die Gestaltspezifikationen „einzufrieren“ (Design-Freeze). Zu diesem Zeitpunkt des Prototypings sind Spritzgusseinsätze aus Aluminium, nicht gehärtetem Stahl oder aus generativen Verfahren anwendbar (vgl. Kapitel 2.5.2.3). Die Gestaltung des Grundkörpers ist jedoch unter Umständen an das veränderte Herstellverfahren anzupassen. Dies betrifft in erster Linie das Fließ- und Verzugverhalten des Werkstoffs sowie Zugänglichkeits- und Entformungsmaßnahmen. Die ersten spritzgegossenen Muster sind zudem auf die erzielte Wandstärke und Ausformung der Kanten und Ecken zu überprüfen. Für die Bestückung der elektronischen Bauelemente können erste automatisierte Prozesse entwickelt und getestet werden. Bild A-18 und A-19 zeigen den Steckbrief für das Funktionsmuster.

4.2.3.4 Serienmuster

Das Serienmuster entspricht dem späteren Endprodukt und darf sich in keinem wesentlichen Merkmal von diesem unterscheiden. Mit den Ergebnissen des Serienmusters wird das neue Produkt qualifiziert und die Vorserienfertigung freigegeben.

Das Serienmuster wird mit dem Serienwerkstoff in der Regel per Spritzguss hergestellt. Dabei sind höchste Anforderungen an die Genauigkeit, Oberflächengüte und Maßhaltigkeit zu erfüllen, weshalb nur noch Einsätze aus gehärtetem und nicht gehärtetem Stahl zulässig sind. Alle werkstofflichen Eigenschaften sowie Forderungen an die Strukturierung der Leiterbahnen, die Metallisierung und die AVT sind vollständig abzubilden. Hinsichtlich der AVT ist der Automatisierungsprozess für die Bestückung der Bauelemente zu verifizieren. Die Validierung des Serienmusters ist direkt beim Anwender oder unter vollständiger Simulation der realen Bedingungen durchzuführen. Dabei sind alle Komponenten und Eigenschaften ausführlich zu analysieren.

Die Herstellung des Grundkörpers erfolgt bei den gängigen Verfahren als Spritzguss (mit Ausnahme des Folienhinterspritzens). Das Spritzgusswerkzeug kann zu Beginn des Serienmusters mit nur einer Kavität ausgeführt werden und im weiteren Verlauf mit weiteren Kavitäten aufgerüstet werden. Die Bestückung und das Auftragen des Verbindungsmediums können je nach Komplexität des MID-Bauteils und dem Stand des Automatisierungsprozesses manuell oder automatisch erfolgen. Jedoch sollte zum Ende des Prototypings der Prozess, insbesondere bei hohen Stückzahlen, weitestgehend automatisiert sein.

Serienmuster besitzen von allen Prototypenklassen den höchsten Detaillierungsgrad und die höchste Aussagekraft. Sie erfordern dafür den höchsten Zeitbedarf und die höchsten Kosten in der Herstellung. Um nachträgliche Änderungen am Design und Werkzeug zu

vermeiden, ist daher der „Design-Freeze“ im Funktionsmuster von enormer Bedeutung. Der Steckbrief des Serienmusters wird in den Bildern A-20 und A-21 dargestellt.

Geometriemuster eignen sich bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung, bspw. zur Unterstützung des Design-Thinking, können aber, je nach Ausbaustufe auch zur ersten Absicherung der Gestalt in der Konzeptions- oder Entwicklungsphase genutzt werden. **Konzeptmuster** unterstützen den Übergang von der Konzeption in die Entwicklung. **Funktionsmuster** hingegen eignen sich für die Unterstützung des Übergangs von den frühen Phasen der Entwicklung bis hinein in die Prototypenerprobung, ohne direkt auf Serienwerkzeuge und Produktionsverfahren angewiesen zu sein. Die **Serienmuster** bilden den Abschluss der prototypenbasierten Entwicklung, da auf deren Basis die finale Produktion eingeleitet wird (Bild 4-6).

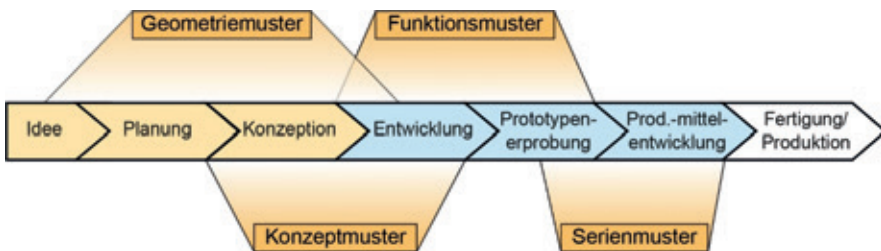


Bild 4-6: Verortung der MID-Prototypenklassen

Der Übergang der einzelnen Prototypenklassen kann fließend erfolgen. Bestimmend sind hierfür die notwendigen Technologiewechsel, entsprechend der spezifischen Produktanforderungen und den sich daraus ergebenden abzusichernden Eigenschaften.

4.2.3.5 Branchenspezifische Erweiterung

Branchenspezifische Besonderheiten erfordern eine individuelle Anpassung der allgemeinen Prototypenklassen, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. Zu diesem Zweck sind Beiblätter erarbeitet worden, die die Besonderheiten der Branchen *Automobilbau*, *Medizintechnik* sowie *IT und Telekommunikation* berücksichtigen. Diese dienen als Ergänzung zu den bestehenden allgemeinen MID-Prototypenklassen und erweitern bzw. reduzieren deren Aspekte. Ihre Herleitung wird am **Beispiel des Automobilbaus** kurz erläutert.

Die erhöhten Anforderungen der Automobilindustrie hinsichtlich Zuverlässigkeit führen auch bei konventionellen Applikationen zu einem hohen Test- und Validierungsaufwand. Für räumlich integrierte mechatronische Systeme gilt dies umso mehr, da zur Validierung in der Regel Test- und Prüfverfahren aus den beteiligten Domänen als Referenz angelegt werden. Diese berücksichtigen jedoch häufig nicht die spezifischen Bedürfnisse der MID-Technologie.

Für die Prototypenklassen bedeutet dies eine notwendige Anpassung. Im Betriebszustand ist das Auto ein dynamisches System. Dabei können Beschleunigungen von bis zu 100g auf die MID-Applikation einwirken. Es entstehen Schwingungen in einem breiten Frequenzbereich. Der verwendete Werkstoff ist daher hinsichtlich der deutlich erhöhten Belastungen auszuwählen. Für das MID-Prototyping sind bestehende Tests aus der Automobilbranche zu übernehmen und zu den bestehenden Test- und Prüfverfahren hinzuzufügen [ISO1675]. Es gilt, die Stoß- und Vibrationsfestigkeit des Bauteils nachzuweisen und die Resonanzfrequenz zu ermitteln. Der Resonanzbereich sollte im Betriebszustand zwingend vermieden werden, um einer Beschädigung des MID vorzubeugen. Die wesentlichen Erkenntnisse werden mit dem Konzeptmuster gewonnen. Das Konzeptmuster wird für diesen Zweck um Testreihen am Fahrzeug bzw. am Prüfstand erweitert. Der Grundgedanke des Total Quality Managements (TQM) und der funktionalen Sicherheit für elektronische Systeme sollte in diesem Sinne übertragen und im Prototyping berücksichtigt werden [ISO26262], [ISO16949]. Grundsätzlich sind für das Konzeptmuster bereits vorhandene Serienprodukte aus dem Serienwerkstoff zu bevorzugen (Produktadaption). Diese sind für das MID-Prototyping zu modifizieren und an die äußere Gestalt anzupassen. Der entscheidende Vorteil liegt in der Verwendung von Produkten aus dem Serienwerkstoff, der mit Serienverfahren hergestellt wurde. Dadurch besitzen die Testergebnisse aus den vielzähligen Testreihen bereits eine hohe Aussagekraft.

Das Einsatzgebiet des MID-Bauteils spielt bei der Auswahl des Materials eine entscheidende Rolle. Daher sind im Voraus die möglichen Einwirkungen von Umwelteinflüssen sowie erhöhte chemische und thermische Belastungen festzustellen. Der Kontakt mit Reinigungsmitteln, Kondenswasser oder Lebensmitteln ist zu bewerten und ggf. sind konstruktive Maßnahmen zu realisieren, die einen Kontakt mit diesen Medien verhindern. Die wichtigste Einflussgröße für die Festlegung des Materials ist die Temperaturbelastung. Vor allem in Motornähe entstehen hohe Temperaturen, die für die Festigkeit des Kunststoffgrundkörpers problematisch sind. Für diesen Zweck sind hochtemperaturbeständige Werkstoffe einzusetzen. Dazu werden Substratkunststoffe mit Füllstoffen wie Glasfasern und Mineralien versehen. Der Anteil der Füllstoffe beträgt in der Regel über 50%. Die Hochtemperatur-Lagerung von bis zu 150° C ist mit aus der Automobilbranche übernommenen Temperaturschock- und Feuchte-Wärme-Tests nachzuweisen. Ein Werkstoff, wie bspw. PA 6T/6I (Polyamid), ist gut für den Einsatz im Automobilbau geeignet. Nachteilig ist jedoch, dass der Werkstoff nur spritzgegossen werden kann und deswegen erst zu einem späteren Zeitpunkt im Prototyping zur Verfügung steht. Darüber hinaus entsteht aufgrund der Füllstoffe eine Richtungsabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten [Fra13].

Das Konzeptmuster und das Funktionsmuster sind für das Prototyping mit hochtemperaturbeständigen Werkstoffen anzupassen. Der Serienwerkstoff kann im Konzeptmuster nicht generativ verwendet werden. Jedoch besteht die Möglichkeit, bereits bestehende Serienprodukte aus dem Werkstoff für das MID-Prototyping anzupassen. Sollte der Serienwerkstoff während des Konzeptmusters nicht zur Verfügung stehen, sind mechanische

und thermische Bewertungen des Grundkörpers nur geringfügig möglich. Essenzielle Test- und Prüfverfahren sind mit dem Funktionsmuster nachzuholen. Beispielweise ist die Metallisierung neu zu bewerten, da die Füllstoffe im Material die Haftfestigkeit reduzieren. Aus diesem Grund ist zum frühestmöglichen Zeitpunkt auf seriennahe Werkzeuge zu wechseln. Die Herstellung des Grundkörpers mittels Spritzguss ist zu bevorzugen.

Für die Sicherstellung des EMV-Konzepts sind die aktuell vorherrschenden Richtlinien und Normen aus der Automobilbranche zu übernehmen (vgl. Tabelle A-2) [Bor10], [BS07], [WR06]. Der Grundkörper ist derart zu gestalten, dass elektromagnetische Abschirmungen hinzugefügt werden können. Alternativ ist das MID in ein abschirmendes Gehäuse einzupassen. Die elektromagnetische Verträglichkeit ist vom Einsatzgebiet und darin auftretenden Störgrößen abhängig. Das EMV-Konzept ist mit dem Funktionsmuster zu überprüfen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sowohl das **Konzeptmuster** als auch das **Funktionsmuster** für das MID-Prototyping im Automobilbau anzupassen sind. Das allgemeine Geometrie- sowie das Serienmuster können ohne entscheidende Änderungen übernommen werden. Mithilfe des Konzeptmusters ist das spätere Einsatzgebiet des Endprodukts zu analysieren und daraus die auftretenden Belastungen und Anforderungen abzuleiten. Auf dieser Grundlage sind die benötigten branchenspezifischen Test- und Prüfverfahren abzuleiten und ggf. anzuwenden. Zusätzlich ist festzulegen, ob der Werkstoff über Hochtemperatureigenschaften verfügen muss.

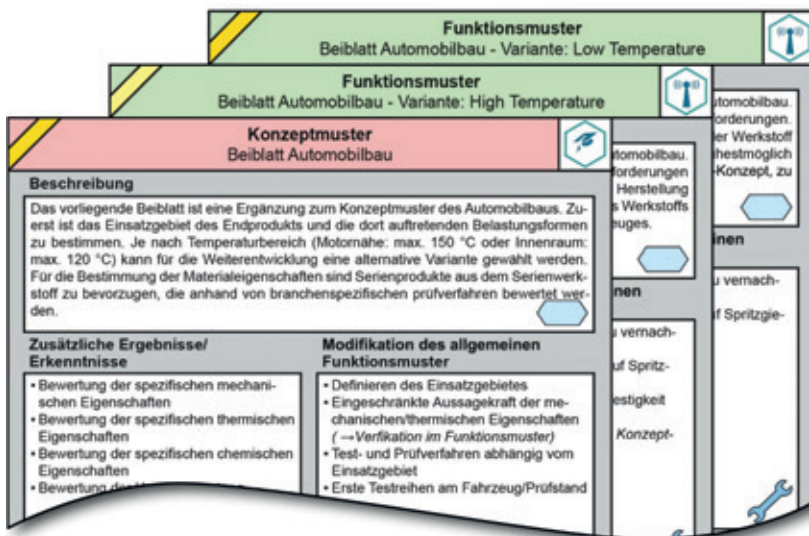


Bild 4-7: Beiblätter für die MID-Prototypenklassen Konzept- und Funktionsmuster für den Bereich Automobilbau

Je nach Anwendungsbereich kann zwischen zwei verschiedenen Funktionsmustern gewählt werden. Die erste Variante beschreibt das Prototyping mit Hochtemperaturwerkstoffen und die dabei zu berücksichtigenden Maßnahmen an den Herstellungsprozess. Die zweite Variante beinhaltet die Handhabung des Funktionsmusters ohne Hochtemperaturanforderungen (Low Temperature, LT) (Bild 4-7). Die entsprechenden Beiblätter aus dem Automobilbau, sowie aus den Branchen Medizintechnik und IT und Telekommunikation sind im Anhang A4.2 dargestellt.

4.3 Vorgehen und MID-Methodenset

Die entwickelte Systematik beruht im Wesentlichen auf der Kompatibilität von umsetzungsnahe Lösungselementen für Produktfunktionen, deren Fertigungsrestriktionen und abgeleiteten kompatiblen Prozessketten. Die gilt sowohl für die Produkt- als auch die entsprechende Prototypenentwicklung. Das Vorgehensmodell bildet die methodische Grundlage der Entwicklungssystematik. Es strukturiert den Entwicklungsablauf und begleitet den Anwender während der Entwicklung, um so den systematischen und letztlich erfolgreichen entwicklungsbegleitenden Einsatz von Prototypen sicherzustellen. Hierzu wird im ersten Schritt das prinzipielle Vorgehen der Systematik erläutert. Im dem darauffolgenden Abschnitten wird dann das Vorgehensmodell samt eingesetzter Methoden und Werkzeuge – und somit die Entwicklungssystematik selbst – detailliert dargelegt.

Prinzipielles Vorgehensmodell

Das prinzipielle Vorgehen zur prototypenbasierten Entwicklung räumlicher Schaltungsträger gliedert sich in die drei Hauptstufen *Machbarkeit analysieren*, *Prozessketten konzipieren* und *Eigenschaften absichern* (Bild 4-8).

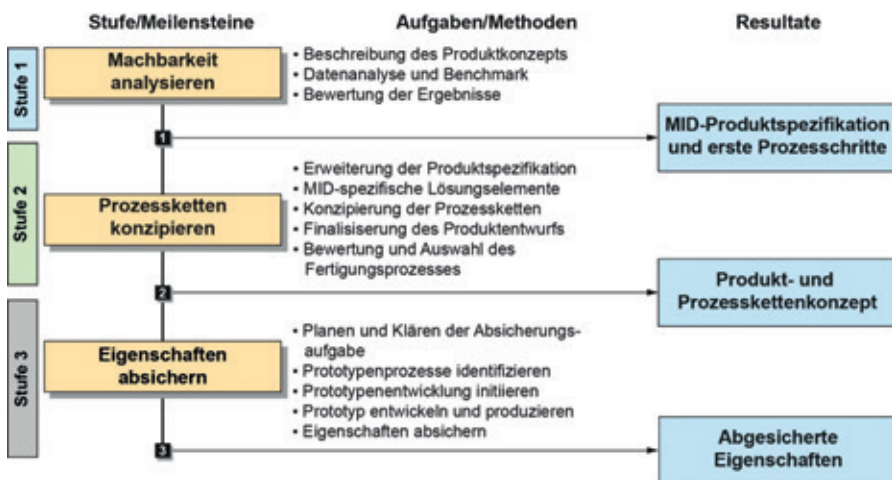


Bild 4-8: Prinzipielles Vorgehen zur prototypenbasierten Entwicklung räumlicher Schaltungsträger

Das Produktkonzept bildet dabei die Grundlage für die **MID-Produktspezifikation**, für die in der frühen Phase insbesondere die Partialmodelle *Anforderungen*, *Umfeld*, *Funktionen* und *Gestalt* (bzw. geometrische Klasse und grobe Abmessungen) entscheidend sind. Diese enthalten die notwendigen Informationen, auf deren Basis in **Stufe 1** eine erste **Machbarkeitsanalyse** durchgeführt werden kann. Mithilfe einer Randbedingungsanalyse (geometrische Klasse, Temperatureinsatzbereich, Umgebungsbedingungen und Abmessungen) sowie einer Vergleichsanalyse (Benchmark mit existierenden Applikationen und deren Herstellverfahren aus der WebMIDIS-Datenbank), werden mögliche Prozesse identifiziert und zu kompatiblen Prozessketten zusammengesetzt.

In **Stufe 2** werden die **Prozessketten konzipiert**. Dazu werden den Produktfunktionen im Rahmen der Konkretisierung erste Lösungselemente aus einem erweiterten Konstruktionskatalog zugeordnet. Jedem Lösungselement sind dabei Kompatibilitätsinformationen zu den weiteren Lösungselementen und mögliche Prozessrestriktionen zugeordnet. Die Informationen sind in **Kompatibilitätsmatrizen** abgelegt worden. Mithilfe erweiterter Anforderungen, beispielsweise zur geplanten Stückzahl, können so frühzeitig geeignete Prozessketten für das finale Produkt abgeleitet und in eine Rangfolge überführt werden. Die ermittelten Prozessketten setzen sich dabei sowohl aus klassischen, als auch aus prototypenspezifischen Herstellverfahren zusammen und tragen so der Entwicklung hin zu generativ gefertigten Endprodukten Rechnung.

In **Stufe 3** werden nun die für die **Eigenschaftsabsicherung** des Produkts notwendigen optimalen Prototypenprozesse ermittelt. Hierzu werden die erarbeiteten **Prototypenklassen** verwendet, denen jeweils optimale geeignete Prozesse zugeordnet sind. Die abzusichernden Eigenschaften werden dazu den Steckbriefen der Prototypenklassen entnommen um die entsprechende Klasse zu identifizieren. Durch einen Vergleich der damit zur Verfügung stehenden Prozesse und den aus der produktspezifischen Prozesskettenrangfolge ermittelten Prozessketten kann dasjenige Verfahren ausgewählt werden, das für den jeweiligen Eigenschaftsabsicherungsfall optimal ist. Hieraus leitet sich der Entwicklungsauftrag für den Prototyp ab. Nach erfolgter Fertigung können dann, die im Steckbrief beschriebenen Eigenschaften überprüft und abgesichert werden.

Dieser Lösungsansatz zeigt die deutlichen Wechselwirkungen zwischen der Prinzipiellösung des Produkts und dem bei räumlichen Schaltungsträgern notwendigen Konzept des zugehörigen Produktionssystems. Bereits in der Phase der Prinzipiellösung ist identifizierbar, dass gewisse Fertigungsverfahren nicht mehr in der Lage sind, das gewünschte Produkt zu erzeugen. Die Konkretisierung der Prinzipiellösung mit umsetzungsnahen Lösungselementen schränkt die verfügbaren Prozesse weiter ein. Eine frühzeitige Festlegung des Fertigungsverfahrens hat aber schwer abschätzbare Auswirkungen auf das Produktkonzept. Dies gilt auch für die zum Einsatz kommenden Prototypen, die bei der Wahl eines ungünstigen Herstellprozesses nur unzureichende Ergebnisse liefern. Die Erkenntnisse, die aus der Prototypenentwicklung und produktentwicklungsbegleitenden Verwendung

von Prototypen gewonnen werden, können somit direkt in die eigentliche Produktentwicklung zurückfließen. Die drei Stufen und die eingesetzten Methoden und Werkzeuge werden im Folgenden erläutert.

4.3.1 Stufe 1: Machbarkeit analysieren

Im Folgenden wird das Vorgehen zur frühzeitigen Analyse der Machbarkeit vorgestellt und die einzelnen Phasen der ersten Hauptstufe erläutert. Das Vorgehensmodell gibt einen Überblick über die einzelnen Phasen, die wesentlichen Aufgaben und zu erarbeitenden Resultate (Bild 4-9). Zudem wird die Reihenfolge der Durchführung der Phasen festgelegt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich um eine sequentielle und idealtypische Darstellung handelt, deren tatsächliche Anwendung aber Iterationen und auch Rücksprünge in vorangegangene Phasen zulässt.

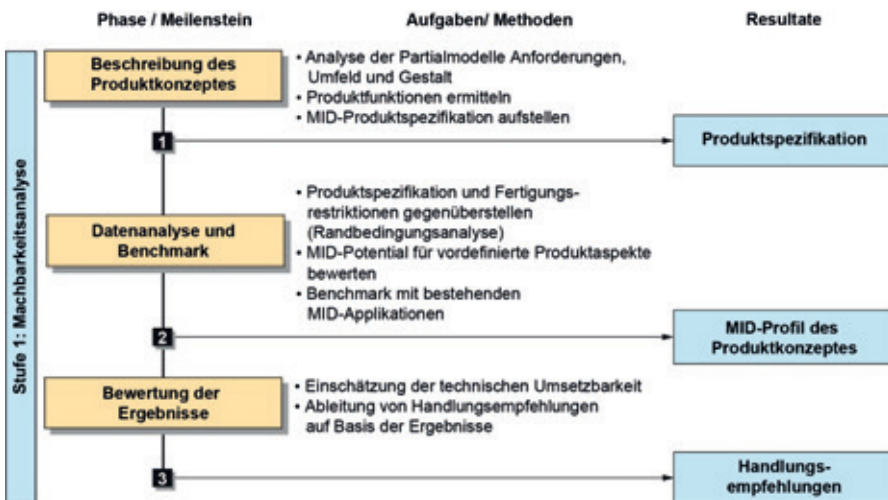


Bild 4-9: Vorgehensmodell zur frühzeitigen Machbarkeitsanalyse

Phase 1.1: Beschreibung des Produktkonzeptes

Bereits in den ersten übergeordneten Phase *Planen und Klären* der Aufgabe sowie der *Konzipierung auf Systemebene* (vgl. [Kai09], [Nor12]) entstehen die relevanten Partialmodelle in der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Kapitel 2.4.4), die für die frühzeitige Analyse der Machbarkeit ausreichend sind. Mithilfe der Partialmodelle *Anforderungen, Umfeld* und *Gestalt* lassen sich folgende **Konzeptinformationen** ermitteln:

- **Umfeldeinflüsse**, denen das Produkt während der Nutzung ausgesetzt ist, wie die Thermische Belastung (Min./Max. Dauergebrauchstemperatur, kurzzeitige Gebrauchstemperatur), Aggressive Medien (Säuren, Basen, alkalische Salze etc.) und die mechanische Belastung (Zug/Druck, Biege-Wechsel oder Schlag)

- **Konstruktive Merkmale** des Produktes, wie die Hüllgeometrie (einfacher Regelkörper, Kombination aus Regelkörpern, Komplexer Körper mit oder ohne Hinterschnitte, 3D-Freifformkörper), das Hüllvolumen (Länge, Breite, Höhe), die voraussichtliche Wandstärke des Grundkörpers, das Leiterbahnlayout (Leiterbahnbreite, -abstand und evtl. -höhe, bzw. Bauelemente, deren Pitch und max. zulässige Erwärmung) und die Geometrische Klasse des Produkts (Bild 2-4).

Darüber hinaus können mithilfe des Partialmodells *Funktionen* erste **MID-Funktionen** ermittelt werden. Die Funktionen des **erweiterten Konstruktionskatalogs** (vgl. A3.1) dienen hierbei als Orientierung²⁷.

Die Informationen werden in Form einer **MID-Produktkonzeptspezifikation** zusammengetragen. Hierzu wird eine Vorlage bereitgestellt (vgl. A2.1). Die MID-Produktspezifikation beruht dabei auf der Basisspezifikation und den ersten rudimentären Ansätzen nach KAISER und erweitert diese um materialentscheidende Aspekte. Bild 4-10 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den Partialmodellen und der MID-Produktspezifikation für die Machbarkeitsanalyse.

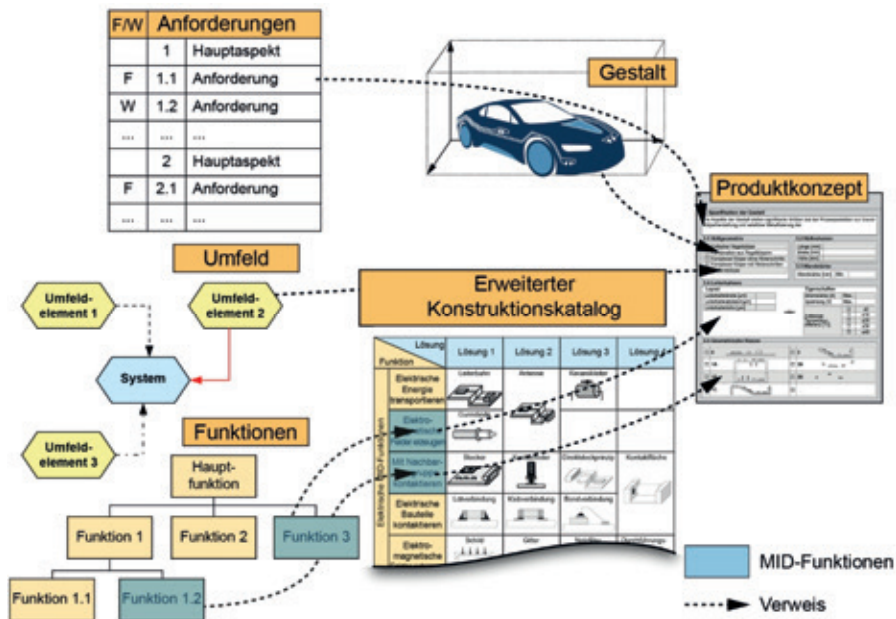


Bild 4-10: Zusammenhang zwischen Partialmodellen und MID-Produktspezifikation

²⁷ Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer 1:1 Beziehung zwischen Produktfunktionen und Funktionsumsetzenden Systemelementen ausgegangen, wie es bei integrierten räumlichen Schaltungsträgern üblich ist. Hybride Ansätze (MID plus Leiterplatte) sind problematisch, da häufig in der Konzipierungsphase unklar ist, welches Systemelement welche Funktionen umsetzen soll. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Als **Resultat** der Phase *Beschreibung des Produktkonzepts* erhält man eine Basis-MID-Produktspezifikation. Diese umfasst die funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen des Produktkonzepts, bedarf aber keines hohen Detaillierungs- bzw. Konkretisierungsgrads.

Phase 1.2: Datenanalyse und Benchmark

In der zweiten Phase der Machbarkeitsanalyse werden die zusammengetragenen Daten der MID-Produktspezifikation aus der vorangegangenen Phase analysiert und in ein **MID-Profil** (vgl. A2.2) überführt. Dieses Profil kombiniert das MID-Potential, Aussagen über die Machbarkeit und Informationen über vergleichbare Produkte.

Hierzu wird zunächst eine **Randbedingungsanalyse** durchgeführt. In Anlehnung an ASHBY (Screening, vgl. Kapitel 3.4.3) und TROMMER (Eignungsanalyse, vgl. Anhang A1.2) werden dabei die ermittelten Informationen in Grenzwerte überführt und mit entsprechenden MID-spezifischen Material- und Prozessdatenbanken abgeglichen. Dabei lassen die in der vorangegangenen Phase beschriebenen Konzeptinformationen einen Rückschluss auf mögliche Materialien und Herstellprozesse zu. Insbesondere für die Materialien empfiehlt sich eine IT-gestützte Recherche, da die Liste an verfügbaren Materialien durch die neuartigen Drucktechnologien nicht mehr bloß auf LDS- und 2K-fähige Kunststoffe beschränkt ist. Die bei den klassischen Verfahren zur Herstellung räumlicher Schaltungsträger sonst üblichen dotierten thermoplastische Kunststoffe begrenzen den Suchraum möglicher Materialien erheblich. Hier kann eine manuelle Materialauswahl problemlos erfolgen. Zur Ermittlung der Prozessrestriktionen werden insbesondere die konstruktiven Merkmale des Produkts berücksichtigt. Dabei gehen Werte wie Bearbeitungsraum und Leiterbahnbreite und -abstand ebenfalls in die Grenzwertbetrachtung ein.

Anschließend wird das **MID-Potential** mittels eines **Bewertungssystems**, das auf Ansätzen von EHRENSPIEL und LINDEMANN beruht, ausgewertet [Ehr09], [Lin09]. Anders als bei PEITZ geht es dabei weniger darum, das Produktoptimierungspotential durch MID zu identifizieren, sondern vielmehr die **relative Eignung des Konzepts im Verhältnis zur maximal möglichen Ausnutzung der Technologie** darzustellen. Dieses wurde in Zusammenarbeit mit Industrieexperten entlang der MID-Prozesskette sowie durch die Analyse bestehender Applikationen ausgearbeitet. Dabei werden die zuvor genannten Attribute des Konzepts unter Verwendung einer Skala von 0-4 bewertet, wobei 0 kein Potential und 4 ein hohes MID-relevantes Potential darstellt. Den einzelnen Ausprägungen der Attribute wurden dabei initial die Bewertungsstufen zugeordnet, so dass diese nur noch verglichen werden müssen. Ein 3D-Freiformkörper oder die Verwendung von mehreren MID-Funktionen hat beispielsweise ein hohes MID-Potential, wohingegen hohe thermische Belastungen eher für andere Technologien sprechen. Die Bewertung wurde initial auch für bestehende Applikationen der Web-MIDIS-Datenbank getätigt, so dass die Potential-Bewertung einen **Benchmark** mit existierenden Applikationen erlaubt. Die existierenden Applikationen werden anhand umzusetzender Produktfunktionen ausgewählt und die identifizierten Potentiale abgeglichen (Bild 4-9).

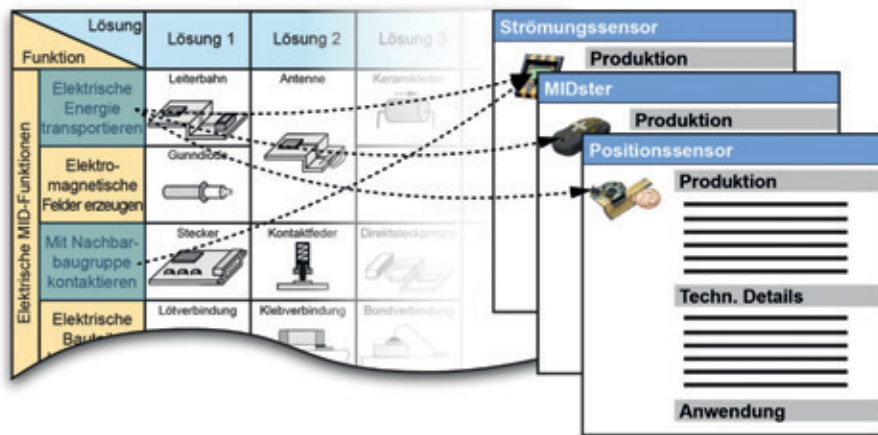


Bild 4-11: Schematische Darstellung der Identifikation existierender Applikationen aus der WebMIDIS-Datenbank mithilfe der MID-Produktfunktionen

Dies kann für jeden Aspekt individuell erfolgen, so dass beispielsweise bei gleichen MID-Produktfunktionen ein Potentialdelta hinsichtlich der geometrischen Klasse des Produkts identifiziert werden kann. Die Beurteilung kann auch anwendungsspezifisch gewichtet werden. Liegt z.B. beim Produktkonzept der Fokus auf einer hohen Funktionsintegration, wohingegen die Miniaturisierung vernachlässigt wird, kann eine gewichtete Beurteilung nach wie vor ein hohes MID-Potential aufzeigen, auch wenn die Größe von untergeordneter Bedeutung ist.

Das **Resultat** der Phase *Datenanalyse und Benchmark* ist eine Übersicht der anwendbaren Herstellungsverfahren und Materialien für die aktuelle Form des Konzepts. Die Verfahren liefern eine erste Aussage über die Herstellbarkeit der Produktidee. Gleichzeitig erhält der Entwickler mithilfe des MID-Profils und des durchgeführten Benchmarks ein MID-Potentialdelta zu bestehenden Applikationen, das es ihm erlaubt, sein Produktkonzept einzuordnen und evtl. zu überarbeiten. Der Abgleich dient dabei als Unterstützung für den kreativen Design-Prozess des Entwicklers, der zu seinen Produktfunktionen bereits umgesetzte Lösungselemente in Form von Produkten erhält. Die Funktionen sind dabei in der Regel auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt.

Phase 1.3: Bewertung der Ergebnisse

In dieser Phase schließt die Machbarkeitsanalyse mit einer Bewertung der Ergebnisse ab. Das MID-Profil für das Produktkonzept dient als Grundlage zur Ableitung von Handlungsempfehlungen. Neben den geeigneten Materialien sind für jeden Prozessschritt mögliche Verfahrensschritte identifiziert worden (Bild 4-12).

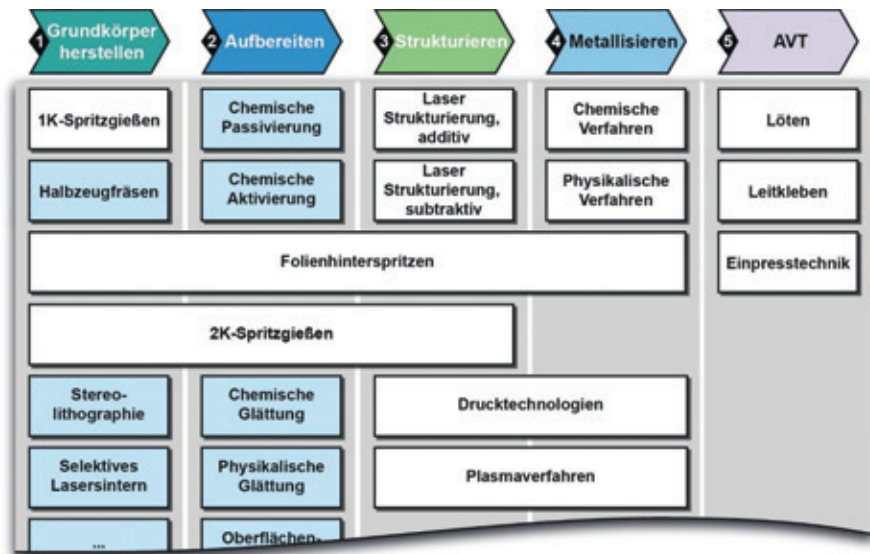


Bild 4-12: Mögliche Prozessschritte für das MID-Produktkonzept

Ähnliche MID-Anwendungen können als Referenz verwendet werden und helfen, zusätzliche Ideen zu generieren und in den weiteren Konkretisierungsphasen umzusetzen. Das Potentialdelta des Produktkonzepts zeigt die Schwachstellen des Konzepts im Vergleich zu existierenden Anwendungen auf. Die Randbedingungsanalyse und die daraus abgeleiteten möglichen Fertigungsprozesse liefern den notwendigen Input für die integrative Konzipierung von Prozessketten, die für die weitere Gestaltung von Produkt und Produktionssystem benötigt werden.

Ein wichtiger Punkt für die Bewertung ist neben rein technischen Aspekten auch die individuelle Einschätzung des Unternehmens. Sollten beispielsweise in der Machbarkeitsanalyse Prozesse eliminiert worden sein, die das Unternehmen beherrscht, empfiehlt es sich, dies genauer zu untersuchen und etwaige Anforderungen anzupassen. Sollten keine Prozesse identifiziert werden können, müssen die Produktanforderungen grundsätzlich überdacht bzw. im Zweifel aufgelockert oder die Umsetzung mittels MID-Technologien verworfen werden. Aus den identifizierten Ergebnissen lassen sich Handlungsempfehlungen für das weitere Vorgehen ableiten.

Eben diese Handlungsempfehlungen sind das **Resultat** der *Phase Bewertung der Ergebnisse*. Eine softwaregestützte Umsetzung der Machbarkeitsanalyse kann darüber hinaus helfen, die kritischen Anforderungen zu identifizieren, wie beispielsweise die gesetzten Temperaturgrenzen.

4.3.2 Stufe 2: Prozessketten konzipieren

Aufbauend auf der Machbarkeitsanalyse kann die detailliertere Planung der Prozessketten beginnen. Das entsprechende Vorgehensmodell zeigt Bild 4-13. Die einzelnen Phasen werden im Anschluss erläutert. Analog zur Phase der Machbarkeitsanalyse sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass es sich um eine sequentielle und idealtypische Darstellung handelt. Insbesondere die enge Verzahnung von Produkt- und Produktionssystementwurf bedarf eines iterativen Vorgehens.

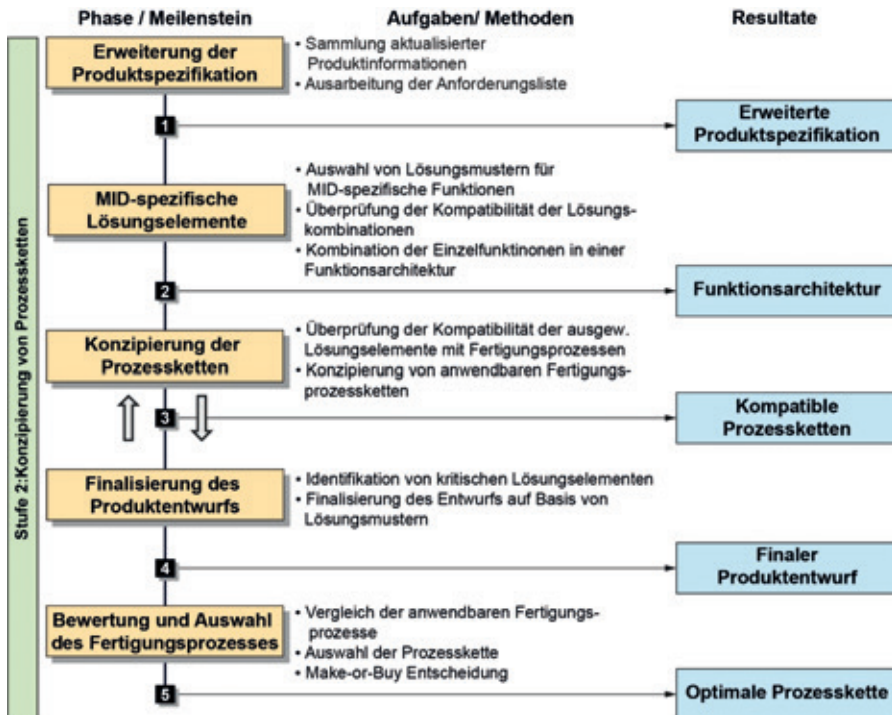


Bild 4-13: Vorgehensmodell zur integrativen Konzipierung von Prozessketten

Phase 2.1: Erweiterung der Produktspezifikation

Aufbauend auf den möglichen Fertigungsprozessen der Machbarkeitsanalyse kann nun mit der weiteren Eingrenzung möglicher Prozesse und der detaillierteren Planung der Prozessketten begonnen werden. Im ersten Schritt müssen dazu die groben Anforderungen an das Produktkonzept aktualisiert und erweitert werden. Für die Analyse werden detailliertere Informationen zu *Stückzahl*, *Varianten*, *Toleranzen*, *Automatisierbarkeit*, *metallisierte Fläche*, *Branchen* und zu erfüllenden *Normen* benötigt, die nachfolgend kurz erläutert werden.

Stückzahl: Die geforderte Stückzahl hat einen großen Einfluss auf das optimale Verfahren. Wurde früher bei großen Stückzahlen stets die 2K-Technologie empfohlen, wird

heute, auch durch die prozesstechnischen Innovationen in der Laser-Anlagentechnik, häufig die Laserdirektstrukturierung angewendet. Insbesondere die Innovationen in der Anlagentechnik (automatisches Handling, mehrere Laserbearbeitungsköpfe) und die Flexibilität bei Produkt oder Variantenänderungen haben die LDS-Technologie zu der etablierten Technologie werden lassen, so das bspw. Mobilfunkantennen mittlerweile fast ausschließlich in LDS gefertigt werden [FGG+11].

Varianten: Ähnlich wie bei der Stückzahl determinieren die geforderten Varianten das spätere Fertigungsverfahren in erheblichem Maße. Es ist aber zwingend zwischen mechanischen und elektronischen Varianten zu differenzieren. Unter mechanischen Varianten wird dabei eine Anpassung des mechanischen Grundkörpers verstanden. Hier sind flexible Fertigungsverfahren, wie bei generative Technologien üblich, zu bevorzugen. Elektronische Varianten zeichnen sich in der Regel durch eine Anpassung des Leiterbahnbildes aus, bzw. bei bestückten Bauteilen zusätzlich durch verschiedene elektronische Bauelemente. Hier sind flexible Strukturierungs- bzw. Metallisierungs-Technologien zu bevorzugen, wie sie bei der Laserdirektstrukturierung oder Drucktechnologien möglich sind.

Toleranzen: Die geforderten Toleranzen sind im Hinblick auf die gesamte Prozesskette zu untersuchen. Insbesondere bei generativen Verfahren werden beispielsweise nicht so enge Toleranzanforderungen erfüllt, wie sie mit der Spritzgusstechnologie möglich sind.

Automatisierbarkeit: Die Automatisierbarkeit ist ein wesentlicher Faktor für eine Massenproduktion in hoher Stückzahl. Allerdings spielt die Automatisierbarkeit auch hinsichtlich der Qualitätsanforderungen eine wesentliche Rolle. Prozesse, die einen hohen manuellen Nachbearbeitungsaufwand haben, wie beispielsweise Entformungen bei generativen Verfahren, stehen hierzu im Widerspruch.

Metallisierte Fläche: Die Größe der metallisierten Fläche ist nicht nur ein entscheidender Kostentreiber, sondern auch ein Indiz für die Auswahl des Verfahrens. So können subtraktive Verfahren bevorzugt werden, wenn der Anteil der metallisierten Fläche größer ist als der Anteil der nichtmetallisierten Fläche

Branchen: Einige Branchen haben neben den Produktanforderungen spezifische Anforderungen an die Prozessqualität bzw. die Prozessfähigkeit der einzusetzenden Prozesse. Die dort definierten C_p - und C_{pK} -Werte²⁸ bilden oftmals die Grundlage für die Prozessqualifizierung und entscheiden darüber, ob ein Prozess für eine bestimmte Branche geeignet ist. Neben der individuellen Qualität der Unternehmen ihre Prozesse mit höchster Qualität zu fahren, hat sich in Interviews herausgestellt, dass einige Technologien nicht für hohe Ansprüche geeignet sind.

²⁸ Die Prozessfähigkeitsindizes C_p und C_{pK} sind Kennzahlen zur statistischen Bewertung eines Prozesses. Sie geben an, wie sicher die laut Spezifikation vorgegebenen Ziele erreicht werden. Ein hoher Wert entspricht dabei einer sicheren Einhaltung der vorgegebenen Spezifikation [TK08].

Normen: Neben den branchen-relevanten Anforderungen sind insbesondere spezifische Anforderungen aus Normen und Richtlinien zu berücksichtigen. Produkte, die beispielsweise nach spezifischen Prüfkriterien getestet werden müssen, oder wie am Beispiel der Medizintechnik spezifische Anforderungen erfüllen müssen, haben oftmals nur eine eingeschränkte Prozess- und Materialauswahl.

Die Informationen zu den Abhängigkeiten der Prozesse sind, bis auf die individuell überprüfbaren Normen, in einer Tabelle zusammengefasst worden (vgl. Anhang A3.5).

Als **Resultat** der Phase erhält der Entwickler eine erweiterte Produktspezifikation. Diese ist notwendig, um mithilfe der Ergebnisse der Machbarkeitsanalyse einerseits die Materialien und Prozesse weiter einzugrenzen und andererseits die Einzelprozesse zu sinnvollen Prozessketten kombinieren zu können. Darüber hinaus können mithilfe der Kompatibilitätsbeziehungen bereits erste ungeeignete Prozesse ausgeschlossen werden.

Phase 2.2: MID-spezifische Lösungselemente

In der zweiten Phase der Prozesskettenkonzipierung werden den MID-Funktionen, die bereits in der Phase der Machbarkeit identifiziert wurden, die MID-spezifischen Lösungselemente zugeordnet. Den Ausgangspunkt dafür bildet der erweiterte MID-Konstruktionskatalog in Anlehnung an PEITZ [Pei08], (vgl. A3.1). Durch die **Auswahl und Kombination der Lösungselemente** zur Funktionserfüllung ergeben sich Pfade durch den Konstruktionskatalog. So lassen sich unterschiedliche Produktkonzepte erzeugen, die durch die Ausprägungen der Funktionen in unterschiedliche Lösungselemente unterschieden werden. Grundsätzlich ließe sich mittels Kombinatorik eine sehr hohe Anzahl an alternativen Gesamtkonzepten erzeugen. Die Einschränkungen aus den Produkthanforderungen, beispielsweise durch die geometrische Klasse, reduzieren jedoch die Anzahl an Produktvarianten. Nichtsdestotrotz lassen sich nach wie vor erhebliche Mengen an Produktkonzeptalternativen bilden. Schematisch sind in Bild 4-14 zwei Varianten dargestellt.

Die Konzeptsynthese mithilfe des Konstruktionskatalogs geschieht dabei auf rein technisch-funktionaler Produktsicht. Eine Bewertung oder Einordnung der Konzepte hinsichtlich Umsetzbarkeit findet nicht statt.

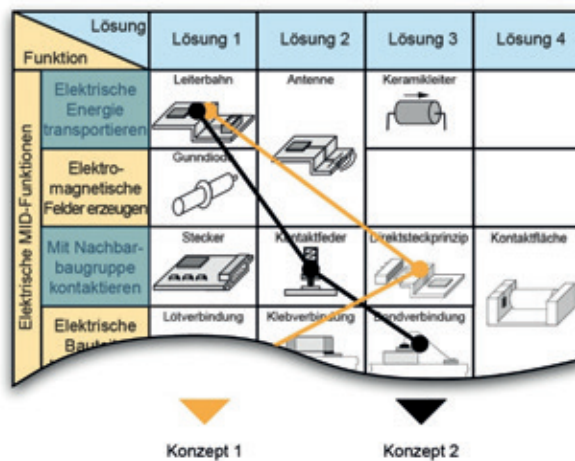


Bild 4-14: Auswahl der Lösungselemente und Bildung von Produktkonzepten mithilfe des erweiterten Konstruktionskatalogs

Die Synthese der Konzepte wird nun durch eine **Kompatibilitätsuntersuchung** der Lösungselemente unterstützt. Anders als abstrakte Lösungsmuster sind die Lösungselemente des Konstruktionskatalogs in der Regel wesentlich umsetzungsnäher, auch wenn die finale gestaltbehaftete Umsetzung erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Unter der Prämisse, dass die **Systematik mit dem Ziel der Miniaturisierung** eingesetzt wird und Funktionselemente und -flächen somit in der Regel eine räumliche Nähe aufweisen, lassen sich Abhängigkeiten identifizieren. So können beispielsweise negative Effekte bei Hochfrequenzanwendungen auftreten, die mit anderen großflächigen, zum Wärmetransport eingesetzten, Metallisierungen interferieren. Viele dieser Effekte können selbstverständlich konstruktiv ausgeglichen werden, etwa über größere Abstände der Funktionselemente und -flächen zueinander. Dies widerspricht jedoch der Forderung nach einer maximalen räumlichen Integration. Zur Identifikation der Abhängigkeiten wurde eine **Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix** erstellt (vgl. A3.2). Bild 4-15 erläutert den schematischen Aufbau.

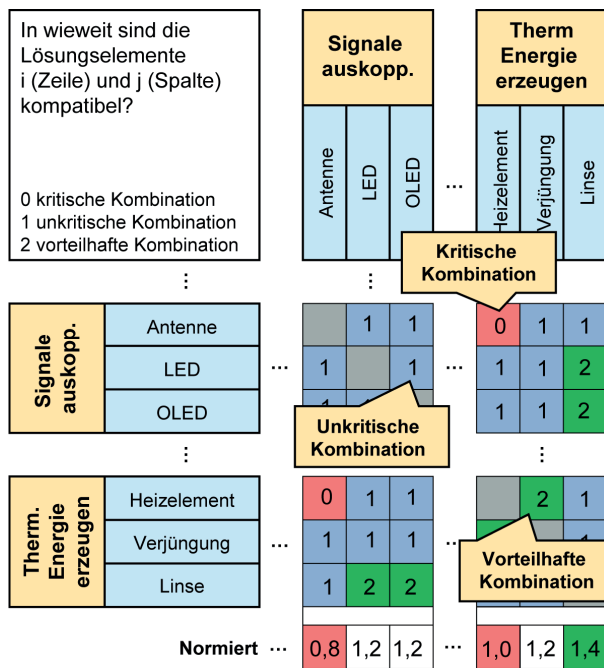


Bild 4-15: Struktur der Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix

Der Wert 0 steht dabei für eine **kritische Kombination**. Im vorliegenden Fall sind dies die Lösungselemente Heizelement und Antenne. Hier besteht ein sehr hohes Risiko, dass diese sich gegenseitig störend beeinflussen. **Unkritisch** (Wert 1) erscheint hingegen der Einsatz von beispielsweise wärmeerzeugenden LEDs, da diese in der Regel keine bzw. kaum störende Strukturen besitzen, die im Hochfrequenzbereich mit den weiteren Antennenstrukturen interagieren. Eine **vorteilhafte Kombination** (Wert 2) entsteht, wenn ein Lösungselement mehrere Funktionen erfüllen kann, bzw. die Lösungselemente integriert werden können. Im vorliegenden Fall kann beispielsweise eine Linse direkt in eine LED/OLED integriert werden, so dass ein Lösungselement mehrere Funktionen umsetzt. Die aufsummierte und normierte Spaltensumme ist dabei ein Maß für die Kompatibilitätsgüte der Lösungselemente und damit ein erster Indikator für die Qualität des Produktkonzepts.

Als **Resultat** der Phase *MID-spezifische Lösungselemente* entsteht eine Auswahl verschiedener Produktkonzepte, bestehend aus untereinander kompatiblen Lösungselementen. Diese Konzepte gilt es in den nachfolgenden Phasen weiter zu konkretisieren.

Phase 2.3: Konzipierung der Prozessketten

Die Phase *Konzipierung der Prozessketten* wird aufgrund der starken Abhängigkeiten im engen Wechselspiel mit der anschließenden Phase *Finalisierung des Produktentwurfs* durchgeführt. Aufbauend auf den Produktkonzepten der vorangegangenen Phase kann

nun begonnen werden, die entsprechenden Fertigungsprozessketten zu konzipieren. Hierzu sind im Wesentlichen die Schritte *Kompatibilitätsüberprüfung* und *Prozesskettenkonzipierung* notwendig.

Im ersten Schritt werden die Produktkonzepte hinsichtlich ihrer möglichen Fertigungsprozesse analysiert. Dazu werden die ausgewählten Lösungselemente im Hinblick auf ihre **Kompatibilität bezüglich der Fertigungsprozesse** analysiert. Es gilt, etwaige Fertigungsrestriktionen durch die ausgewählten Lösungselemente zu identifizieren und hinsichtlich möglicher Inkompatibilitäten für ein Gesamtkonzept zu untersuchen. Hierzu wurde in Anlehnung an TROMMER (vgl. A1.2) und MÜLLER (vgl. Kapitel 3.4.2) eine **Prozess-Kompatibilitätsmatrix** erstellt. Diese erlaubt es, Inkompatibilitäten und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten zu identifizieren (vgl. A3.3). Bild 4-16 verdeutlicht die Struktur.

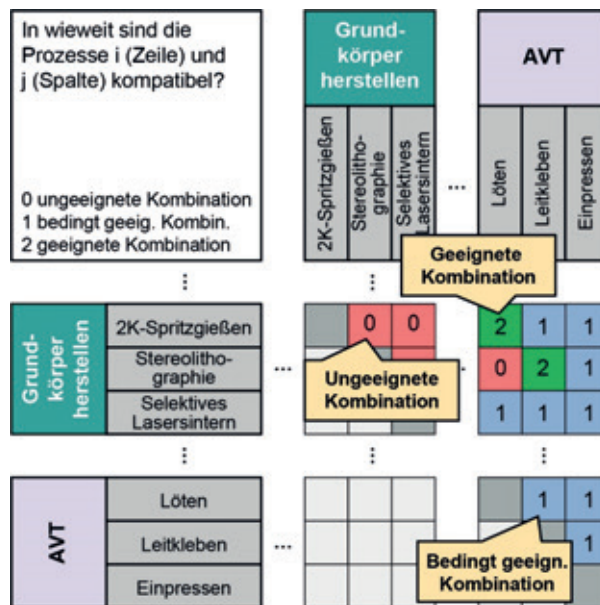


Bild 4-16: Struktur der Prozess-Kompatibilitätsmatrix

Die Prozess-Kompatibilitätsmatrix ist wie die Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix aufgebaut. Der Wert 0 steht allerdings für ungeeignete, der Wert 1 für bedingt geeignete und der Wert 2 für geeignete Kombinationen. Unter ungeeignete Kombinationen werden diejenige verstanden, bei denen zwei Prozessschritte in einer Prozesskette nicht ohne weiteres miteinander kompatibel sind. Beispielsweise ist Folienhinterspritzen nicht mit anderen Verfahren zur Herstellung des Grundkörpers kompatibel. Neben diesen trivialen Zusammenhängen gibt es aber auch Inkompatibilitäten zwischen phasenübergreifenden Prozessen, so wie dem AVT-Prozess (in diesem Fall Löten) und den Verfahren zur Her-

stellung des Grundkörpers, insbesondere den generativen Verfahren (hier der Stereolithographie). Durch die hohen Löttemperaturen (139°C bei Niedrigtemperaturlöten bis zu 217°C bei Standardloten) werden die bei generativen Verfahren üblichen Temperaturgrenzen (Schmelz- oder Glasübergangstemperatur) der eingesetzten Werkstoffe (z.B. 105°C bei Polymethylmethacrylat, PMMA) überschritten. Dies führt zu einem aufschmelzen der Strukturen und zur Zerstörung des Grundkörpers. Unter den vorteilhaften Kombinationen werden neben den idealen Prozessen auch die Zwangsbeziehungen verstanden, also Einzelprozesse, die zwingend miteinander kombiniert werden müssen. So benötigt beispielsweise ein in STL oder SLS erstellter Grundkörper eine Vorbehandlung, z.B. eine Lackschicht für das ProtoPaint-Verfahren oder eine Versiegelung zum schließen offener Poren für Druckverfahren.

Des Weiteren wird für die Kompatibilitätsanalyse eine **Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix** benötigt (vgl. A3.4). Diese bildet die Verknüpfung zwischen den Lösungselementen und den reinen Fertigungsprozessen. Entscheidend ist hierbei, dass gewisse Verfahren für die Umsetzung bestimmter Lösungselemente ungeeignet sind. Bild 4-17 verdeutlicht dies am Beispiel einer Klemmverbindung. Klemmverbindungen werden verwendet, um die Bewegbarkeit eines Bauteiles durch Kraftschluss zu verhindern. Entscheidend ist dabei, dass dies durch Dehnung der ausgeformten Klemmen erfolgt. Es kommen daher in der Regel eher duktilere Materialien zum Einsatz. Verfahren die auf dem Einsatz von Harzsystemen (Vakuumguss) beruhen, neigen jedoch häufig zur Rissbildung. Ebenso kann es zu Delamination beim Einsatz von Schichtverfahren (Laminated Object Manufacturing, Folienhinterspritzen) kommen.

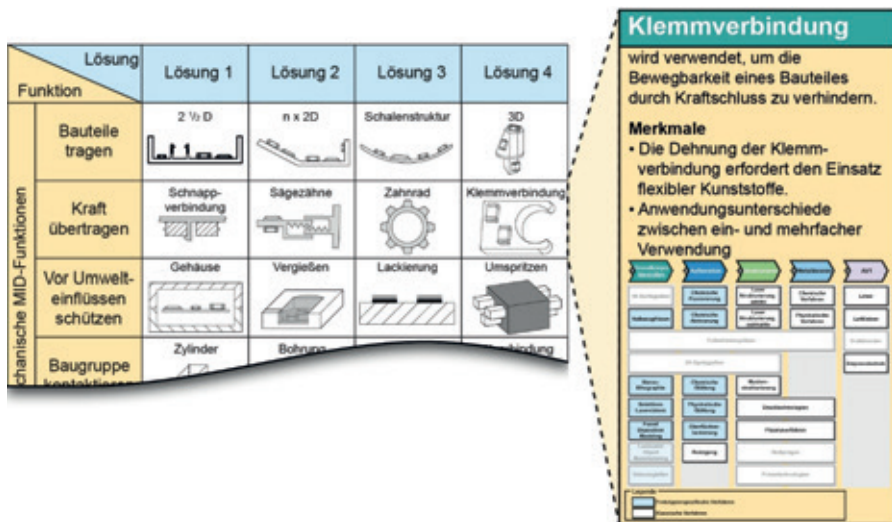


Bild 4-17: Merkmale einer Klemmverbindung und deren Auswirkungen auf die Verfahrensauswahl

Eine Besonderheit entsteht auch durch den Anwendungsfall (einfache oder mehrfache Verwendung), da hier insbesondere bei den generativen Verfahren Abrasionseffekte auftreten können. Diese aus den Anforderungen ersichtlichen Aspekte müssen im zweiten Schritt berücksichtigt werden. Bild 4-18 verdeutlicht den Aufbau der Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix²⁹. Der Wert der normierten Spaltensumme ist dabei ein Indikator für die Eignung eines jeden Prozessschritts für die Umsetzung eines jeweiligen Lösungselements. Durch die Aneinanderreihung der Einzelprozesse zu Prozessketten kann nun mit der Aufsummierung der zuvor ermittelten normierten Spaltenwerte ein ebenfalls normierter Wert für die Prozesskette ermittelt werden. Dieser ergibt sich zu einem Wert gleich (Ideal) oder kleiner (Einschränkung) 2.

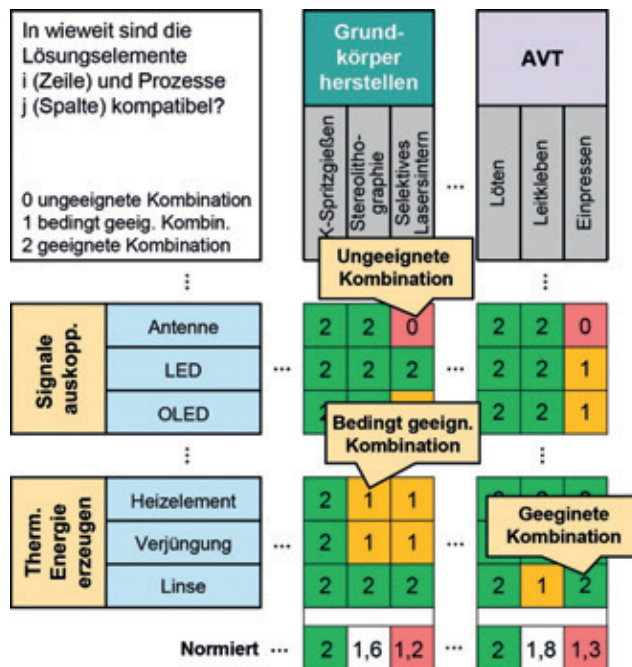


Bild 4-18: Struktur der Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix

Die **Konzipierung anwendbarer Prozessketten** bildet den Abschluss der dritten Phase. Mithilfe der Prozess-Kompatibilitätsmatrix und der Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix können den Produktkonzepten nun Prozessketten zugeordnet werden. Idealerweise sind mittels Elimination bereits weitere Einzelprozesse der Machbarkeitsphase

²⁹ Die Struktur der Kompatibilitätsmatrizen für die Lösungselemente und die Prozesse entsprechen einer ungerichteten, numerischen DSM, da nur einfache Relationen berücksichtigt werden. Aufgrund der quadratischen Struktur der Beziehungsmatrix und der Symmetrie müssen hier nur Relationen in der oberen Dreiecksmatrix eingetragen werden. Die Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix entspricht hingegen einer unsymmetrischen DMM. Mithilfe einer symmetrischen MDM könnten die drei Beziehungsmatrizen auch zu einer Matrix zusammengefasst werden. Hierauf wird jedoch aufgrund einer besseren Lesbarkeit verzichtet. Für nähere Informationen zu DSM, DMM und MDM sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [Bro01], [Mau12], [Ste81].

aussortiert worden, sodass die Anzahl verfügbarer Einzelprozesse und der damit einhergehenden Kombinationsmöglichkeiten wesentlich geringer ist als nach der Machbarkeitsanalyse (Bild 4-19).

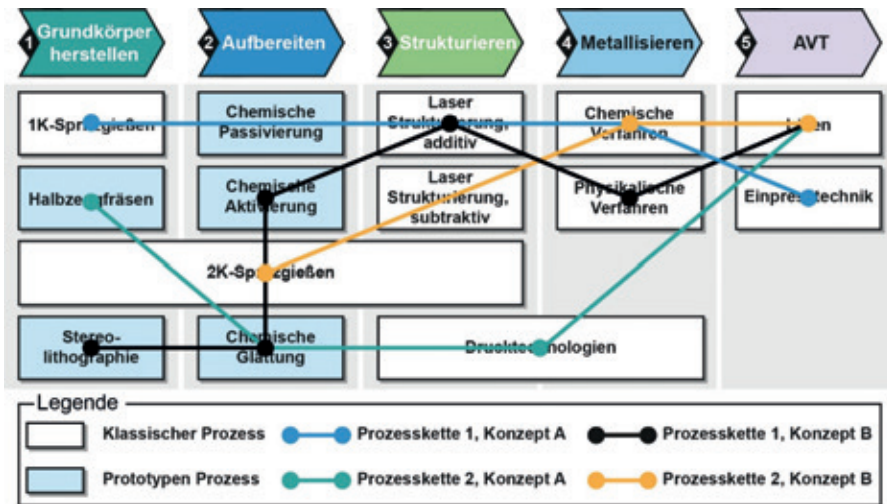


Bild 4-19: Schematische Darstellung alternativer Produktkonzept-Prozessketten

Das **Resultat** der Phase *Konzipierung der Prozessketten* bildet ein Set von produktkonzeptspezifischen Prozessketten. Diese berücksichtigen sowohl die produktspezifischen Anforderungen als auch die prozessspezifischen Restriktionen der MID-Technologie und bilden damit den Ausgangspunkt für die weitere Produktentwicklung.

Phase 2.4: Finalisierung des Produktentwurfs

Mithilfe der ermittelten produktkonzeptspezifischen Prozessketten und den unterstützenden Werkzeugen aus der vorangegangenen Phase kann nun der Produktentwurf im engen Wechselspiel finalisiert werden.

Hierzu ist es im ersten Schritt notwendig, die **kritischen Lösungselemente zu identifizieren**. Hierunter werden diejenigen Elemente verstanden, die starke Restriktionen hinsichtlich weiterer Lösungselemente bzw. möglicher Prozessketten aufweisen. Insbesondere die Einschränkungen hinsichtlich der Prozesse lassen sich häufig erst nach Erstellung der produktkonzeptspezifischen Prozessketten ableiten. Wenn möglich, sind diese Elemente durch andere zu ersetzen. Dies hat auf der einen Seite einen Einfluss auf die mögliche Kombination mit weiteren Lösungselementen. Auf der anderen Seite beeinflusst es die zur Verfügung stehenden Prozessschritte.

Ein weiterer Ansatz zur Finalisierung des Produktentwurfs ist der **Einsatz von MID-Lösungsmustern**. Ein MID-Lösungsmuster beschreibt ein Lösungskonzept für die Gestaltung eines MID-Produkts. Es stellt eine bewährte generalisierte Lösung für ein spezifi-

ches Entwurfsproblem zur Verfügung. Experten- bzw. Lösungswissen wird derart aufbereitet, dass es effizient im Entwurfsprozess eingesetzt werden kann. Die Muster beschreiben Lösungen für produktspezifische Anforderungen sowie mechanische und elektrische Funktionen und geben einen Überblick über die verwendeten Fertigungsverfahren. Die MID-Lösungsmuster beschreiben damit bereits eine **bewährte Kombination von Lösungselementen des Konstruktionskatalogs**. Zur einheitlichen Spezifikation eines MID-Lösungsmusters werden nach FECHTELPETER die fünf Aspekte *Merkmale*, *Gestaltung*, *Funktionen*, *Fertigungsrestriktionen* und *Anwendungsbeispiel* unterschieden (Bild 4-20) [DGJ+12], [DJG12], [Fra13].

Merkmale: Dieser Aspekt beschreibt die Charakteristika des Musters. Aufgrund der Anforderungen an das Produkt und der Restriktionen der MID-Herstellverfahren werden zwei Unterkategorien unterscheiden: *Merkmale des Produkts* und *Merkmale des Herstellprozesses*. Beispiele für relevante Merkmale des Produkts sind die geometrische Klassifikation und die Produkthanforderungen. Die geometrische Klassifikation beschreibt dabei die Form der Prozessoberfläche (z.B. 2 ½D oder 3D). Merkmale der Fertigungsprozesse sind Grundkörperherstellung, Material, Aufbau- und Verbindungstechnik und Anlagentechnik für 3D-Baugruppen.

Gestaltung: Der Aspekt Gestaltung stellt eine beispielhafte Kombination der Lösungsalternativen für die MID-Funktionen dar. Darüber hinaus zeigen die Beispiele fertigungsgerechte Konstruktionen.

MID-Funktionen: Dieser Aspekt enthält alle MID-Funktionen, die von dem MID-Muster realisiert werden können und eine Beschreibung der jeweiligen Lösungselemente aus dem Konstruktionskatalog.

Fertigungsrestriktionen: Die Einschränkungen durch die Herstellungsprozesse berücksichtigen Restriktionen einzelner Herstellungsverfahren sowie die Kombination der verschiedenen Prozesse über die gesamte MID Prozesskette. Es wird aufgezeigt, welche Anforderungen und Richtlinien berücksichtigt werden müssen.

Anwendungsbeispiel: Ein MID-Lösungsmuster ist auf eine konkrete Entwurfsaufgabe zu adaptieren. Dieser Aspekt zeigt Anwendungsbeispiele, die den erfolgreichen Einsatz des Musters verdeutlichen.



Bild 4-20: Einheitliche Spezifikation am Beispiel des MID-Musters Stacking [DGJ+12], [Ana15]

MID-Lösungsmuster konsolidieren notwendige Informationen für die Gestaltung eines innovativen MID-Produkts, unter Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen. Die Muster unterstützten den Entwickler bei der Handhabung der komplexen Wechselwirkungen von Produktanforderungen und Fertigungsrestriktionen und bilden eine kompakte Kombination von Lösungselementen ab. Hierdurch können die MID-Muster zur Steigerung der Entwicklungsqualität und zur Reduzierung der Entwicklungszeit beitragen. Da die Muster in der Regel als Steckbriefe vorliegen, können sie im Konkretisierungsprozess ideal unterstützen. Weitere MID-Muster existieren bereits. Aufgrund der Lösungselementkombination eines Musters kann es jedoch zu Wechselwirkungen mit der vorangegangenen Phase kommen. Diese Phase muss daher iterativ erarbeitet werden.

Das **Resultat** der Phase *Finalisierung des Produktentwurfs* ist ein Produktkonzept, das hinsichtlich Produkt- und Fertigungsrestriktionen analysiert wurde und die komplexen Wechselwirkungen im Produktentstehungsprozess räumlicher Schaltungsträger berücksichtigt. Darüber hinaus liegen produktkonzeptspezifische Prozessketten vor, die in der nachfolgenden Phase abschließend bewertet werden.

Phase 2.5: Bewertung und Auswahl des Fertigungsprozesses

Phase 5 schließt die integrative Konzipierung der Prozessketten mit einer Bewertung und anschließenden Auswahl des produktindividuellen Fertigungsprozesses ab. Die Prozessketten werden dabei in eine Rangfolge gebracht. Die **Rangfolge der Prozessketten** wird mithilfe eines **Kosten-Nutzen-Modells** ermittelt. Hierzu werden einerseits die (relativen) **Fertigungskosten** herangezogen und andererseits die **Eignung der Prozessketten** für das jeweilige Produktkonzept ermittelt.

Die **Fertigungskosten** der MID-Prozesse werden dabei mittels Prozesskostenrechnung über die ermittelten Einzelprozesse aufsummiert. Die grundlegende Idee der Prozesskostenrechnung ist die Aufteilung von Gemeinkosten auf die einzelnen Prozesse. Die Gemeinkosten treten somit nicht mehr als solche in Erscheinung. Das Prozesskostenmodell eignet sich gut für die wirtschaftliche Bewertung und Vorkalkulation zur Einführung der MID-Technologie, da insbesondere in der Entwicklungsphase viele indirekte Leistungen erbracht werden müssen [Fra13]. Vor dem Hintergrund einer Zielkostenrechnung (vgl. Kapitel 3.2.3) müssen die Kostenunterschiede in den Prozessketten deutlich gemacht werden, um den Entscheidungsprozess zu unterstützen. Die Prozesskettenkosten K_p ergeben sich aus der Summe der Prozesseinzelkosten, die sich wiederum aus der Summe der Ressourcen R multipliziert mit dem jeweiligen Kostensatz k ergeben (Gleichung 4-1).

$$K_p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_m * k_m$$

Mit:

K_p	Prozesskettenkosten	n	Anzahl Prozessschritte
R	Ressourcen	m	Anzahl Ressourcen für einen Prozessschritt
k	Kostensatz		

Gleichung 4-1: Berechnung der Prozesskosten K_p als Summe aller beteiligten Prozesseinzelkosten

Nach der Berechnung der spezifischen Kosten der Prozessketten werden diese auf den **Maximalwert normiert**³⁰, so dass für jede Prozesskette relative Prozesskettenkosten entstehen. Für die Kostenberechnung können sowohl allgemeine Referenzkosten angesetzt werden, die beispielsweise aus einer Wissensbasis stammen, als auch individuell ermittelte Kostensätze, die beispielsweise den eigenen Kosten im Unternehmen entsprechen. In der Praxis bietet sich hier eine Mischberechnung an, um die eigenen Fertigungskosten und -prozesse mit am Markt verfügbaren Technologien zu vergleichen. So können individuelle Prozessprioritäten berücksichtigt werden.

Anmerkung: Detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen³¹ sind auf Basis der ermittelten Prozessketten nur sehr eingeschränkt möglich und unterliegen einer großen Unsicherheit, da die einzelnen Ressourcen noch nicht final festgelegt wurden. Bei laserdirektstrukturierten Bauteilen hängt die Prozesszeit beispielsweise maßgeblich von der Anzahl der verfügbaren Laserköpfe (beeinflussen die Investitionskosten), bzw. der Zugänglichkeit der Prozessflächen und der damit einhergehenden Notwendigkeit der Bauteildrehung ab (beeinflussen die Prozesszeiten). Insbesondere die Metallisierung, in der Regel einer der Kostentreiber, ist in einer so frühen Phase nicht abschätzbar, da Faktoren wie Trommel- oder Gestellmetallisierung, Anzahl der Bauteile pro Bad etc. erst mit der finalen Produktgestaltung und in Abstimmung mit einem Metallisierer ermittelt werden können. Die ermittelten Prozessketten bilden aber eine sehr gute Grundlage für die weitere Produkt- und Produktionssystementwicklung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle notwendigen Prozessschritte in der Regel nicht bei einem Unternehmen verfügbar sind.

Anschließend wird ein Wert für die **Eignung der Prozessketten** berechnet. Dabei spielt insbesondere die Prozess-Kompatibilitätsmatrix (A3.3) eine entscheidende Rolle. Die dort berechneten Werte der normierten Spaltensumme sind ein Indikator für die Eignung des jeweiligen Prozessschritts für die Umsetzung der konzeptspezifischen Lösungselemente. Im ersten Schritt werden daher die konzeptspezifischen Lösungselemente hinsichtlich der Prozesse ausgewertet. Durch eine Aneinanderreihung der Einzelprozesse zu Prozessketten kann dann mit der Aufsummierung der zuvor ermittelten normierten Spaltenwerte ein ebenfalls normierter Wert für die Prozesskette ermittelt werden. Dieser ist ergibt sich zu einem Wert gleich (Ideal) oder kleiner (Einschränkung) 2. Das gleiche kann für die Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix für ein oder mehrere Konzepte ebenfalls durchgeführt werden. Der sich daraus ergebende Wert für die **Güte des Produktkonzepts** lässt sich ebenfalls zu maximal 2 aufsummieren und normieren. Das normierte Produkt aus **Produktkonzeptgüte** und **Prozesseignung** liefert einen Wert, der die unterschiedlichen Produkt- und Fertigungskonzepte vergleichbar macht. Dieser Wert sollte

³⁰ Eine Normierung auf den Maximalwert bringt den Vorteil, dass dieser genau zu 1 wird. Die übrigen Prozesskettenkosten ergeben sich damit automatisch zu den prozentualen Anteilen und lassen sich so in ein Portfolio überführen (Bild 5-13).

³¹ Zur frühzeitigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sei an dieser Stelle auf die Arbeiten von FRANKE (vergl. Kapitel 3.1.6, [Fra95]) und SCHIERBAUM [Sch16] verwiesen.

in Anlehnung an den Prozesskettenkosten-Wert ebenfalls normiert werden (Gleichung 4-2).

$$E_{pk} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m E_{pm}}{m} * \frac{\sum_{j=1}^n P_{gn}}{n} \right) / 4$$

Mit:

K_p	Konzeptgüte	m	Anzahl Prozesse in Prozesskette
E_p	Prozesseignung	n	Anzahl Konzeptlösungselemente
P_G	Produktkonzeptgüte		

Gleichung 4-2: Berechnung der normierten Konzeptgüte K_p als Produkt aus der Summe aller beteiligten normierten Spaltenwerte

Die Prozessgüte kann maximal den Wert 4 erreichen (daher die Division mit 4 zur Normierung). Jede bedingt geeignete Verknüpfung, sowohl auf Produkt- als auch auf Prozessseite, reduziert den maximal möglichen Wert. Als Ergebnis der beiden Berechnungen werden zwei normierte Zahlwerte erhalten, die sich in ein Portfolio überführen lassen. Hierzu werden die normierten Kostenwerte auf der Abszisse eingetragen, die normierte Konzeptgüte auf der Ordinate. Die Kostenwerte werden als Subtrahend von 1 abgezogen, so dass die minimalen Kosten auf der rechten Seite des Portfolios aufgetragen werden und das Optimum oben rechts zu finden ist. Auf diese Weise kann zügig ermittelt werden, welche Prozessketten zu bevorzugen sind. Bild 4-21 veranschaulicht dies.

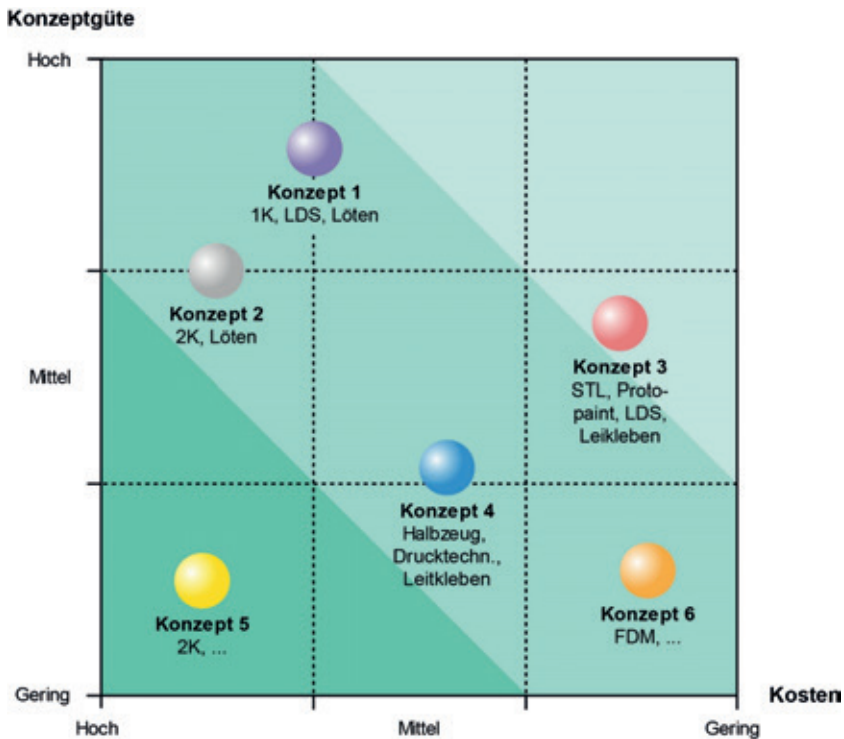


Bild 4-21: Kosten-Nutzen-Portfolio zur Bewertung der Prozesskettenkonzepte

Mithilfe der ermittelten Daten kann abschließend eine **Make-or-Buy-Analyse** durchgeführt werden. In der klassischen Produktentwicklung basieren Make-or-Buy-Analysen auf wirtschaftlichen, technologischen, logistischen und qualitativen Bewertungskriterien. In dieser Phase der integrativen Produkt- und Produktionssystemkonzipierung können wirtschaftliche, logistische und qualitative Aspekte jedoch nicht bzw. nur mit großer Unsicherheit bestimmt werden. Der Produktionsprozess ist die Grundlage zur Ermittlung dieser Aspekte und steht zu diesem Zeitpunkt noch nicht fest [Nor12].

Bei integrierten räumlichen Baugruppen werden, anders als bei größeren differentiellen mechatronischen Systemen (vgl. NORDSIEK), keine Einzelkomponenten oder -module hergestellt, sondern ein integriertes Produkt. Da jedoch insbesondere der Prozessschritt der Metallisierung häufig nicht verfügbar ist, sind Make-or-Buy-Analysen dennoch sinnvoll. Sie zielen jedoch in der Regel auf das vollständige Produkt oder separat ausführbare Prozessschritte ab.

Zunächst muss bei der MID-spezifischen Make-or-Buy-Analyse beantwortet werden, ob die **Einzelprozesse im Unternehmen verfügbar** sind. Je nach strategischer Ausrichtung des Unternehmens kann es jedoch selbst bei zutreffender Beantwortung eine Tendenz zum outsourcen geben. Dies ist an dieser Stelle zu berücksichtigen. Abschließend ist die

Frage zu beantworten, inwieweit ein neuartiger Prozess bzw. eine neuartige Fertigungstechnologie das **Kerngeschäft** des Unternehmens tangiert. Auch dies ist unter Berücksichtigung der strategischen Ausrichtung des Unternehmens zu beantworten³². Mit den Ergebnissen der Make-or-Buy-Analyse kann die Konzeptintegration und die weitere Ausarbeitung fortgeführt werden.

Das **Resultat** der Phase ist eine **produktkonzeptspezifische optimale Prozesskette**. In Verbindung mit den identifizierten Lösungselementen kann der Entwickler nun mit der weiteren Konkretisierung fortfahren. Bestehende Ansätze wie die Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID nach KAISER (vgl. Kapitel 3.3.5) unterstützen den Entwickler bei den weiteren Arbeiten entlang des Produktentstehungsprozesses, insbesondere beim domänenspezifischen Entwurf. Mithilfe der durchgeführten **Make-or-Buy-Analyse** kann direkt abgeschätzt werden, ob und wenn ja welche Prozessschritte im Unternehmen selbst umgesetzt werden. Dies liefert die Ausgangsbasis für einen optionalen Sourcing-Prozess. Bei dem beschriebenen Vorgehen handelt es sich um einen iterativen Prozess, der sich an das generelle Vorgehen zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem nach NORDSIEK [Nor12] anlehnt. Die Arbeitsschritte werden z. T. in enger Abstimmung mehrfach durchlaufen, da Festlegungen im Produktionskonzept das Produktkonzept beeinflussen und umgekehrt. Dabei wird der Konkretisierungsgrad kontinuierlich erhöht.

4.3.3 Stufe 3: Eigenschaften absichern

Um entwicklungsbegleitende Prototypen im Produktentstehungsprozess von MIDs zielgerichtet einzusetzen, sind im ersten Schritt die projektbegleitenden Randbedingungen zu klären. In der Regel ist bereits vor Beginn eines Entwicklungsprojekts klar, wann und wie Produktfunktionalitäten nachgewiesen werden müssen, sei es über definierte Meilensteine, Produktaudits oder Prüfmuster. Mit den programmspezifischen Randbedingungen, den konkreten Produkthanforderungen, den ermittelten Prozessketten und den erweiterten Prototypenklassen können in dieser Stufe nun produktindividuelle Prozessketten für die relevanten Prototypen entlang des Produktentstehungsprozesses identifiziert werden. Bild 4-22 verdeutlicht das Vorgehen.

³² Hinsichtlich strategischer Make-or-Buy-Analysen existiert eine Vielzahl von Ansätzen, die hier nicht weiter erläutert werden sollen. Stattdessen sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, wie z.B. [GPW14].

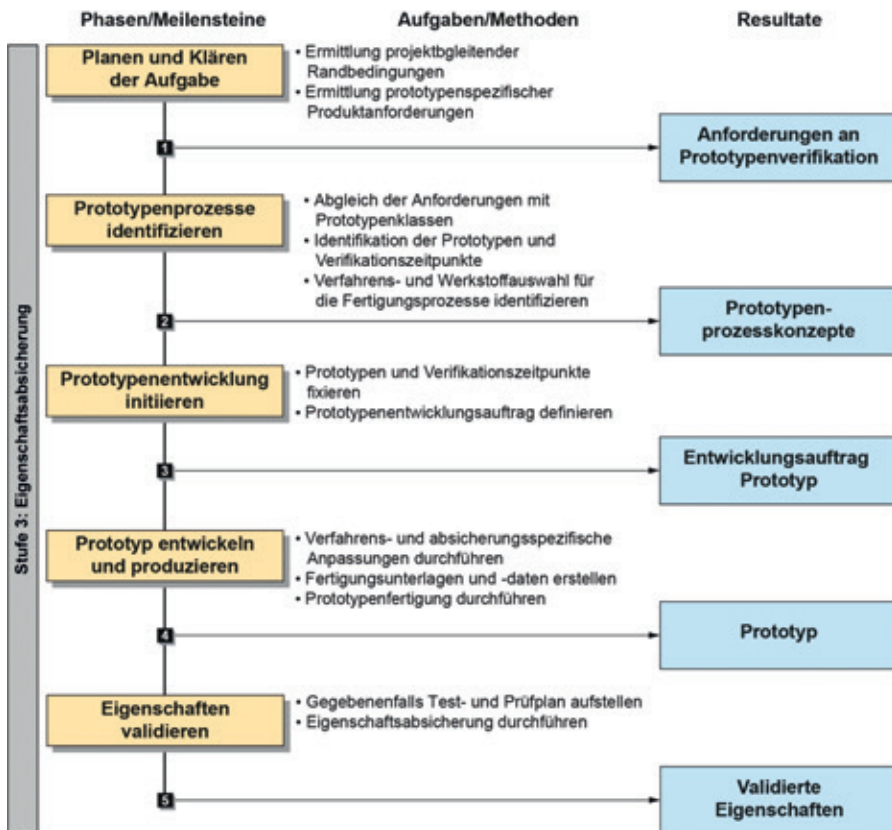


Bild 4-22: Vorgehensmodell zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen

Phase 3.1: Planen und Klären der Absicherungsaufgabe

Das Ziel der ersten Phase ist es, die Anforderungen an den Einsatz von Prototypen im Produktentstehungsprozess zu identifizieren. Hierzu werden die projektübergreifenden programmspezifischen Anforderungen und die produktspezifischen prototypenrelevanten Merkmale identifiziert. Es gilt zu identifizieren, wann welche Produkteigenschaften wie abgesichert bzw. validiert werden müssen.

Das **Resultat** der ersten Phase *Planen und Klären der Aufgabe* bildet eine umfassende Anforderungsliste hinsichtlich der zu erfüllenden Prototypenanforderungen. Die Anforderungsliste bildet die Basis für die anschließende Phase der Prototypenprozessidentifikation.

Phase 3.2: Prototypenprozesse identifizieren

Nach der Erfassung der prototypenspezifischen Anforderungen kann nun die Entwicklung der Prototypen geplant werden. Der Prototyp bildet dabei ein eigenständiges Produkt, das in den regulären Produktentstehungsprozess des eigentlichen Produkts integriert

wird. Hierfür werden im ersten Schritt die ermittelten Anforderungen mit den erarbeiteten Prototypenklassen abgeglichen. Der Abgleich erlaubt einen Überblick über die zu fertigenden Prototypen und die notwendigen Verifikationszeitpunkte entlang des Produktentstehungsprozesses des eigentlichen Produkts. Durch die identifizierten produktindividuellen Prozessketten und Materialien aus der Phase *Integrative Konzipierung von Prozessketten* existiert bereits ein Überblick über mögliche ideale Verfahrensketten. Mithilfe der **Prototypenklassen** können nun die ermittelten produktindividuellen Prozessketten für die Prototypen ausgewählt werden, die für die jeweiligen Prototypen ideal bzw. geeignet sind. Idealerweise wird dies **rückwärtsgerichtet**, vom **Produkt- und Serienprozesskonzept ausgehend**, aufgeplant. Auf diese Weise kann eine möglichst durchgängige Produkt- und Prozesskette sichergestellt und unnötige Anpassungsentwicklungen, die beim Prozesswechsel entstehen, vermieden werden. Bild 4-23 verdeutlicht das Zusammenspiel von vorab identifizierten Prozessketten, deren Rangfolge und den Einsatz der entsprechenden Prototypenklassen.

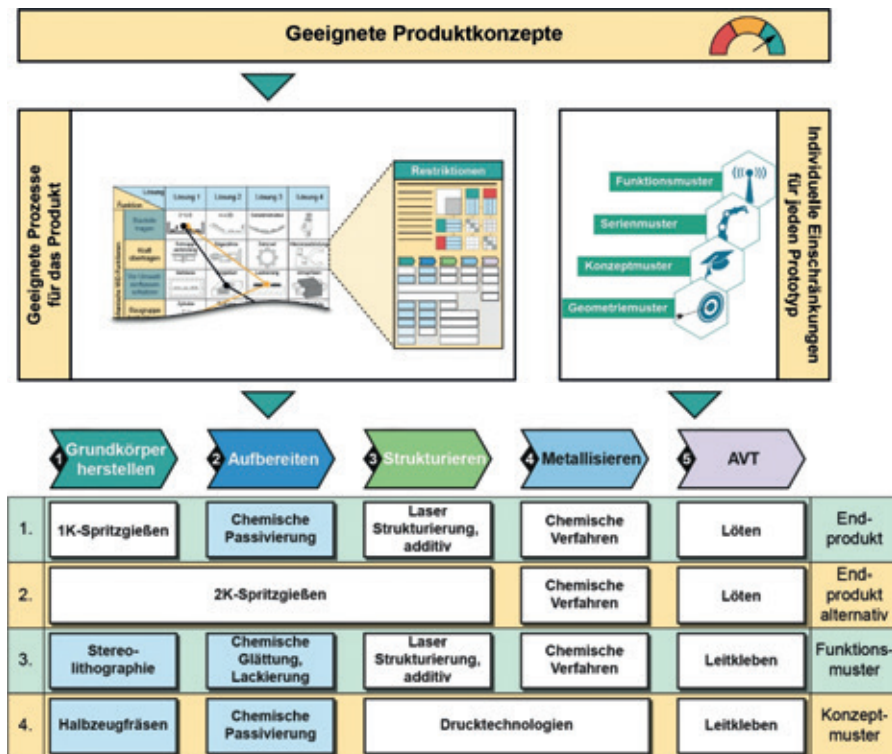


Bild 4-23: Zusammenspiel von produktindividuellen Prozessketten und Prototypenklassen

Das **Resultat** der Phase *Prototypenprozesse identifizieren* bilden Prozesskonzepte für die notwendigen Prototypen. Darüber hinaus kann der Entwickler die jeweiligen Prototypen im Projektplan verorten und entsprechend verifizierbare Eigenschaften identifizieren. Die

in den Steckbriefen der Prototypenklassen verorteten Normen und Richtlinien ermöglichen dabei eine zielgerichtete Testplanung. Dies bildet die Ausgangslage für die anschließende Phase der Prototypenentwicklung.

Phase 3.3: Prototypenentwicklung initiieren

Mithilfe der MID-Prototypenklassen und der zuvor identifizierten produktindividuellen Prozessketten sind in der vorangegangenen Phase Prototypen und deren Fertigungsprozesskonzepte identifiziert worden. Diese gilt es nun in den Produktentwicklungsprozess einzuplanen. Eine Schlüsselfunktion nimmt hierbei der **Musterbau** ein, bei dem die entsprechenden Informationen zusammenlaufen [GPW09], [LR98]. Die Produktentwicklung übernimmt die Rolle der Produktplanung und initiiert einen konkreten Entwicklungsauftrag für den Prototyp. Ein Entwicklungsauftrag für einen Prototyp besteht dabei in Anlehnung an [GPW09] aus einer *Produktspezifikation* (Anforderungskatalog, Pflichtenheft) und *Festlegungen über Stückzahlen, Herstellkosten, Entwicklungszeit und -kosten*. Diese müssen in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung erarbeitet werden.

Produktspezifikation: Ausgangsbasis für die Produktspezifikation des Prototyps bildet die Produktspezifikation des Produkts und die dedizierten und abgeleiteten Fertigungsprozesse und Produktmodelle. Darüber hinaus ist zu definieren, welche Art von Muster gefordert wird und welche Anforderungen damit verifiziert werden.

Stückzahlen: Die Definition der Stückzahlen ist abhängig von den (branchenspezifischen) Test- und Qualifizierungsmaßnahmen. Hier wird beispielsweise definiert, welche Anzahl an Prüfkörpern eine Feucht-Wärme-Lagerung oder ähnliches durchführen müssen.

Herstellkosten: Die Herstellkosten für die Prototypen müssen mit dem Musterbau abgestimmt werden, um kostspielige Werkzeug- und Prozessinvestitionen zu vermeiden. Im Zweifel ist auch zu prüfen, ob ein Teil der frühen Muster (insbesondere die generativ gefertigten Muster) beispielsweise durch Dienstleister bezogen werden kann. Idealerweise sind die entsprechenden Qualifizierungsmuster bereits in der Gesamtkalkulation berücksichtigt worden.

Entwicklungszeit und -kosten: Ähnlich der eigentlichen Produktentwicklung müssen bei der Entwicklung und Fertigung von Prototypen auch die entsprechenden Meilensteine eingehalten werden. Diese orientieren sich, insbesondere für die entwicklungsbegleitenden Prototypen, an internen Vorgaben. Wohingegen die zur Eigenschaftsabsicherung gegenüber dem Kunden eingesetzten Validierungszeitpunkte häufig durch diesen vorgegeben werden. Auch Entwicklungszeit und -kosten sind idealerweise bereits in der Gesamtkalkulation berücksichtigt worden.

Das **Resultat** der Phase *Prototypenentwicklung initiieren* bildet der Entwicklungsauftrag für den Prototyp bzw. für die unterschiedlichen geforderten Prototypen. Der Entwicklungsauftrag beinhaltet dabei schon eine konkrete prototypenoptimale Fertigungskette.

Phase 3.4: Prototyp entwickeln und produzieren

Aufbauend auf dem Entwicklungsauftrag, der schon die konkrete Prozesskette zu der Umsetzung des Prototyps enthält, kann nun die Detailkonstruktion, bzw. die Adaption des Produktkonzepts oder der Produktidee, ausdetailliert werden. Dies ist notwendig, da für die unterschiedlichen Fertigungsprozesse Gestaltanpassungen vorgenommen werden müssen. So sind beispielsweise die zu erzeugenden 3D-Gestaltmodelle für die additive Fertigung nicht beliebig von einem Verfahren auf ein anderes Übertragbar. Darüber hinaus erfordern die eigenschaftsabsichernden Maßnahmen, wie beispielsweise Test- und Prüfverfahren, individuelle Anpassungen. Insbesondere bei den frühen Prototypen, die häufig mit generativen Verfahren erzeugt werden, bietet sich daher eine agilere Entwicklungssystematik an, wie sie beispielsweise BREUNINGER vorschlägt (vgl. Kapitel 3.3.8). Dabei ist unter Umständen zu unterscheiden, ob es sich um seriennahe Prototypen handelt, die in enger Abstimmung mit dem eigentlichen Produkt und dementsprechend der Fertigung entwickelt werden oder frühe Prototypen, die zum Teil nur Teilaspekte des späteren Produkts widerspiegeln. Anschließend kann der Musterbau mit der Fertigung des eigentlichen Prototyps beginnen.

Das Resultat der Phase *Prototyp entwickeln und produzieren* ist der fertige für den spezifischen Anwendungsfall entwickelte und produzierte Prototyp. Der Prototyp bildet die Basis für die entwicklungsbegleitende Eigenschaftsabsicherung.

Phase 3.5: Eigenschaften validieren

Je nach ausgewählter Prototypenklasse und der dahinterstehenden Intention, ob und welche Test- oder Prüfverfahren durchgeführt werden müssen, ist ein entsprechender Plan zu erstellen. Dieser bildet die Basis für die Eigenschaftsabsicherung. Bei einfacheren Geometrie- oder Konzeptmustern kann dies in der Regel entfallen. Auch bei einfacheren Funktionsmustern, um beispielsweise eine elektronische Funktionalität in der frühen Phase nachzuweisen, kann auf einen umfangreichen Prüfplan in der Regel verzichtet werden. Insbesondere bei norm- und branchenspezifischen Mustern, ist dieser jedoch zwingend erforderlich. Mithilfe der Ergebnisse des Prototyps können die Eigenschaften und Anforderungen an das Produkt validiert werden. Die Phase der Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen wird damit zu einem parallelen Entwicklungsstrang (Bild 4-24).

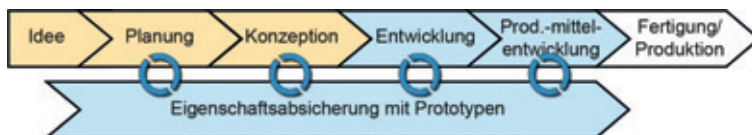


Bild 4-24: Parallele Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen

Das Resultat der Phase *Eigenschaften validieren* liefert die notwendigen Impulse zur zielgerichteten Konkretisierung der Produktentwicklung, sei es mithilfe grober Machbarkeitstests, als auch mittels aufwendiger Test- und Prüfergebnisse. Die komplette 3. Stufe

Eigenschaftsabsicherung kann iterativ mehrfach durchlaufen werden, um so je nach Projektstand zielgerichtet optimale Prototypen zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses einzusetzen.

4.4 Software-Tool MID-Planer

Da viele Ansätze aus der beschriebenen Systematik auf einem komplexen Wechselspiel zwischen Produktanforderungen und -lösungsmustern auf der einen Seite und Prozessrestriktionen auf der anderen Seite beruhen, ist die Verwendung einer softwaregestützten Wissensbasis sinnvoll. Im Rahmen des *AiF-Forschungsprojekts MID-Plan* ist mit Hilfe eines projektbegleitenden Expertenausschusses (PA)³³ diese Wissensbasis aufgebaut und in eine Datenbank überführt worden. Der im Projekt entwickelte Entwicklungsplaner macht dieses Wissensbasis nun mittels verschiedener Hilfsmittel zugänglich. Bild 4-23 zeigt den schematischen Aufbau des dieses MID-Planers.

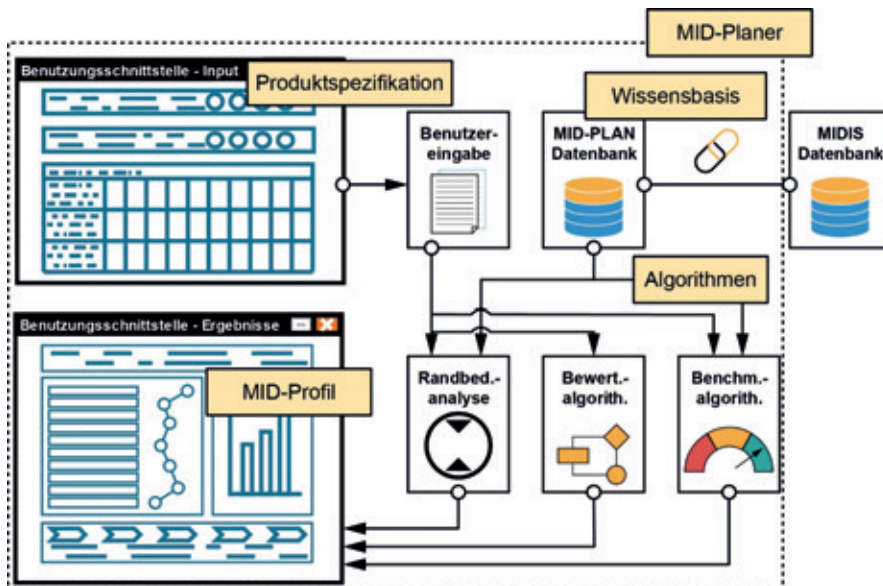


Bild 4-25: Aufbau des MID-Planer aus dem AiF-Projekt MID-Plan (IGF-Vorhaben 18445 N / 1)

Das Schema zur MID-Produktspezifikation (Anhang A2.1) wurde dabei direkt zur Eingabe der Produktinformationen in die **Benutzungsschnittstelle** integriert. Der Benutzer

³³ Die Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses decken die gesamte Wertschöpfungskette zur Herstellung räumlicher Schaltungsträger ab: 2E mechatronic GmbH & Co. KG, BMW Group, CostSim Consulting, LaserMicronics GmbH, LPKF Laser & Electronics AG, MID Solutions GmbH, PKT Präzisions-Kunststoff-Teile GmbH, Plexpert GmbH, Raschig GmbH, Robert Bosch GmbH und Seuffer GmbH & Co. KG

erkennt so frühzeitig, welche Informationen für die Minimalspezifikation benötigt werden. Die hinterlegten Algorithmen prüfen dabei zur Laufzeit jede Eingabe des Benutzers und gleichen diese mit den Randbedingungen der in der Datenbank hinterlegten Informationen ab. Somit erfolgt die Analyse zur Abschätzung der Machbarkeit schon bei der Spezifikation der Produktidee. Notwendige Informationen zu Materialien, Prozessen, aber auch die notwendigen Kombinationsmatrizen wurden in der **Wissensbasis** implementiert. Der Entwicklungsplaner hat eine Schnittstelle zu WebMIDIS-Datenbank, so dass sichergestellt werden kann, dass die Informationen stets aktuell gehalten werden können³⁴. Die **Randbedingungenanalyse** sowie die **Bewertungs- und Benchmarkalgorithmen** wurden ebenfalls implementiert und mit den entsprechenden Datenbanken verknüpft.

Bei der Ergebnisauswertung werden dem Benutzer sowohl das **MID-Profil** des Produktkonzepts als auch die ermittelten produktindividuellen Prozessschritte ausgegeben. Mit diesen können in einem zweiten Schritt die Prozessketten entwickelt werden.

Die technische Implementierung des Entwicklungsplaners erfordert neben der Datenbank, die alle notwendigen Informationen zu Fertigungsprozessen, Materialien und Applikationen beinhaltet, eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) sowie eine Implementierung der verschiedenen Berechnungsalgorithmen unter anderem zur Analyse des MID-Potenzials. Um das komplexe Wechselspiel zwischen Datenbanken, GUI und Berechnungsalgorithmen umzusetzen wurde auf ein spezielles Web-Framework³⁵ zurückgegriffen, das insbesondere für die Umsetzung von Datenbankgestützten Webanwendungen geeignet ist. Die Webanwendung erlaubt es Entwicklern weltweit auf das System zuzugreifen. Darüber hinaus erlaubt die Software auch einen dezidierten Zugriff auf einen Teil der Wissensbasis. So sind detaillierte Informationen zu dem erweiterten Referenzprozess und einzelnen Prozessschritten zugänglich.

³⁴ Die WebMIDIS-Datenbank beruht auf dem Ansatz des Web 2.0. Mitglieder der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. haben die Möglichkeit, Materialien, Prozess und Applikationen einzupflegen. Vor einer finalen Freigabe werden die Eingaben jedoch von einem Systemadministrator überprüft.

³⁵ Für den MID-Planer wurde das Web-Framework Django verwendet. Es ist ein in Python geschriebenes quelloffenes Webframework, das einem Model-View-Presenter-Schema folgt, also der Trennung von Modell und Ansicht.

5 Anwendung der Systematik

In diesem Kapitel wird die im vorgehenden Kapitel vorgestellte *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* validiert. Anhand des Forschungsdemonstrators MIDster der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. soll dargestellt werden, wie die Systematik in der Anwendung funktioniert und welche wesentlichen Ergebnisse erzielt werden. Die Validierung und eine Beschreibung des MIDster erfolgt zunächst in Kapitel 5.1. In Kapitel 5.2 wird auf Basis des Validierungsbeispiels die erarbeitete Systematik an den Anforderungen der Problemanalyse bewertet.

5.1 Anwendungsbeispiel MIDster

Der MIDster ist ein Forschungs- und Technologiedemonstrator der der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V.. Angelehnt an die Konturen eines Sportwagens verbindet der Demonstrator innovative technologiespezifische mechanische und elektronische Funktionen. So verfügt der MIDster beispielsweise über eine Batteriehalterung mit magnetischer Fixierung, die direkt in die Unterseite eingebracht ist. Der Serien-MIDster wurde auf eine Stückzahl von 1000 Stück ausgelegt, gefertigt im LPKF-LDS-Verfahren (Bild 5-1).



Bild 5-1: Fotos des MIDsters (links: Oberseite mit elektronischen Bauelementen, rechts: Unterseite mit eingesetzter Batterie)

Der MIDster verfügt über drei innovative elektronische Funktionen, die nach Aktivierung der Schaltung über kapazitive Taster aktiviert werden:

- Eine **Wasserwaage**, die eine Verkipfung im Raum durch entsprechendes Aufleuchten von LEDs anzeigt.
- Ein **Geschicklichkeitsspiel**, bei dem durch wiederholtes Betätigen eines weiteren Funktionstasters LEDs in einer Reihe aktiviert werden. Die Herausforderung liegt hierbei in der Bewegung und Fixierung eines wandernden Lichtpunktes.
- Die dritte Funktion stellt einen **Schriftzug** dar, der durch ein schnelles horizontales hin und her Bewegen des MIDsters dargestellt wird.

Darüber hinaus werden weitere MID-spezifische Funktionen umgesetzt, die im Folgenden erläutert werden [SFV+13].

5.1.1 Stufe 1: Machbarkeit analysieren

Stufe 1 bildet mit einer ersten Machbarkeitsanalyse den Auftakt zur Anwendung der Systematik. Mithilfe einer Randbedingungs- sowie einer Vergleichsanalyse, werden mögliche Prozesse identifiziert und zu kompatiblen Prozessketten zusammengesetzt.

Phase 1.1: Beschreibung des Produktkonzepts

Den Ausgangspunkt für die Systematik bildet die Erfassung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen, die eine direkte Auswirkung auf die Produktionsrestriktionen haben. Im ersten Schritt werden daher die initialen Partialmodelle analysiert. Aus den Partialmodellen Anforderungen und Umfeld werden die Kriterien zur Abschätzung der Machbarkeit identifiziert. Hierzu zählen insbesondere diejenigen Kriterien, die Auswirkungen auf das zu verwendende Material haben. Dazu gehören beispielsweise: Anforderungen an die mechanischen Belastungen, Anforderungen an den Temperatureinsatzbereich oder aggressive Medien in der Umgebung des Systems (Bild 5-2).

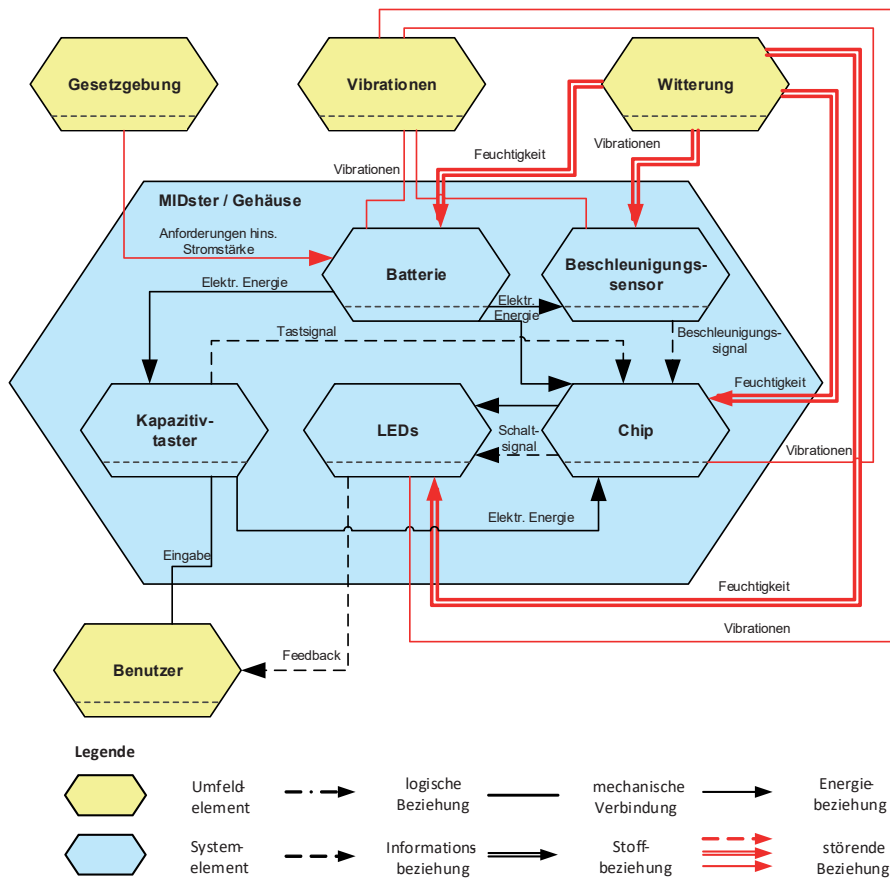


Bild 5-2: Gekoppeltes Wirkstruktur-/Umfeldmodell des MIDster

Über das erste grobe Gestalt-Modell des Systems werden Informationen hinsichtlich der geometrischen Klasse und des Hüllvolumens ermittelt. Sollten schon bekannte Prozessflächen vorhanden sein, sind diese ebenfalls zu berücksichtigen (Bild 5-3).

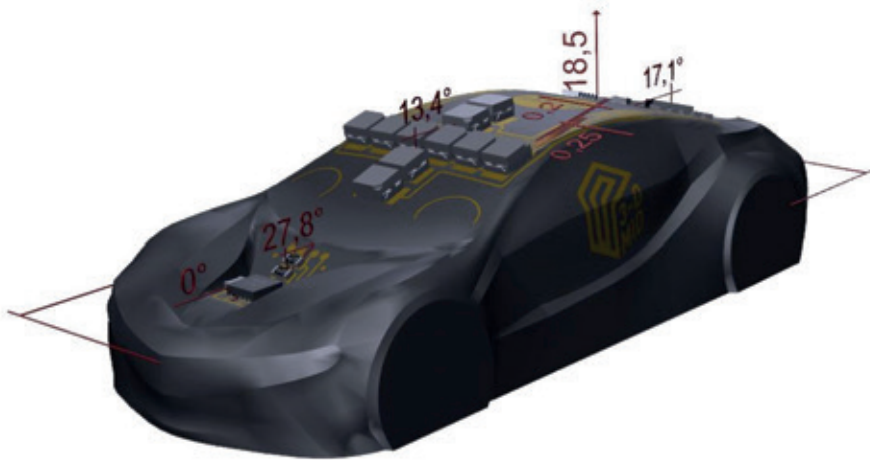


Bild 5-3: Erstes grobes CAD-Modell des MIDster mit eingezeichneten Winkeln der Prozessflächen

Das Partialmodell Funktionen liefert mit der Funktionshierarchie erste Produktfunktionen, die die Liste der nichtfunktionalen Anforderungen um funktionale Anforderungen ergänzt (Bild 5-4). Diese werden in den entwickelten Steckbrief zur MID-Produktspezifikation überführt (Anhang A2.1), er dient als Erfassungsbogen zur Beschreibung des zu entwickelnden Systems.

Auf der funktionalen Ebene lässt sich der MIDster durch mechanische, elektrische und optische Funktionen beschreiben, diese wurden entsprechend im Erfassungsbogen markiert (Bild 5-5). Sie werden im weiteren Verlauf zur Ermittlung von Vergleichsprodukten und Auswahl von Lösungselementen genutzt.

An den MIDster werden keine spezifischen Anforderungen hinsichtlich aggressiver Medien gestellt. Die Prozesstemperaturen sind gleichwohl, die durch die Aufbau- und Verbindungstechnik entstehen, von hoher Relevanz. Als Basis für die kurzzeitige Temperaturbelastung diente die Schmelztemperatur des SnAgCu-Lotsystems [Sch13]. Zur Absicherung gegen mögliche Schwankungen des angegebenen Temperaturbereiches wurden die Toleranzgrenzen auf ± 20 Grad festgelegt. Auf den MIDster wirken im Normalbetrieb rein statische mechanische Belastungen. Mögliche Wechselbelastungen durch Schütteln oder Schlagbelastungen, z.B. das Herunterfallen, sind zu vernachlässigen.

Die Umwelteinflüsse stellen einen ersten Filter für die verfügbaren Werkstoffe dar. Insbesondere die hohen Dauergebrauchstemperaturen, die durch den Lötprozess entstehen, sind als kritisch für die Materialauswahl einzustufen.

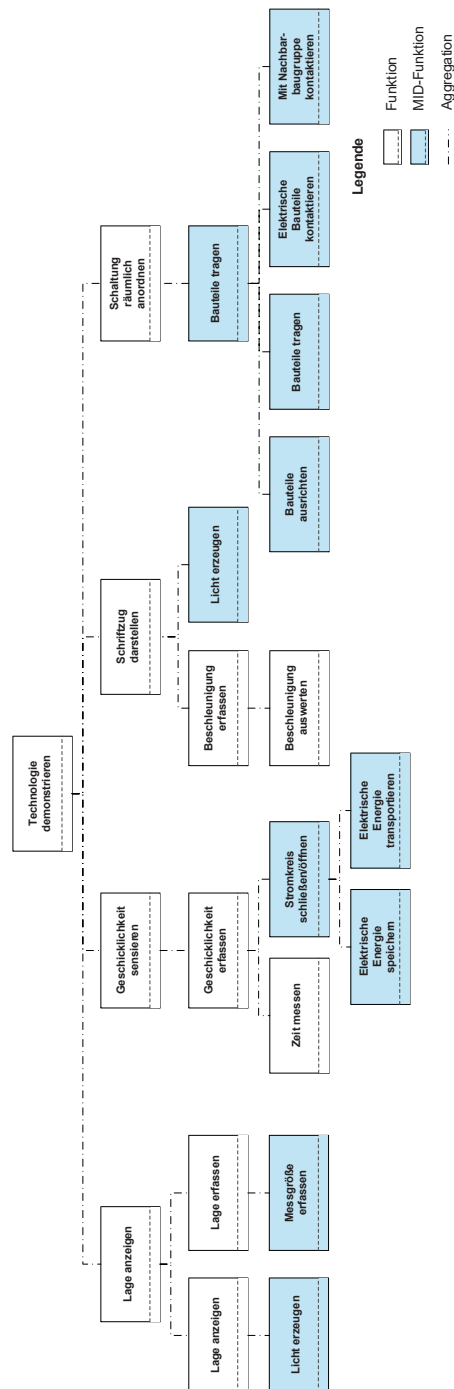


Bild 5-4: Funktionsmodell des MIDster

MID-Produktkonzept																			
1. Funktionale Systembeschreibung Die Spezifikation der Produktidee mittels MID-relevanter Produkt-Funktionen dient dazu, bereits erfolgreich umgesetzte Applikationen in der WebMIDIS-Datenbank zu finden. <div style="text-align: right;"> </div>																			
1.1 Mechanische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Abstand halten <input checked="" type="checkbox"/> Bauteile ausrichten <input type="checkbox"/> Baugruppe kontaktieren <input checked="" type="checkbox"/> Bauteile stabilisieren <input checked="" type="checkbox"/> Bauteile tragen <input type="checkbox"/> Kraft übertragen <input type="checkbox"/> Bauteile markieren <input type="checkbox"/> Vor Umwelteinflüssen schützen 	1.3 Fluidische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Fluide speichern <input type="checkbox"/> Fluide mischen <input type="checkbox"/> Fluid beschleunigen/verzögern <input type="checkbox"/> Fluid bewegen <input type="checkbox"/> Fluid leiten 																		
1.2 Elektrische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Elektr. Energie speichern <input checked="" type="checkbox"/> Messgrößen erfassen <input checked="" type="checkbox"/> Elektr. Bauteile kontaktieren <input type="checkbox"/> Elektromagn. Felder erzeugen <input type="checkbox"/> Elektromagn. Felder schirmen <input type="checkbox"/> Vor hohen Strömen sichern <input checked="" type="checkbox"/> Stromkreis schließen/öffnen <input checked="" type="checkbox"/> Elektr. Energie transportieren <input checked="" type="checkbox"/> Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren 	1.4 Kommunikative Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Signale erzeugen <input type="checkbox"/> Signale leiten <input type="checkbox"/> Signale einkoppeln <input type="checkbox"/> Signale auskoppeln 																		
1.5 Optische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Licht erzeugen <input type="checkbox"/> Licht leiten <input type="checkbox"/> Licht aufnehmen 																			
1.6 Magnetische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Magnetfeld erzeugen 																			
2. Spezifikation der Umwelteinflüsse Die zu erwartenden Bedingungen im Umfeld des zu entwickelnden Systems (thermische und mechanische Belastungen, Aggressive Medien) werden zur Werkstoffselektion verwendet. <div style="text-align: right;"> </div>																			
2.1 Thermische Belastung <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Dauergebrauchstemperatur [°C]</td> <td>Min.</td> <td>-20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Max.</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>Kurzzeitige Temperatur [°C]</td> <td>Max.</td> <td>235</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Temperaturtoleranz [°C]</td> </tr> <tr> <td colspan="3"> <input type="checkbox"/> ±0 <input type="checkbox"/> ±10 <input checked="" type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40 </td> </tr> </table>	Dauergebrauchstemperatur [°C]	Min.	-20		Max.	200	Kurzzeitige Temperatur [°C]	Max.	235	Temperaturtoleranz [°C]			<input type="checkbox"/> ±0 <input type="checkbox"/> ±10 <input checked="" type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40			2.2 Mechanische Belastung <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Wechselbelastung <input type="checkbox"/> Schlagbelastung <input checked="" type="checkbox"/> Statische Belastung 			
Dauergebrauchstemperatur [°C]	Min.	-20																	
	Max.	200																	
Kurzzeitige Temperatur [°C]	Max.	235																	
Temperaturtoleranz [°C]																			
<input type="checkbox"/> ±0 <input type="checkbox"/> ±10 <input checked="" type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40																			
2.3 Aggressive Medien <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Schwache Laugen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Starke Laugen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Trichloräthylen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Benzin</td> <td><input type="checkbox"/> Perchlorethylen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren</td> <td><input type="checkbox"/> Aceton</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren</td> <td><input type="checkbox"/> Alkohole</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren</td> <td><input type="checkbox"/> Heißes Wasser</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Starke organische Säuren</td> <td><input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen</td> <td></td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe	<input type="checkbox"/> Schwache Laugen	<input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Starke Laugen	<input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Trichloräthylen	<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Perchlorethylen	<input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Aceton	<input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Alkohole	<input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren	<input type="checkbox"/> Heißes Wasser	<input type="checkbox"/> Starke organische Säuren	<input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung	<input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen	
<input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe	<input type="checkbox"/> Schwache Laugen																		
<input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Starke Laugen																		
<input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Trichloräthylen																		
<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Perchlorethylen																		
<input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Aceton																		
<input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Alkohole																		
<input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren	<input type="checkbox"/> Heißes Wasser																		
<input type="checkbox"/> Starke organische Säuren	<input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung																		
<input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen																			

MID-Produktkonzept 1 von 2

Bild 5-5: MID-Produktkonzept für den MIDster (Seite 1 von 2)

Die Spezifikation der Gestalt erfolgt je nach Anwendungsfall häufig über das zur Verfügung stehende Volumen, das eine Komponente in einer Systementwicklung einnehmen darf. Der MIDster ist jedoch im Gegensatz zu Teilsystemen ein eigenständiges Produkt.

Daten zu Hüllgeometrie, Form und voraussichtlicher Wandstärke werden dennoch benötigt, da insbesondere das Volumen einen Filter für Maschinen und Anlagen sowie die chemischen Metallisierungsschritte (maximale Badgröße) darstellt (Bild 5-6).

MID-Produktkonzept

3. Spezifikation der Gestalt

Die Aspekte der Gestalt stellen signifikante Größen bei der Prozessselektion zur Grundkörperherstellung und selektiver Metallisierung dar.

3.1 Hüllgeometrie

☐ Einfacher Regelkörper

☐ Kombination aus Regelkörpern

☐ Komplexer Körper ohne Hinterschritte

☐ Komplexer Körper mit Hinterschritten

☒ Freiformkörper

3.2 Hüllvolumen

Länge [mm]

70

Breite [mm]

30

Höhe [mm]

20

3.3 Wandstärke

Wandstärke [mm]

Min.

0,5

3.4 Leiterbahnen

Layout

Leiterbahnbreite [µm]

150

Leiterbahnabstand [µm]

150

Leiterbahnhöhe [µm]

13,5

oder

Eigenschaften

Stromstärke [A]

Max.

0,5

Spannung [V]

Max.

3

Zulässige Temperatur-differenz [°C]

☐ +0

☒ +10

☐ +20

☐ +30

☐ +40

3.5 Geometrische Klasse

☐ 0

☐ 1A

☐ 1B

☐ 1C

☐ 2

☐ 3A

☒ 3B

Bild 5-6: MID-Produktkonzept für den MIDster (Seite 2 von 2)

Leiterbahnbreite und **-abstand** liefern einen direkten Indikator für geeignete Verfahren und können in der Regel direkt oder indirekt (z.B. über geforderte Bauelementklassen, spezifische Chips usw.) aus den Anforderungen abgeleitet werden. Einen zweiten Ansatz zur Bestimmung der Layoutgeometrien liefert die IPC-2221 (für reines Kupfer), in der eine Korrelation zwischen Stromstärke, Breite und Höhe der Leiterbahnen sowie einer Temperaturerhöhung formal beschrieben ist [IPC2221]. Für den MIDster ergibt sich beispielsweise aus der favorisierten Stromquelle (Knopfzelle CR 2032, 3V), dem minimalen Leiterbahnabstand aus der IPC und einer für die Bauelemente geeigneten Leiterbahnbreite, eine Leiterbahnschichthöhe von minimal 4 µm für reines Kupfer. Dies muss mit

einem Korrekturfaktor von mindestens 3,3³⁶ multipliziert werden um der schlechteren Leitfähigkeit von bei MIDs üblichen Schichtsystemen Rechnung zu tragen.

Phase 1.2: Datenanalyse und Benchmark

Im Anschluss an die Erfassung der MID-relevanten Produktaspekte erfolgt eine Bewertung anhand ihrer Eignung für den Einsatz der MID-Technologie. Hierzu werden die spezifizierten Aspekte in das Bewertungsschema des MID-Profil überführt (Anhang A2.2). Für den MIDster ergibt sich mit 57 von 68 möglichen Punkten (84%) ein relativ hoher Wert für die Potenzialnutzung (Bild 5-7).

MID-Profil					
Bewertungskriterium	Bewertungsskala				
	0	1	2	3	4
Funktionen	< 1	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4
Min. Dauergebrauchstemperatur [C°]	< - 70	≥ - 70	≥ - 50	≥ - 30	≥ - 10
Max. Dauergebrauchstemperatur [C°]	> 260	≤ 260	≤ 200	≤ 105	≤ 70
Max. Gebrauchstemperatur [°C]	> 260	≤ 260	≤ 200	≤ 105	≤ 70
Aggressive Medien (M)					
Form der Hüllgeometrie	Einf. Regelkörper	Komb. aus Regelkörpern	Kompl. Körper o. Hinterschn.	Kompl. Körper mit Hinterschn.	Freiformkörper
Länge [mm]	> 600	≤ 600	≤ 400	≤ 200	≤ 100
Breite [mm]	> 600	≤ 600	≤ 400	≤ 200	≤ 100
Höhe [mm]	> 230	≤ 180	≤ 130	≤ 80	≤ 25
Volumen [cm³ = 10³ mm³]	> 500	≤ 500	≤ 150	≤ 50	≤ 10
Min. Wandstärke [mm]	> 3	≤ 3	≤ 1,5	≤ 1	≤ 0,6
Min. Leiterbahnbreite [µm]	> 500	≤ 500	≤ 400	≤ 300	≤ 200
Min. Leiterbahnabstand [µm]	> 500	≤ 500	≤ 400	≤ 300	≤ 200
Min. Leiterbahnhöhe [µm]	> 100	≤ 100	≤ 50	≤ 30	≤ 15
Max. Stromstärke [A]	> 1,5	≤ 1,5	≤ 1	≤ 0,7	≤ 0,5
Max. Spannung (DC oder AC Peak) [V]	> 300	≤ 100	≤ 60	≤ 30	≤ 10
Geometrische Klasse	0,1A	1B	1C	2	3A, 3B
Summe					
Konzeptbewertung hinsichtlich der Potenzialnutzung					57/68

Bild 5-7: MID-Profil des MIDsters

Ein spezifisches MID-Profil wurde auch für alle in der WebMIDIS verfügbaren Applikationen und Demonstratoren erstellt. Diese Profile dienen als Referenzdaten.

Die Form der Hüllgeometrie und die geometrische Klasse des MIDsters haben ein hohes Potenzial zur Umsetzung des Produktes als spritzgegossener Schaltungsträger. Das benötigte Schaltungslayout für die Applikation lässt sich aufgrund der kleinen Ströme ideal in der MID-Technologie realisieren. Darüber hinaus verfügt der MIDster über eine hohe

³⁶ Laut Expertenbefragung hat chem. Kupfer eine Leitfähigkeit von ca. 3/10 gegenüber reinem Kupfer.

Anzahl an mechanischen und elektronischen Funktionen, die auf dem Funktionsträger umgesetzt werden sollen.

Mithilfe der spezifizierten Funktionen kann nun ein Abgleich mit bereits umgesetzten Applikationen aus der WebMIDIS-Datenbank durchgeführt werden. Die funktionale Analyse ergab dabei mehrere passende Applikationen, von denen die drei mit den meisten Überschneidungen in Bild 5-8 dargestellt sind.



Bild 5-8: Applikationen der WebMIDIS-Datenbank mit gleichartigen Funktionen wie beim MIDster

Mithilfe der Informationen über bereits umgesetzte Funktionen kann in Stufe 2 das Produktkonzept weiter ausdetailliert werden. Gleichzeitig liefert der Abgleich Informationen zu etablierten Herstellprozessen und Materialien die den Entwickler bei der weiteren Konkretisierung unterstützen.

Phase 1.3: Bewertung der Ergebnisse

Neben der Analyse des Schaltungslayouts sind für die Machbarkeitsanalyse noch weitere **nichtfunktionale Analysen** erforderlich. Im ersten Schritt werden die für den MIDster angesetzten **Temperatureinsatzbereiche** und **-grenzen** analysiert um geeignete **Materialien** zu identifizieren. Die hohen Maximaltemperaturen führen dazu, dass sich für den MIDster nur Hochtemperatur-Kunststoffe eignen, im speziellen Fall: Polyetheretherketon (PEEK), Polyimid (PI), Polyphenylensulfid (PPS) und flüssigkristalline Polymere (Liquid-Crystal-Polymer, LCP).

Das **Volumen** des MIDster ist unkritisch und schränkt keines der MID-spezifischen Verfahren ein. Die **Geometrie** mit Freiformflächen und dreidimensionalen Prozessflächen wirken hingegen limitierend für eine ganze Reihe von Prozessen. Gleiches gilt für die Beabsichtigte **minimale Wandstärke**, die für die Durchkontaktierungen erforderlich ist. Die Auswertung führt zu einer reduzierten Anzahl geeigneter Prozesse, die nachfolgend im Referenzprozess verortet sind (Bild 5-9).

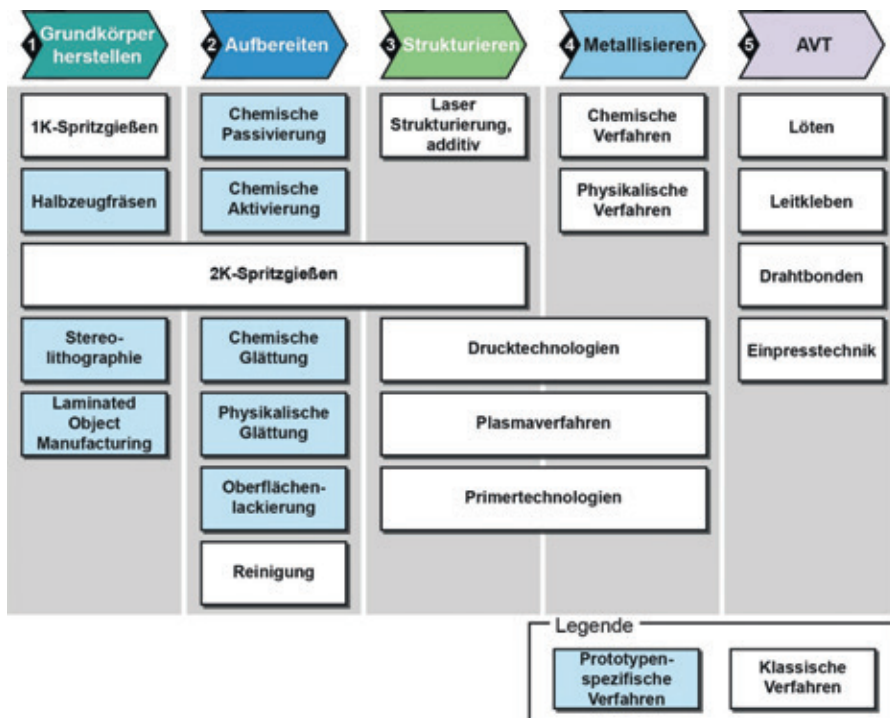


Bild 5-9: Reduzierter Referenzprozess mit geeigneten Verfahren für den MIDster

Die initiale Analyse zeigt, dass für jede Phase des Referenzprozesses geeignete Prozessschritte identifiziert werden konnten. Damit wird die grundsätzliche Machbarkeit aufgezeigt.

5.1.2 Stufe 2: Prozessketten konzipieren

Die zweite Stufe bildet den Übergang von der Machbarkeitsanalyse zum konkreten prototypengestützten Entwicklungsprojekt. Das Ziel der Stufe ist ein umsetzungsnahes Produktkonzept samt entsprechendem Fertigungskonzept. Dem Produktkonzept werden hierzu Lösungselemente aus dem erweiterten Konstruktionskatalog zugeordnet. Mithilfe einer Kompatibilitätsmatrix können Abhängigkeiten zu anderen Lösungselementen identifiziert werden. Darüber hinaus sind den Lösungselementen Prozessrestriktionen zugeordnet. Es ergibt sich eine Liste an kompatiblen Lösungselementen, die im weiteren Verlauf der Produktentwicklung konkretisiert werden müssen.

Phase 2.1: Erweiterung der Produktspezifikation

Im ersten Schritt müssen die groben Anforderungen an das Produktkonzept aktualisiert und erweitert werden. Für die Analyse werden detailliertere Informationen zu *Stückzahl*,

Varianten, Toleranzen, Automatisierbarkeit, metallisierte Fläche, Branchen und zu erfüllenden *Normen* benötigt, die nachfolgend kurz erläutert werden.

An den MIDster werden jedoch neben der Stückzahl keine weiteren Anforderungen gestellt, so dass auf eine detaillierte Auswertung der Kompatibilität erweiterter Prozess-Anforderungen (A3.5) verzichtet werden kann.

Phase 2.2: MID-spezifische Lösungselemente

Auf Grundlage der identifizierten Fertigungstechnologien aus Stufe 1 und der Liste der kompatiblen Lösungselemente lassen sich erste Prozessketten entwickeln. Mit den in Stufe 1 spezifizierten Funktionen ergibt sich zunächst ein reduzierter Konstruktionskatalog. Für die retrospektive Validierung der Systematik anhand des MIDsters werden dementsprechend die beim MIDster verwendeten Lösungselemente für die weiteren Schritte verwendet (Bild 5-10).

Lösung		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Funktion								
Elektrische MID-Funktionen	Elektrische Energie transportieren	Leiterbahn	Antenne	Keramikleiter				
	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Stecker	Kontaktfeder	Direktsteckprinzip	Kontaktfäche	Einpressstift	SMD-Stecker	Kontakthügel
	Elektrische Bauteile kontaktieren	Lötverbindung	Kleilverbindung	Bondverbindung			Flip-Chip-Verbindung	
	Elektrische Energie speichern	Akku (integriert)	Batterie (auswechseln)	Schwungrad	Spule (Magnetfeld)	Druckluftspeicher	Federelement	
	Stromkreis schließen/ öffnen	Schnappschalter	Selbstschalter	Bi-Metall	Kapazitätaster			
	Messgrößen erfassen	Bauelement						
Mechanische MID-Funktionen	Bauteile ausrichten	Fluchtung	Anschlag	Zentrierstift	Einkerbung	Bohrung	Nut	Magnet
	Bauteile stabilisieren	Versteifungen	Abstandhalter	Vergießen	Wabenstruktur	Lastpuffer		
	Bauteile tragen	2 1/2 D	n x 2 D	Schalenstruktur	3D			
Optische	Licht erzeugen	Glühlampe	LED	OLED	Laser			

Bild 5-10: Reduzierter Konstruktionskatalog für den MIDster

Betrachtet man nun die für den MIDster reduzierte Lösungselemente-Kombinationsmatrix (Bild 5-11) zeigt sich, dass es kaum kritische Kombinationen gibt, da die entsprechenden Kompatibilitätswerte alle größer oder gleich 1 sind. Lediglich der Einsatz von Magneten ist unter gleichzeitiger Einbringung von elektronischen Bauelementen zu berücksichtigen. Beim MIDster wurde dies einerseits durch einen größeren räumlichen Abstand der Elemente zueinander und durch eine Anbringung des Magneten auf der gegenüberliegenden Seite kompensiert. Für das Produktkonzept aus Funktionen und ausgewählten Lösungselementen lässt sich ein Wert für die Produktkonzeptgüte von 1,27 errechnen. Dieser Wert wird in den nachfolgenden Berechnungen dem Konzept zugrunde gelegt.

In wie weit sind die Lösungselemente i (Zeile) und j (Spalte) kompatibel?											
		Elektrische Energie transportieren	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Elektrische Bauteile kontaktieren	Elektrische Energie speichern	Stromkreis schließen/öffnen	Messgröße erfassen	Bauteile ausrichten	Bauteile stabilisieren	Bauteile tragen	Licht erzeugen
0 kritische Kombination 1 unkritische Kombination 2 vorteilhafte Kombination		Leiterbahn	Kontaktfläche	Lötverbindung	Batterie	Kapazitivschalter	Bauelement	Magnet	Versteifung	3D	LED
Elektrische Energie transportieren	Leiterbahn		2	1	1	2	1	1	1	1	2
Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Kontaktfläche	2		1	2	1	1	2	1	1	1
Elektrische Bauteile kontaktieren	Lötverbindung	1	1		2	1	2	1	1	1	2
Elektrische Energie speichern	Batterie	1	2	2		2	2	1	1	1	1
Stromkreis schließen/öffnen	Kapazitivschalter	2	1	1	2		1	1	1	1	2
Messgröße erfassen	Bauelement	1	1	2	2	1		0	2	1	2
Bauteile ausrichten	Magnet	1	2	1	1	1	0		1	1	1
Bauteile stabilisieren	Versteifung	1	1	1	1	1	2	1		1	1
Bauteile tragen	3D	1	1	1	1	1	1	1	1		1
Licht erzeugen	LED	2	1	2	1	2	2	1	1	1	
Normiert		1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,0	1,1	1,0	1,4

► 1,27

Bild 5-11: Ausschnitt aus der Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix mit den für den MIDster identifizierten Funktionen und Lösungselementen

Phase 2.3: Konzipierung der Prozessketten

Im nächsten Schritt werden zu dem Produktkonzept passende Fertigungsprozesse identifiziert. Allein aufgrund der Einzelprozesse (Bild 5-6) würden sich für den MIDster ca. 800 mögliche Prozesskombinationen ergeben, die sich zum Teil nur durch Variation eines

einzelnen Prozessschritts unterscheiden. Mithilfe der Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix kann jedoch eine erste Vorauswahl getroffen werden. Insbesondere, wenn auf eine Toolunterstützung verzichtet wird, sollte mit diesem manuellen Ansatz die Komplexität reduziert werden. Die normierte Summe gibt für jeden einzelnen Prozess einen Kompatibilitätswert zu dem Produktkonzept aus, die Prozesseignung (vgl. Gleichung 4-2). Werte die bei Prozessschritten gegen 2 tendieren zeigen, dass diese geeignet sind, die ausgewählten Lösungselemente umzusetzen. Auch wird erkennbar, dass beispielsweise der Strukturierungsprozessschritt *Tampondruck Primer* eher ungeeignet ist 3D-Körper zu strukturieren (Bild 5-12).

In wie weit sind die Lösungselemente i (Zeile) und Prozesse j (Spalte) kompatibel?		Grundkörper herstellen				Aufbereiten				Strukturieren				Metall.		AVT							
		1K-Spritzguss	Halbzugfräsen	Stereolithographie	Layer Laminate Manufacturing	chemische Passivierung	chemische Aktivierung	chemisch Glätten	physikalisch Glätten	Oberflächenlackierung	2K-Spritzguss	LPKF-LDS	Aerosol-Jet-Druck	Inkjet-Druck	Tampondruck Primer	Plasmasust ®	chemisch	Physical Vapor Deposition	Laser Plasma Patterning	Löten	Leitkleben	Drahtbonden	Empres-technik
0 ungeeignete Kombination																							
1 bedingt geeignete Kombination																							
2 geeignete Kombination																							
Elektrische Energie transportieren	Leiterbahn	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2
Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Kontaktfläche	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2
Elektrische Bauteile kontaktieren	Lötverbindung	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
Elektrische Energie speichern	Batterie	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Stromkreis schließen/öffnen	Kapazitivschalter	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
Messgröße erfassen	Bauelement	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2
Bauteile ausrichten	Magnet	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Bauteile stabilisieren	Versteifung	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Bauteile tragen	3D	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	2	2	2	1	2	2	1	2
Licht erzeugen	LED	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
Normiert		2,0	1,6	1,9	1,4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	2,0	1,7	1,7	1,8	1,5	2,0	1,9	1,5	2,0	2,0	1,9	2,0

Bild 5-12: Ausschnitt aus der Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix mit den für den MIDster identifizierten Funktionen, Lösungselementen und geeigneten Prozessen

Die Prozessketten-Kompatibilitätsmatrix (Anhang A3.3) liefert eine Aussage zu den Kombinationsmöglichkeiten der Einzelprozesse. Dort sind die Informationen abgelegt, die benötigt werden um die Einzelprozesse miteinander zu kombinieren und Prozessketten abzuleiten. Durch aufsummieren der einzelne Werte eines jeden Prozessschritts für eine Prozesskette und anschließendem teilen durch deren Anzahl erhält man für jede Prozesskette einen normierten Wert. Dieser ist ein Maß dafür, wie gut die jeweilige Prozesskette für das Produktkonzept geeignet ist. Der höchste Wert und damit am besten für den MIDster geeignet ist das einfache LDS-Verfahren ($E_p = 2,0$), bestehend aus 1K-Spritzguss, additiver Laserdirektstrukturierung, chemischer Metallisierung und einem abschließenden Lötprozess. Demgegenüber sind bei den prototypenspezifischen Verfahren Stereolithographie und Halbzeugfräsen leichte Einschränkungen in Kauf zu nehmen, da sie bei der Umsetzung bestimmter Lösungselemente nur bedingt geeignet sind (Bild 5-13).

Nr.	1 Grundkörper herstellen	2 Aufbereiten	3 Strukturieren	4 Metallisieren	5 AVT	Prozess- eignung Ep
1.	1K-Spritzgießen		Laser Strukturierung, additiv	Chemische Verfahren	Löten	2,0
2.	Stereo- lithographie	Chemische Glättung, Lackierung	Laser Strukturierung, additiv	Chemische Verfahren	Leitkleben	1,98
3.	2K-Spritzgießen			Chemische Verfahren	Löten	1,96
4.	Halbzeugfräsen	Chemische Passivierung	Drucktechnologien		Leitkleben	1,83

Bild 5-13: Eignung versch. Prozessketten für den MIDster

Sollen unterschiedliche Produktkonzepte mit deren unterschiedlichen Fertigungskonzepten verglichen werden, multipliziert man die jeweiligen Werte der Prozesseignung mit dem entsprechend ermittelten Wert für das Produktkonzept (in diesem Fall 1,27). Anschließend teilt man den Wert durch 4, da dies die maximal mögliche Ausprägung wäre. Da in diesem Fall nur das realisierte Konzept des MIDster für unterschiedliche Prozessketten betrachtet wird, werden hier nur die Prozesskettenkonzepte ohne Produktkonzeptadaption verglichen.

Phase 2.4: Finalisierung des Produktentwurfs

Mithilfe der ermittelten produktkonzeptspezifischen Prozessketten könnte nun der Produktentwurf weiter ausdetailliert werden. Hierzu können im ersten Schritt in die kritischen Lösungselemente identifiziert und durch alternative Konzepte ersetzt werden. Dieser Schritt erfolgt in der Regel in einem engen Wechselspiel mit den vorangegangenen Schritten. Für die retrospektive Validierung der Systematik anhand des MIDsters entfällt dieser Schritt jedoch.

Phase 2.5: Bewertung und Auswahl des Fertigungsprozesses

Die Prozesskettenkosten lassen sich analog durch aufsummieren der einzelnen Prozesseinzelkosten ermitteln. Diese sollten auf den Maximalwert normiert werden. Anschließend überführt man nun die Ergebnisse in ein Portfolio (Bild 5-14).

Bei der angenommenen Stückzahl von 1000 Stück bietet die Laserdirektstrukturierung das beste Verhältnis aus Eignung des Fertigungskonzepts (Konzeptgüte) und Kosten und wäre damit ideal für die Serienfertigung geeignet. Die Stückkosten der Spritzguss-Prozesse sind erheblich von der Stückzahl abhängig, anders als bei den prototypenspezifischen Verfahren, die auch bei hoher Stückzahl konstant sind.

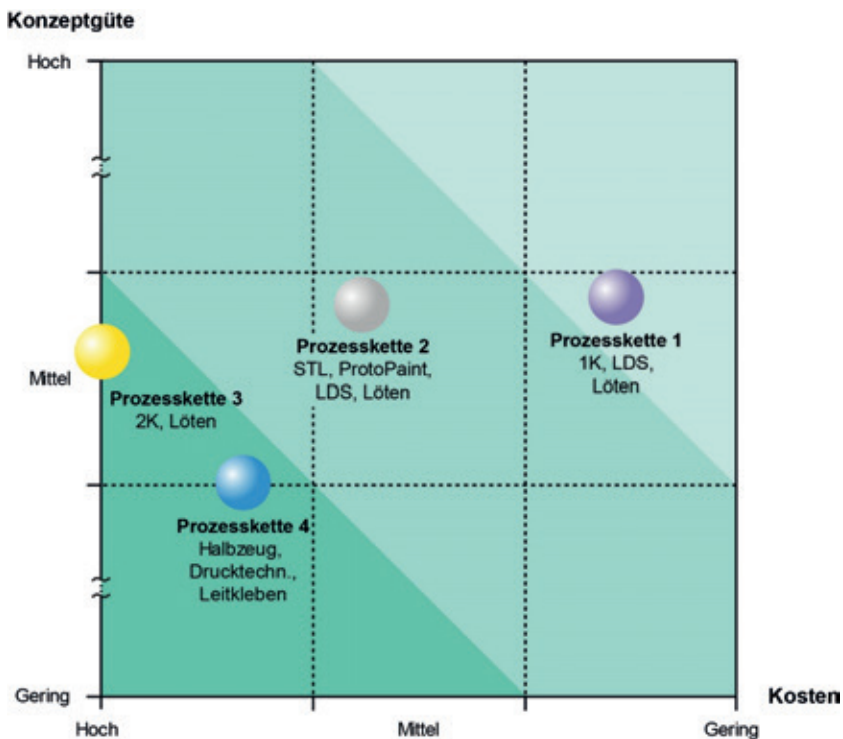


Bild 5-14: Kosten-Nutzen-Portfolio zur Bewertung der Prozesskettenkonzepte für den MIDster

Bei Bedarf kann der Lösungsraum durch eine individuelle Bewertung oder Auswahl der Prozessketten priorisiert werden, wenn beispielsweise dem Entwickler bzw. dem Unternehmen bestimmte Fertigungsanlagen selbst zur Verfügung stehen.

5.1.3 Stufe 3: Eigenschaften absichern

Stufe 3 bildet nun den Kern der Systematik, die entwicklungsbegleitende Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen. Für den MIDster gilt es nun, die kritischen und relevanten Aspekte zu identifizieren und mithilfe der Prototypenklassen entsprechende Prozessketten und Prototypen zu identifizieren.

Phase 3.1: Planen und Klären der Absicherungsaufgabe

Im ersten Schritt muss geklärt werden, wann welche Funktionalitäten des MIDsters nachgewiesen werden müssen. Aus dem gekoppelten Wirkstruktur-/Umfeldmodell des MIDsters (Bild 5-2) lassen sich äußere Einflüsse ableiten. In diesem Fall ist insbesondere die Gesetzgebung von hohem Interesse, branchenspezifische Richtlinien sind nicht relevant. Aus der Gesetzgebung folgt lediglich eine maximale Begrenzung der Stromstärke,

bzw. der Spannung. Dies wird durch die eingesetzte und geplante Batterie aber vollumfänglich erfüllt. Eine Neuerung bei der Umsetzung des MIDsters sind die Durchkontaktierungen von der Unter- auf die Oberseite. Diese, bei klassischen Leiterplatten übliche Kontaktierung, ist bei MIDs noch nie in einer Serienanwendung umgesetzt worden. Es gilt, diese Konzeptrelevante Kontaktierungstechnologie möglichst frühzeitig zu validieren. Hierzu empfiehlt es sich, Konzeptmuster anzufertigen, das aber in der Form mit dem eigentlichen Produkt noch nichts gemein haben müssen. Weitere zusätzliche Tests sind aus Produktsicht nicht zwingend erforderlich, Absicherungen der elektronischen Funktionen können aber ebenfalls mittels einfacher planarer Konzeptmuster auf Leiterplattenbasis umgesetzt werden.

Für die geplante (teil-)automatisierte Bestückung sollten jedoch zusätzlich entwicklungsbegleitende Prototypen angefertigt werden. Die Bestückung dreidimensionaler Körper wie beim MIDster ist häufig nicht trivial. Mithilfe einfacher Geometriemuster sollten erste Bestückversuche aus Fertigungssicht durchgeführt werden. Da die Anordnung der Prozess Flächen das Design des Produktes maßgeblich beeinflusst.

Abschließend sollte ein 3D-Funktionsmuster entwickelt werden, dass die elektronischen und mechanischen Funktionen validiert, bevor das Spritzgusswerkzeug angefertigt wird.

Für den MIDster müssen daher folgende Muster angefertigt werden:

- Ein einfaches **Geometriemuster** zur Beurteilung der Bestückbarkeit
- Ein einfaches formneutrales **Konzeptmuster** zur Validierung der Durchkontaktierungstechnologie
- (optional) ein einfaches Elektronikmuster zur Validierung von Schaltungslayout und elektronischen Funktionen
- Ein **Funktionsmuster** zur integrierten Absicherung von Geometrie, elektronischem Layout und Funktionen

Das **Serienmuster** entspricht der ersten Nullserie, da keine weitere Industrialisierung der Fertigung angestrebt wird.

Phase 3.2: Prototypenprozesse identifizieren

Aus der Liste der geeigneten Verfahren sind für den strategischen entwicklungsbegleitenden Einsatz nun die Prozesse und Prototypen auszuwählen, die den Produktentstehungsprozess ideal unterstützen. Mithilfe der MID-Prototypenklassen und den darin verteilten geeigneten Prozessen sowie den erzielbaren Ergebnissen, können entsprechende Prototypen eingeplant werden. Für die vier vorgestellten Prototypenklassen ergeben sich für den MIDster die folgenden Prozessketten für die Prototypen (Bild 5-15)

Die Prozessketten werden idealerweise **rückwärtsgerichtet**, vom **finalen Produktprozess ausgehend**, geplant. Die Analyse der Prozessketten hat für den MIDster das LDS-Verfahren ergeben.

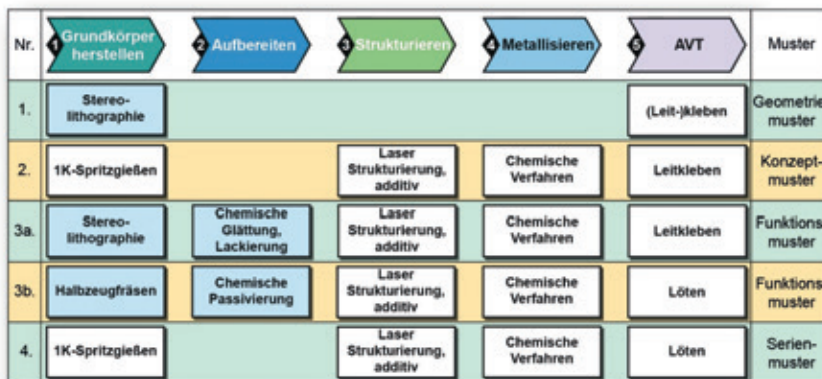


Bild 5-15: Prototypen-Prozessketten für den MIDster

Die Prototypenprozesse werden nun so geplant, dass möglichst wenig Änderungen am Produkt notwendig sind. Diese Änderungen entstehen zwangsläufig wenn die Produktdaten von einem Prozess auf einen anderen migriert werden (bspw. Wandstärken, Auszugs-schrägen, elektronisches Layout usw.):

- Das **Serienmuster** wird mittels des finalen Prozesses gefertigt. Ausnahmen könnten jedoch die Anzahl der Kavitäten des Spritzgusswerkzeugs oder die Prozessparameter beim Löten sein. Eine Industrialisierung steht beim MIDster jedoch nicht im Fokus
- Beim **Funktionsmuster** ergeben sich 2 günstige Prozessketten. Einerseits kann das Funktionsmuster des MIDsters mittels Halbzeugfräsen erzeugt werden, andererseits mittels Stereolithographie. Für Das Halbzeugfräsen spricht die Nähe des Materials zum finalen spritzgegossenen Werkstoff, für die Stereolithographie die Nähe zu den weiter vorgelagerten Prototypen. Dies führt zu einem geringeren Änderungsaufwand in der Musterphase. Für den Anwendungsfall des MIDsters sind an dieser Stelle noch keine Einschränkungen gegeben. Im Automobilbereich beispielsweise müsste das Funktionsmuster aus Originalmaterial gefertigt werden.
- Das **Konzeptmuster** muss aus dem Originalwerkstoff hergestellt werden, jedoch nicht über die finale Geometrie verfügen. Prinzipiell eignen sich daher für die Validierung des Durchkontaktierungskonzepts auch einfache Testplättchen.
- Beim **Geometriemuster** sind keine elektronischen Eigenschaftsabsicherungen vorgesehen, entsprechende Prozesse entfallen. Um die erzeugten CAD-Modelle, die für die generative Fertigung notwendig sind, möglichst durchgängig zu nutzen, sollte dieses erste Muster auch mittels Stereolithographie hergestellt werden, auch wenn andere Prozesse, wie das Fused Deposition Modelling möglich wären.

Auf diese Weise wird ein Material und Prozesswechsel sowie etwaiger Anpassungsaufwand vermieden.

Mithilfe der in den Steckbriefen gegebenen Informationen zu Anwendbaren Normen und Prüfverfahren, kann für jedes Muster ein spezifischer Testplan ausgearbeitet und die Ergebnisse Entwicklungsbegleitend eingesetzt werden.

Phase 3.3: Prototypenentwicklung initiieren

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Phase 3.1 können dem Musterbau nun die entsprechenden Entwicklungsaufträge für die Prototypen samt geeigneter initialer Prozessketten übergeben werden. Der Entwicklungsauftrag für die anzufertigenden MIDster-Prototypen besteht dabei aus einer Produktspezifikation der zu fertigenden Muster, Festlegungen über Stückzahlen, Herstellkosten sowie Entwicklungszeit und -kosten. Diese gilt es in enger Abstimmung zwischen Musterbau und Entwicklung im Folgenden auszudetaillieren.

Phase 3.4: Prototyp entwickeln und produzieren

Aufbauend auf dem Entwicklungsauftrag kann nun die Detailkonstruktion der Prototypen vorgenommen werden. Insbesondere beim Funktionsmuster³⁷ ist die integrative Gestaltung der elektronischen und mechanischen Funktionen in einem 3D-Modell eine Herausforderung. Im Funktionsmuster sind alle Funktionselemente abzubilden. Für den MIDster bedeutet das, dass auch die zuvor mittels Konzeptmuster validierte Durchkontaktierung, eingesetzt wird (Bild 5-16).

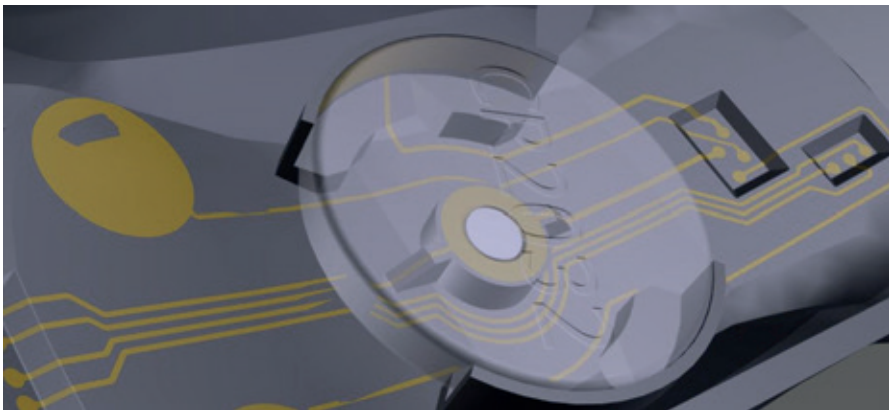


Bild 5-16: CAD-Modell für das Funktionsmuster des MIDsters an der kritischen Stelle Batteriehalterung/Durchkontaktierungen

³⁷ Der Einfachheit halber wird hier nur auf die Umsetzung des Funktionsmusters eingegangen.

Diese Durchkontaktierung basiert auf einer speziellen Eigenschaft des für das Endprodukt angedachten Materials in Kombination mit dem Strukturierungslaser des LDS-Verfahrens (hoher Schmelzpunkt bei LCP, dadurch kein Verschmelzen der Durchkontaktierung nach Lasern) und lässt sich nicht mit additiv erzeugten Grundkörpern umsetzen. Das Funktionsmuster muss daher im Halbzeugfräß-Verfahren erzeugt werden, alternativ müssen die Durchkontaktierungen mechanisch erzeugt werden.

Kommunikationsschleifen zur Abstimmung solcher Sachverhalte zwischen Musterbau, Produktentwicklung und Produktion sind für den Erfolg der prototypenbegleitenden Entwicklung unabdingbar.

Für die Fertigung des Prototyps werden anschließend die Fertigungsdaten erzeugt und die entsprechenden Prototypen produziert.

Phase 3.5: Eigenschaften validieren

In der letzten Phase werden nun die hergestellten Muster verwendet um die entsprechend geforderten Eigenschaften nachzuweisen und die entsprechenden Anforderungen abzusichern. Für den MIDster ergeben sich die folgenden MID-Muster und ihre grobe Verortung im Produktentstehungsprozess:

- **Geometriemuster:** Dient der Beurteilung der Bestückbarkeit. Hierfür muss ein erster grober Entwurf des Gestalts innerhalb eines 3D-CAD-Programms vorliegen. Dieser kann mit einfachen Mitteln für eine additive Fertigung ausgeleitet werden.
- **Konzeptmuster:** Dient der Validierung der Durchkontaktierungstechnologie. Diese sollen mithilfe des Strukturierungslasers in den Grundkörper „geschossen“ werden. Die Verwendung von Originalmaterial ist daher zwingend erforderlich.

Geometrie- und Konzeptmuster sind entscheidend für die Umsetzung der Produktidee. Sie müssen daher frühzeitig eingesetzt werden, um die entsprechenden Anforderungen zu validieren.

- **Funktionsmuster:** Dient der integrierten Absicherung von Geometrie, elektronischem Layout und Funktionen. Es stellt die Vorstufe zum Serienmuster da. Aufgrund der Durchkontaktierungen sollte das Funktionsmuster ebenfalls aus dem Serienwerkstoff hergestellt werden.
- **Serienmuster:** Dient der Absicherung der Produkt- und Prozessparameter. Beim MIDster entspricht das Serienmuster der ersten Nullserie, da keine weitere Industrialisierung der Fertigung angestrebt wird.

Bild 5-16 verdeutlicht die Verortung der einzelnen Mustertypen entsprechend dem Ansatz der entwicklungsbegleitenden Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen.

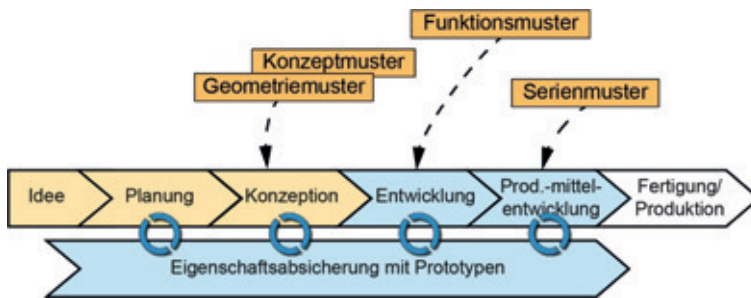


Bild 5-17: Einsatz der Mustertypen zur entwicklungsbegleitenden Eigenschaftensicherung beim MIDster

Abschließend bleibt festzuhalten, dass Mithilfe der entwicklungsbegleitenden Muster und Prototypen die zielgerichtete Konkretisierung der Produktentwicklung des MIDsters, sei es mithilfe grober Machbarkeitstests zu Technologiekonzepten und integrierten Funktionsmustern, signifikant unterstützen wird.

5.2 Bewertung der Anforderungserfüllung der Systematik

Übergeordnetes Ziel der Systematik ist die Unterstützung von Entwicklern und Planern bei einer integrativen Entwicklung von MID-Applikationen. Hierbei ist insbesondere die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem bereits in frühen Entwicklungsphasen und die gleichzeitige Absicherung produkt- und fertigungsrelevanter Anforderungen von entscheidender Bedeutung. Dazu wurde in dieser Arbeit eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* entwickelt. Sie erfüllt die an sie gestellten Anforderungen aus Kapitel 2.7. Im Folgenden wird dies für jede Anforderung erläutert:

A1) Durchgängigkeit: Die Systematik liefert eine Produktspezifikation, die bereits in den frühen Phasen der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger einsetzbar ist (vgl. Kapitel 4.3.1). Aufbauend auf dieser initialen Produktspezifikation „wächst“ die Produktbeschreibung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen bis zur Definition des Serienmusters (vgl. Kapitel 4.3 und 5.1.3).

A2) Ganzheitlichkeit: Charakteristisch für räumliche Schaltungsträger sind die starken Wechselwirkungen zwischen Produktkonzept und Produktionssystem. Die Systematik berücksichtigt daher die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem als ganzheitlichen Ansatz (vgl. Kapitel 4.3). Darüber hinaus berücksichtigen die Prototypenklassen branchenspezifische Besonderheiten und gehen damit weit über den gekapselten Entwicklungsprozess hinaus (vgl. Kapitel 4.2.3).

A3) Frühzeitige Analysen: Die grundsätzliche Idee der Systematik beruht auf einem durchgängigen Ansatz von der frühen Phase bis zur Erstellung des Serienmusters. Hierbei wird bereits die frühzeitige Einschätzung der Machbarkeit der Produktidee mittels einer

Randbedingungsanalyse und eines Benchmarks mit bestehenden Applikationen realisiert. Hierfür wurde ein MID-Profil entwickelt, das den Abgleich ermöglicht (vgl. Kapitel 4.3.1 und Kapitel 5.1.1).

A4) Berücksichtigung der integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem: Dem verwendeten Konstruktionskatalog zur Entwicklung von Lösungsalternativen zur Produktentwicklung sind verfahrensspezifische Restriktionen zugeordnet worden. Auf diese Weise können produktindividueller Prozessketten integrativ entwickelt werden (vgl. Kapitel 4.3.2 und 5.1.2).

A5) Systematische Lösungssuche: Im Rahmen der Entwicklung der Systematik wurde der MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ erweitert und Kombinations- und Abhängigkeitsmatrizen erstellt (vgl. Kapitel 4.3.2 und 5.1.2). In Kombination mit dem Applikationsbenchmark mittels MID-Profil erlaubt dies eine systematische Lösungssuche und ermöglicht neuartige Lösungsprinzipien (vgl. Kapitel 4.3.1 und Kapitel 5.1.1).

A6) Strategische Planung der Entwicklungsunterstützung mit Prototypen: Prototypen sind ein adäquates Mittel, um frühzeitig Eigenschaften abzusichern und Fehler im Produktentstehungsprozess zu vermeiden. Die dritte Hauptstufe der Systematik zielt darauf ab, genau diesen Prozess zu unterstützen und unerfahrene Entwickler zu befähigen, die optimale Prototyp-Verfahrenskombination auszuwählen (vgl. Kapitel 4.2.2, Kapitel 4.3.3 und Kapitel 5.1.3).

A7) Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl der Verfahren: Mithilfe der Randbedingungsanalyse als Teil der Machbarkeitsanalyse werden bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt mögliche Fertigungsprozesse identifiziert (vgl. Kapitel 4.3.1 und Kapitel 5.1.1). Die darauf aufbauende integrative Konzipierung von Prozessketten detailliert die Anforderungen und das Produktkonzept und schränkt so die Auswahl möglicher Prozessketten ein (vgl. Kapitel 4.3.2 und Kapitel 5.1.3). In Kombination mit den Steckbriefen der MID-Prototypenklassen kann ein unerfahrener Entwickler zielgerichtet das optimale produktindividuelle Verfahren identifizieren (vgl. Kapitel 4.3.3 und Kapitel 5.1.3).

A8) Verständlichkeit: Kern der Systematik sind die beschriebenen Vorgehensmodelle. Sie ermöglichen eine systematische und zielgerichtete Entwicklung von MID-Applikationen und -Prototypen. An geeigneten Stellen wird auf bestehende Methoden und Richtlinien verwiesen, die den Entwickler bei der Durchführung der Tätigkeiten unterstützen. Jede dieser Methoden und Richtlinien ist auch unabhängig von der Gesamtsystematik einsetzbar.

A9) Rechnerunterstützung durch eine Wissensbasis: Im Rahmen des AiF-Projekts MID-Plan wurde eine Entwicklungsumgebung geschaffen, die die beschriebene Systematik umsetzt. Diese greift auf die zentrale Wissensdatenbank des WebMIDIS zu, so dass eine Aktualität der verwendeten Parameter sichergestellt ist (vgl. Kapitel 4.4).

A10) Anwendbarkeit auf MIDs: Die Systematik wurde entwickelt, um die prototypenbasierte Entwicklung räumlicher Schaltungsträger zu unterstützen. Viele der bereits existierenden Ansätze wurden deshalb für diesen Anwendungsfall adaptiert und auf die spezifischen Bedürfnisse räumlicher Schaltungsträger angepasst (vgl. Kapitel 4.2.1, Kapitel 4.2.2 und Kapitel 4.2.3).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Maschinenbauliche Erzeugnisse von heute beruhen mehr und mehr auf dem Zusammenspiel von Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung und der Entwicklung hin zu Cyber-Physischen-Systemen steigt der Bedarf an integrierten Funktionalitäten und einer stärkeren Vernetzung der Systeme. Die räumliche Integration mechatronischer Komponenten und Systeme ist ein entscheidender Befähiger für diese Entwicklung. Innovative Technologien wie Molded Interconnect Devices sind notwendig, um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden. Gleichzeitig steigt jedoch die Komplexität dieser Produkte und der eingesetzten Produktionstechnologien. Durch die Vielzahl der beteiligten Domänen kommt es weiterhin zu einer Steigerung der Komplexität und des Umfangs der zugrundeliegenden Entwicklungsprozesse. Insbesondere bei räumlichen Schaltungsträgern, die mittels MID-Technologien realisiert werden, ist das Wechselspiel von Produktdesign und Prozessrestriktionen eine hochkomplexe Entwicklungsaufgabe.

Ein möglicher **Lösungsansatz** ist die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem sowie der entwicklungsbegleitende Einsatz von Prototypen. Dies muss in einem engen Wechselspiel aufeinander abgestimmt sein, um die Potentiale der integrativen Herangehensweise zu nutzen. Die integrative Entwicklung muss dabei bereits in einer sehr frühen Phase, beispielsweise bei einer grundsätzlichen Machbarkeitsanalyse ansetzen, um ein durchgängiges Produkt- und Prozessmodell aufzubauen. Dies kann im weiteren Konkretisierungsverlauf ausdetailliert werden. Diese ganzheitliche Vorgehensweise birgt folgende **Nutzenpotentiale**:

- Bereits in einer sehr frühen Phase werden Produkt und Prozess integrativ entwickelt. Restriktionen und Gestaltungsmöglichkeiten durch Fertigungsprozesse fließen frühzeitig in das Produktkonzept ein.
- Die Identifikation optimaler produktindividueller Prozessketten erlaubt das Ableiten geeigneter Verfahren für das entwicklungsbegleitende Prototyping. Erkenntnisse können so schneller und zielgerichteter gewonnen werden.
- Das abgestimmte Vorgehen reduziert das Risiko unnötiger Iterationsschleifen im weiteren Verlauf der Produktentstehung. So können schlecht gewählte Prototypenverfahren zu falschen Ergebnissen in der Produktverifikation führen. Zeit- und kostenintensive Produkthanpassungen können somit vermieden werden.

Ein geeigneter Ansatzpunkt für die integrative Entwicklung ist die **Prinziplösung** des Produkts, da auf Basis der Partialmodelle erste Analysen durchgeführt werden können. Darüber hinaus ist dies der ideale Zeitpunkt, Produktionsrestriktionen im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen. Die frühzeitige Festlegung des Produktionsverfahrens an dieser Stelle schränkt den Entwicklungsprozess des Produkts jedoch stark ein.

Der durchgängige Übergang von der ersten Einschätzung der Machbarkeit, über die integrative Produkt- und Produktionssystemplanung hin zu einer entwicklungsbegleitenden Unterstützung, beispielsweise mit Prototypen, ist jedoch bislang nur unzureichend adressiert. Die **Herausforderungen** liegen in der Verknüpfung der Entwicklungsmethodik für räumliche Schaltungsträger mit der Systematik zur integrativen Konzipierung von Produkt und Produktionssystem sowie den methodischen und technologischen Barrieren bei jedem konkreten Anwendungsfall.

Im Rahmen der Arbeit wurde überprüft, inwieweit bestehende Ansätze dieser Herausforderung gerecht werden. Defizite bestehen hier insbesondere bei der frühzeitigen Abschätzung der Machbarkeit und der entwicklungsbegleitenden Unterstützung mit Prototypen. Insbesondere die Berücksichtigung neuartiger Produktionstechnologien, wie der generativen Fertigung, wird im Rahmen der Entwicklung räumlicher Schaltungsträger kaum erwähnt. Häufig fokussieren die Ansätze lediglich Teilaspekte der Entwicklungsaufgabe. Die Analyse des Stands der Technik hat den Handlungsbedarf aufgezeigt eine *Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* zu entwickeln.

Die entwickelte Systematik greift auf einige der untersuchten Ansätze zurück, modifiziert sie für den Zweck einer prototypenbasierten Entwicklung räumlicher Schaltungsträger und ordnet sie in ein übergeordnetes Vorgehensmodell ein. Die Systematik unterstützt Produktentwickler in der frühen Phase der Produktentstehung und liefert Hilfsmittel zur begleitenden Prototypenentwicklung. Die Systematik umfasst dazu folgende wesentliche Bestandteile:

- Eine **MID-Prototypen-Klassifikation**, die die Schnittstelle zwischen Produktentwicklung, -verifikation und entsprechenden Fertigungsverfahren abbildet. Mithilfe der Prototypenklassen kann der Entwickler ermitteln, welche Aspekte sich mit welchen Prototypen verifizieren lassen und welche Verfahren dafür geeignet sind.
- Ein **übergeordnetes Vorgehensmodell**, das das prinzipielle Vorgehen zur prototypenbasierten Entwicklung räumlicher Schaltungsträger beschreibt und die drei Hauptphasen *Machbarkeitsanalyse*, *Prozesskettenkonzipierung* und *Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen* in den Gesamtentwicklungsprozess einordnet.
- Unterstützende **Werkzeuge und Methoden** zur Lösung von Teilaufgaben um den Produktentstehungsprozess räumlicher Schaltungsträger zu unterstützen. Dabei sind sowohl eine frühe Produktspezifikation, als auch Verträglichkeitsmatrizen, erweiterte Konstruktionskataloge und MID-spezifische Prototypenklassen zu nennen.

Ergänzend wurde das softwarebasierte Planungstool MID-Plan entwickelt, das es auch unerfahrenen Anwendern mithilfe von Fragebögen und einer detaillierten Wissensbasis ermöglicht, die Systematik zu nutzen. Mithilfe des Validierungsbeispiels MIDster wurde

darüber hinaus gezeigt, dass die entwickelte Systematik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Gleichzeitig wurde jedoch auch klargestellt, dass die Systematik und die Verwendung des Planungstools den Entwicklungsprozess nicht automatisieren, sondern den Entwickler in seiner kreativen Tätigkeit unterstützen.

Es besteht **weiterer Forschungsbedarf** bei der softwaretechnischen Unterstützung des Entwicklungsprozesses räumlicher Schaltungsträger. Durchgängige digitale Modelle, wie sie beispielsweise aus der reinen Elektronikfertigung bekannt sind, sind für räumliche Schaltungsträger noch nicht in ausreichendem Maße verfügbar. Dies ist auch einer der Gründe warum digitale Modelle die realen Prototypen im Entwicklungsprozess räumlicher Schaltungsträger nicht ersetzen können. Außerdem ist der Lösungsmusterbasierte Entwurf weiter voranzutreiben, da dieser dem Entwickler validierte Schablonen für die Umsetzung seiner Produktideen liefert. Darüber hinaus sind durchgängige Kostenmodelle erforderlich, die bereits in den frühen Phasen belastbare Aussagen zu den zu erwartenden Kosten aufzeigen und auch die Entwicklung von Prototypen im Produktentstehungsprozess berücksichtigen. Außerdem bedarf es einer unterstützenden Methodik bei der Entwicklung hybrider räumlicher Schaltungsträger (MID und Leiterplatte). Hier ist unklar, nach welchen Kriterien entschieden werden kann welche Systemelemente und Komponenten welche Produktfunktionen umsetzen.

Die Systematik ist grundsätzlich erweiterbar aufgebaut, so dass neue Verfahren und Technologien ebenfalls ergänzt und berücksichtigt werden können. Eine entscheidende technologische Entwicklung, die so noch nicht exakt vorhergesehen werden kann ist jedoch die direkte generative Fertigung dreidimensionaler Schaltungsträger. Die daraus entstehenden Möglichkeiten werden den Produktentstehungsprozess räumlicher Schaltungsträger noch einmal signifikant verändern.

Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
A1 Erweiterter Stand der Technik.....	173
A1.1 Produktstrukturierung nach DAHL.....	173
A1.2 Alternative Fertigungsfolgen nach TROMMER	174
A2 Frühzeitige Analyse der Machbarkeit	177
A2.1 MID-Produktkonzeptspezifikation	177
A2.2 MID-Profil.....	179
A3 Integrative Konzipierung von Prozessketten	181
A3.1 Erweiterter MID-Konstruktionskatalog	181
A3.2 Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix	183
A3.3 Prozess-Kompatibilitätsmatrix	184
A3.4 Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix	185
A3.5 Kompatibilität erweiterter Prozess-Anforderungen	186
A4 Frühzeitige Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen.....	187
A4.1 Prototypenklassen	187
A4.2 Branchenspezifische Erweiterungen	196

A1 Erweiterter Stand der Technik

A1.1 Produktstrukturierung nach DAHL

DAHL entwickelte den Aufbau eines Produktstrukturmodells in drei Schritten. Nach einer funktionalen Produktstruktur wird eine Beziehungsstruktur definiert und danach eine Montagestruktur abgeleitet [Dah90].

Die funktionale Strukturierung des Produkts geht dabei auf die Gesamtfunktion des Produkts zurück. Die Gesamtfunktion wird in einer ersten Hierarchiestufe in Teilfunktionen zerlegt. Diese Teilfunktionen werden auf weiteren Hierarchiestufen so lange weiter untergliedert, bis die Gesamtfunktion als Hierarchie von Elementarfunktionen dargestellt werden kann. Diese elementaren Funktionen sind Funktionen, die als solche vordefiniert wurden oder die durch ein bereits realisiertes Produkt oder Bauteil beschrieben werden können. Es entsteht somit eine funktionale hierarchische Gliederung der einzelnen Bauteile. Sie sagt jedoch nichts über die montagerelevanten Beziehungen zwischen den Bauteilen aus. Diese Information wird der funktionalen Struktur durch die Beziehungsstruktur überlagert. Für jedes Strukturelement werden entsprechend Beziehungen zu den anderen Strukturelementen definiert. Dadurch werden die Elemente zu „Beziehungsparen“ zusammengefasst (Bild3-13) [Dah90], [Rap10].

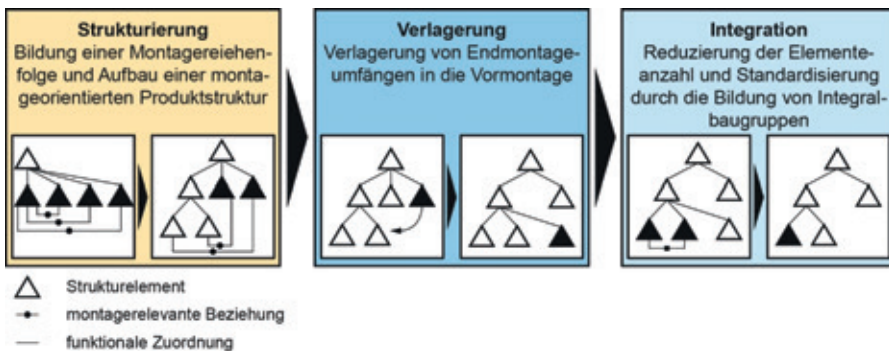


Bild A-1: Aufgabenkomplexe für die Ableitung einer montageorientierten Struktur aus einer funktionsorientierten Struktur [Dah90]

Aus der funktionsorientierten Struktur und der überlagerten Beziehungsstruktur lässt sich anschließend die Montagestruktur ableiten. Jedem Strukturelement wird eine Montagepriorität zugeordnet, die aufgrund der Anzahl der Beziehungen zu anderen Elementen bestimmt wird. Die Montagestruktur entspricht damit einer Erzeugnisgliederung nach Montagegesichtspunkten, ist also nicht Teil der Produktstruktur, sondern eine spezifische Sicht auf das System.

Resümee

Das Produktstrukturmodell von DAHL hatte das Ziel, den Entwickler bei einer montagegerechten Produktgestaltung während des gesamten Konstruktionsprozesses zu unterstützen. Dementsprechend liegt der Fokus nicht auf der eigentlichen Produktstruktur. 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 Prinzipiellösung entnommen werden. Defizite zeigt das Verfahren bei der Strukturierung mechatronischer Systeme, da beispielsweise elektrische und informationstechnische Beziehungen nicht berücksichtigt werden. Außerdem fokussiert der Ansatz nach DAHL die Strukturierung der Montage, die bei MIDs nur für die AVT relevant ist.

A1.2 Alternative Fertigungsfolgen nach TROMMER

TROMMER unterstützt mit seiner Methodik, die auf dem Ansatz von FALLBÖHMER aufbaut, die Planung von Fertigungsfolgen auf Betriebsmittelebene. Die integrierte Produkt- und Prozessplanung wird damit um die Betriebsmittel und Produktionsstandorte erweitert [Tro01]. Das Vorgehen gliedert sich in sechs Phasen (Bild 3-16).

Aufbau von Produktionsmittelmatrizen: In der ersten Phase wird die Datengrundlage für die Methode erarbeitet. Dazu werden Eingangsinformationen aus den Bereichen Produkt (Bauteilmerkmale), Produktionsaufgabe (Technologieketten) und Produktionsumgebung (vorhandene Produktionsmittel) gesammelt. Dabei wird für jede zu analysierende Variante eine Produktionsmittelmatrix erstellt. Sie ordnet jeder Technologie in der Technologiekette alternative Produktionsmittel zu und bildet die Grundlage zur Generierung und Ableitung der Fertigungsfolgen.

Eignungsanalyse grob (direkte Wertschöpfung): Anhand bauteilneutraler Kriterien (z.B. Automatisierungsgrad) werden die Produktionsmittel in den Produktionsmittelmatrizen analysiert. Bei Nichterfüllung der Anforderungen werden die entsprechenden Produktionsmittel aus der Matrix eliminiert. Die verbleibenden Produktionsmittel werden anschließend anhand bauteilspezifischer Kriterien (z.B. Bauteilgewicht, Gesamtabmessungen des Bauteils) erneut analysiert und entsprechend weiter reduziert. Dadurch erhält man erste grobe Produktionsmittelmatrizen.

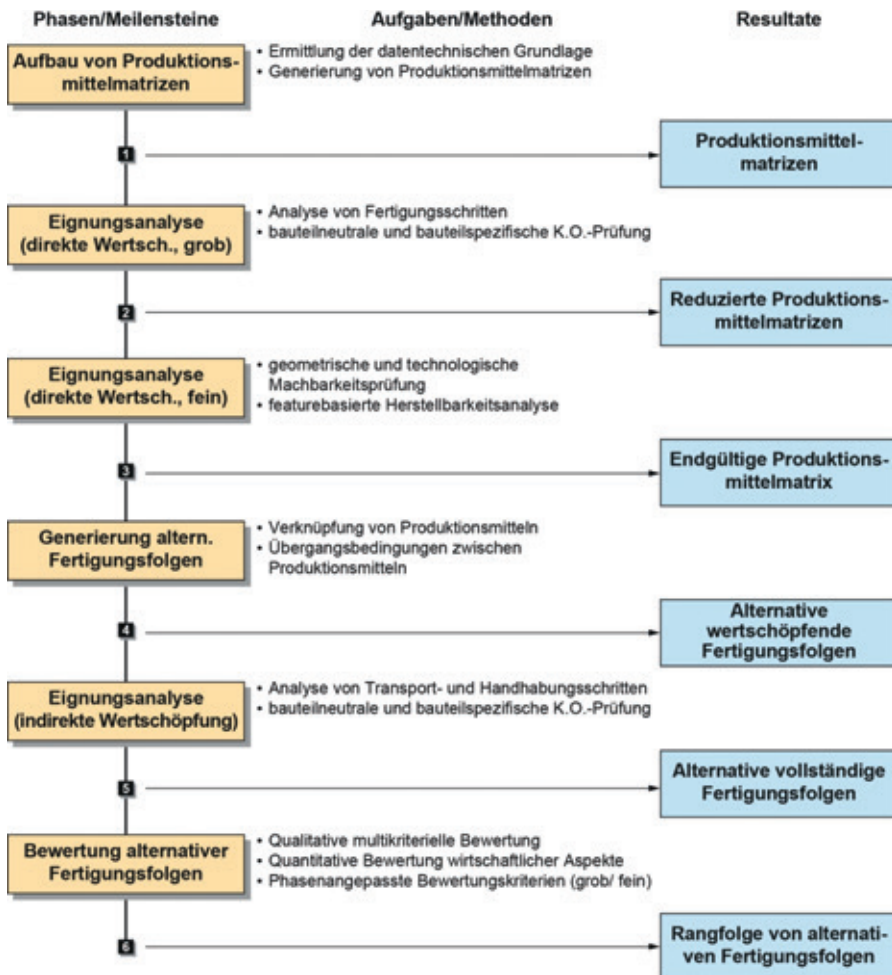


Bild A-2: Vorgehen zur Generierung und Bewertung von Fertigungsfolgen nach TROMMER [Tro01]

Eignungsanalyse fein (direkte Wertschöpfung): Im Anschluss an die grobe Eignungsanalyse wird eine detailliertere bauteilbezogene Prüfung der verbliebenen Produktionsmittel durchgeführt. Hierzu wird ein featurebasierter Abgleich von Bauteilmerkmalen und Maschinenfähigkeiten durchgeführt. Produktionsmittel, die nicht den Produktanforderungen genügen, werden ebenfalls aus den Produktionsmittelmatrizen entfernt.

Generierung alternativer Fertigungsfolgen: Da sich durch die beiden vorangegangenen Reduktionsschritte die Produktionsmittelmatrizen merklich reduziert haben, werden nun die verbleibenden technologisch geeigneten Produktionsmittel kombinatorisch oder durch den Anwender zu Fertigungsfolgen verknüpft (Bild 3-17).

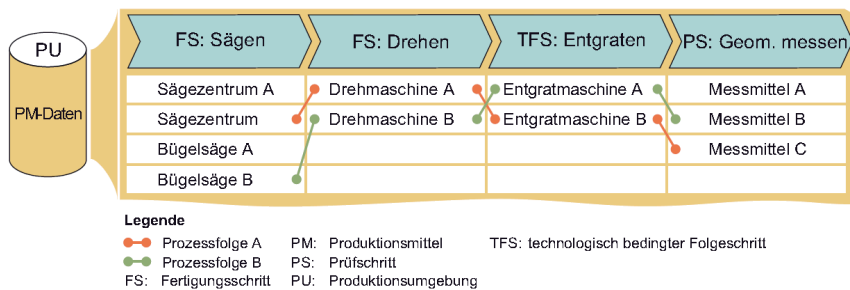


Bild A-3: Alternative Fertigungsfolgen in der Produktionsmittelmatrix [Tro01]

Der Verknüpfung sollten dabei verschiedene Zielsetzungen zu Grunde gelegt werden (z.B. Automatisierungsgrad, kurze Materialflusswege usw.) anstatt alle Kombinationen zu bilden.

Eignungsanalyse (indirekte Wertschöpfung): Nach Bildung der wertschöpfenden Fertigungsfolgen ist zu prüfen, inwieweit zusätzliche Transport- und Handhabungsschritte zwischen den Fertigungsschritten durchzuführen sind. Für diese wird ebenfalls eine bauteilneutrale und eine bauteilspezifische Eignungsprüfung analog zu Phase 2 durchgeführt um somit vollständige Transport- und Fertigungsketten zu erhalten.

Bewertung alternativer Fertigungsfolgen: Abschließend erfolgt ein qualitativer relativer Vergleich der alternativen Fertigungsfolgen hinsichtlich der gestellten Anforderungen. TROMMER verwendet hierzu ein modulares Kennwertsystem und eine multikriterielle Bewertung. Das Resultat bildet eine Rangfolge der Fertigungsfolgen hinsichtlich ihrer Gesamtzielerfüllung [Tro01].

Resümee

Der Fokus der Methode nach TROMMER liegt auf der frühzeitigen Planung des Produktionssystems auf Betriebsmittelebene auf Basis von Technologieketten. Eine eigenständige Anwendung der Methode ist nicht möglich. Die mehrstufige Eignungsanalyse bietet in Kombination mit den Technologieketten nach FALLBÖHMER einen interessanten Ansatz zur frühzeitigen Bestimmung von Technologie- und Prozessketten. Beide Methoden wurden für klassische Fertigungsverfahren entwickelt, eine Übertragung auf die Besonderheiten räumlicher Schaltungsträger scheint möglich.

A2 Frühzeitige Analyse der Machbarkeit

A2.1 MID-Produktkonzeptspezifikation

MID-Produktkonzept																			
1. Funktionale Systembeschreibung Die Spezifikation der Produktidee mittels MID-relevanter Produkt-Funktionen dient dazu, bereits erfolgreich umgesetzte Applikationen in der WebMIDIS-Datenbank zu finden. <div style="float: right; text-align: right;"> </div>																			
1.1 Mechanische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Abstand halten <input type="checkbox"/> Bauteile ausrichten <input type="checkbox"/> Baugruppe kontaktieren <input type="checkbox"/> Bauteile stabilisieren <input type="checkbox"/> Bauteile tragen <input type="checkbox"/> Kraft übertragen <input type="checkbox"/> Bauteile markieren <input type="checkbox"/> Vor Umwelteinflüssen schützen 	1.3 Fluidische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Fluide speichern <input type="checkbox"/> Fluide mischen <input type="checkbox"/> Fluid beschleunigen/verzögern <input type="checkbox"/> Fluid bewegen <input type="checkbox"/> Fluid leiten 																		
1.2 Elektrische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Elektr. Energie speichern <input type="checkbox"/> Messgrößen erfassen <input type="checkbox"/> Elektr. Bauteile kontaktieren <input type="checkbox"/> Elektromagn. Felder erzeugen <input type="checkbox"/> Elektromagn. Felder schirmen <input type="checkbox"/> Vor hohen Strömen sichern <input type="checkbox"/> Stromkreis schließen/öffnen <input type="checkbox"/> Elektr. Energie transportieren <input type="checkbox"/> Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren 	1.4 Kommunikative Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Signale erzeugen <input type="checkbox"/> Signale leiten <input type="checkbox"/> Signale einkoppeln <input type="checkbox"/> Signale auskoppeln 																		
	1.5 Optische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Licht erzeugen <input type="checkbox"/> Licht leiten <input type="checkbox"/> Licht aufnehmen 																		
	1.6 Magnetische Funktionen <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Magnetfeld erzeugen 																		
2. Spezifikation der Umwelteinflüsse Die zu erwartenden Bedingungen im Umfeld des zu entwickelnden Systems (thermische und mechanische Belastungen, Aggressive Medien) werden zur Werkstoffselektion verwendet. <div style="float: right; text-align: right;"> </div>																			
2.1 Thermische Belastung <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Dauergebrauchstemperatur [°C]</td> <td>Min.</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Max.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Kurzzeitige Temperatur [°C]</td> <td>Max.</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Temperaturtoleranz [°C]</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> ±0</td> <td><input type="checkbox"/> ±10</td> <td><input type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40</td> </tr> </table>	Dauergebrauchstemperatur [°C]	Min.			Max.		Kurzzeitige Temperatur [°C]	Max.		Temperaturtoleranz [°C]			<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> ±10	<input type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40	2.2 Mechanische Belastung <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Wechselbelastung <input type="checkbox"/> Schlagbelastung <input type="checkbox"/> Statische Belastung 			
Dauergebrauchstemperatur [°C]	Min.																		
	Max.																		
Kurzzeitige Temperatur [°C]	Max.																		
Temperaturtoleranz [°C]																			
<input type="checkbox"/> ±0	<input type="checkbox"/> ±10	<input type="checkbox"/> ±20 <input type="checkbox"/> ±30 <input type="checkbox"/> ±40																	
2.3 Aggressive Medien <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td><input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Schwache Laugen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Starke Laugen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe</td> <td><input type="checkbox"/> Trichloräthylen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Benzin</td> <td><input type="checkbox"/> Perchlorethylen</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren</td> <td><input type="checkbox"/> Aceton</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren</td> <td><input type="checkbox"/> Alkohole</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren</td> <td><input type="checkbox"/> Heißes Wasser</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Starke organische Säuren</td> <td><input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen</td> <td></td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe	<input type="checkbox"/> Schwache Laugen	<input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Starke Laugen	<input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Trichloräthylen	<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Perchlorethylen	<input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Aceton	<input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Alkohole	<input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren	<input type="checkbox"/> Heißes Wasser	<input type="checkbox"/> Starke organische Säuren	<input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung	<input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen	
<input type="checkbox"/> Mineralische Schmierstoffe	<input type="checkbox"/> Schwache Laugen																		
<input type="checkbox"/> Aliphatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Starke Laugen																		
<input type="checkbox"/> Aromatische Kohlenwasserstoffe	<input type="checkbox"/> Trichloräthylen																		
<input type="checkbox"/> Benzin	<input type="checkbox"/> Perchlorethylen																		
<input type="checkbox"/> Schwache Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Aceton																		
<input type="checkbox"/> Starke Mineralsäuren	<input type="checkbox"/> Alkohole																		
<input type="checkbox"/> Schwache organische Säuren	<input type="checkbox"/> Heißes Wasser																		
<input type="checkbox"/> Starke organische Säuren	<input type="checkbox"/> UV-Licht und Witterung																		
<input type="checkbox"/> Oxidierende Laugen																			


MID-Produktkonzept 1 von 2

Bild A-4: MID-Produktkonzeptspezifikation Seite 1

MID-Produktkonzept

3. Spezifikation der Gestalt

Die Aspekte der Gestalt stellen signifikante Größen bei der Prozessselektion zur Grundkörperherstellung und selektiver Metallisierung dar.



3.1 Hüllgeometrie

☐ Einfacher Regelkörper

☐ Kombination aus Regelkörpern

☐ Komplexer Körper ohne Hinterschritte

☐ Komplexer Körper mit Hinterschritten

☐ Freiformkörper

3.2 Hüllvolumen

Länge [mm]

Breite [mm]

Höhe [mm]

3.3 Wandstärke

Wandstärke [mm]

Min.

3.4 Leiterbahnen

Layout

Leiterbahnbreite [µm]

Leiterbahnabstand [µm]

Leiterbahnhöhe [µm]

oder

Eigenschaften

Stromstärke [A]

Spannung [V]

Zulässige Temperaturdifferenz [°C]

Max.

Max.

☐ +0

☐ +10


☐ +20

☐ +30


☐ +40

3.5 Geometrische Klasse


☐ 0




☐ 1A




☐ 1B




☐ 1C




☐ 2



☐ 3A



☐ 3B



MID-Produktkonzept 2 von 2

Bild A-5: MID-Produktkonzeptspezifikation Seite 2

A2.2 MID-Profil

MID-Profil					
Bewertungskriterium	Bewertungsskala				
	0	1	2	3	4
Funktionen	< 1	≥ 1	≥ 2	≥ 3	> 4
Min. Dauergebrauchstemperatur [C°]	< - 70	≥ - 70	≥ - 50	≥ - 30	> - 10
Max. Dauergebrauchstemperatur [C°]	> 260	≤ 260	≤ 200	≤ 105	≤ 70
Max. Gebrauchstemperatur [C°]	> 260	≤ 260	≤ 200	≤ 105	≤ 70
Aggressive Medien (M)					
Form der Hüllgeometrie	Einf. Regelkörper	Komb. aus Regelkörpern	Kompl. Körper o. Hinterschn.	Kompl. Körper mit Hinterschn.	Freiformkörper
Länge [mm]	> 600	≤ 600	≤ 400	≤ 200	≤ 100
Breite [mm]	> 600	≤ 600	≤ 400	≤ 200	≤ 100
Höhe [mm]	> 230	≤ 180	≤ 130	≤ 80	≤ 25
Volumen [cm³ = 10³ mm³]	> 500	≤ 500	≤ 150	≤ 50	≤ 10
Min. Wandstärke [mm]	> 3	≤ 3	≤ 1,5	≤ 1	≤ 0,6
Min. Leiterbahnbreite [µm]	> 500	≤ 500	≤ 400	≤ 300	≤ 200
Min. Leiterbahnabstand [µm]	> 500	≤ 500	≤ 400	≤ 300	≤ 200
Min. Leiterbahnhöhe [µm]	> 100	≤ 100	≤ 50	≤ 30	≤ 15
Max. Stromstärke [A]	> 1,5	≤ 1,5	≤ 1	≤ 0,7	≤ 0,5
Max. Spannung (DC oder AC Peak) [V]	> 300	≤ 100	≤ 60	≤ 30	≤ 10
Geometrische Klasse	0,1A	1B	1C	2	3A, 3B
Summe					
Konzeptbewertung hinsichtlich der Potenzialnutzung					

Bild A-6: MID-Profil

Aggressive Medien (Legende)					
Aggressive Medien	Bewertungsskala				
	0	1	2	3	4
Mineralische Schmierstoffe		x			
Aliphatische Kohlenwasserstoffe		x			
Aromatische Kohlenwasserstoffe				x	
Benzin			x		
Schwache Mineralsäuren		x			
Starke Mineralsäuren				x	
Schwache organische Säuren		x			
Starke organische Säuren				x	
Oxidierende Säuren					x
Schwache Laugen		x			
Starke Laugen			x		
Trichloräthylen					x
Perchlorethylen				x	
Aceton				x	
Alkohole			x		
Heißes Wasser			x		
UV-Licht und Witterung				x	
Summe					
M_{ges} – Bewertung der Aggression des Umfeldes					
$F_{ges} = \sum_{i=1}^k h_i = \sum_{i=1}^k \frac{H_i}{n}$ $M_{ges} = 4 - \sum_{j=1}^k m_j$ <div><div>h_i – relative Häufigkeit der Funktion i H_i – absolute Häufigkeit der Funktion i n – Anzahl der Applikationen k – Anzahl der Funktionen einer Konzeption F_{ges} – Punkte einer Konzeption</div><div>m_j – Aggressionsniveau eines Mediums k – Anzahl der selektierten aggressiven Medien M_{ges} – Bewertung der Aggression des Umfeldes</div></div>					

Bild A-7: MID-Profil Legende für aggressive Medien

A3 Integrative Konzipierung von Prozessketten

A3.1 Erweiterter MID-Konstruktionskatalog

Lösung	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Funktion							
Elektrische MID-Funktionen	Elektrische Energie transportieren		Antenne	Keramikleiter			
	Elektromagnetische Felder erzeugen						
	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren						
	Elektrische Bauteile kontaktieren						
	Elektromagnetische Felder schirmen						
	Vor hohen Strömen sichern						
	Elektrische Energie speichern						
	Stromkreis schließen/öffnen						
	Messgrößen erfassen						
Mechanische MID-Funktionen	Abstand halten						
	Bauteile ausrichten						
	Baugruppe kontaktieren						
	Bauteile stabilisieren						
	Bauteile markieren						
	Bauteile tragen						
	Kraft übertragen						
	Vor Umwelteinflüssen schützen						

Bild A-8: Erweiterter MID-Konstruktionskatalog Seite 1

Lösung		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Funktion								
Kommunikative Funktionen	Signale erzeugen							
	Signale leiten							
	Signale einkoppeln							
	Signale auskoppeln							
Optische Funktionen	Licht erzeugen							
	Licht leiten							
	Licht aufnehmen							
Thermische Funkt.	Thermische Energie erzeugen							
	Thermische Energie übertragen							
Magnet. Funktion	Magnetfeld erzeugen							
Fluidische Funktion	Fluide speichern							
	Fluide mischen							
	Fluid beschleunigen/verzögern							
	Fluid bewegen							
	Fluid leiten							

Bild A-9: Erweiterter MID-Konstruktionskatalog Seite 2

A3.2 Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix

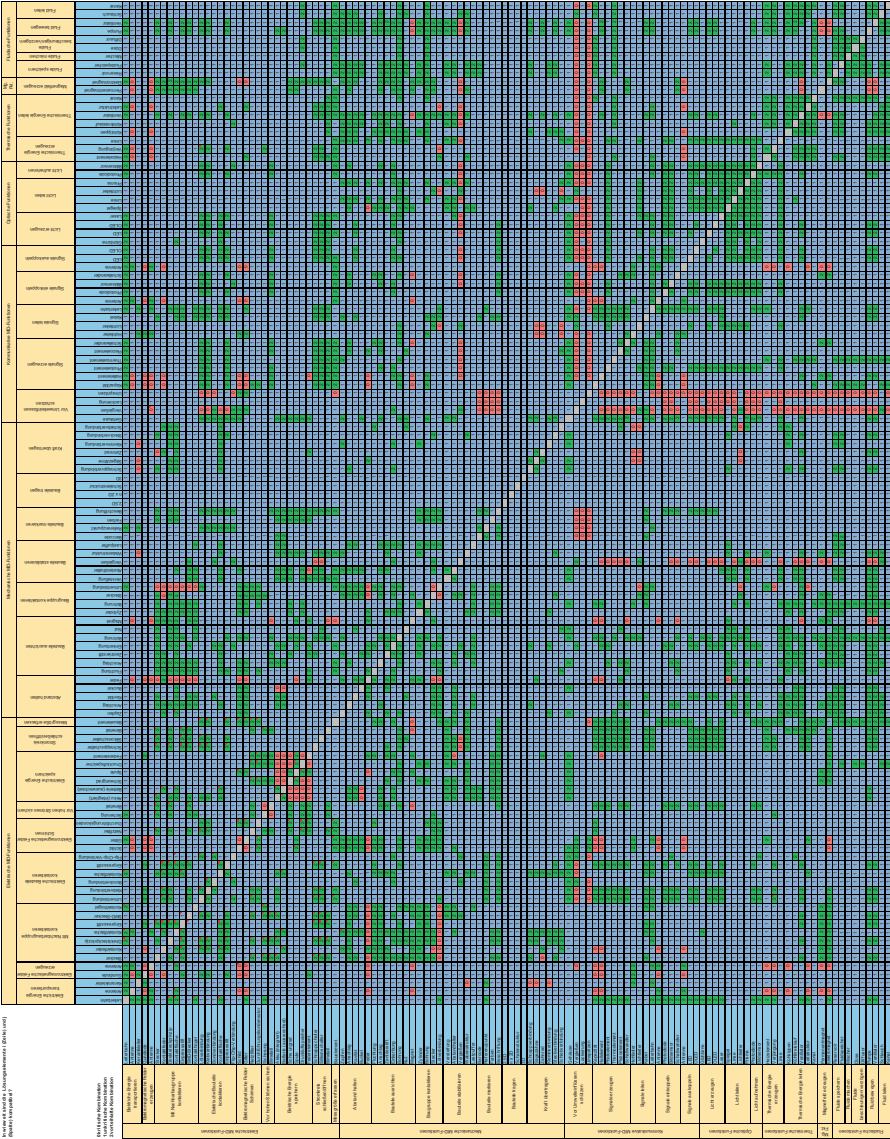


Bild A-10: Lösungselemente-Kompatibilitätsmatrix

A3.3 Prozess-Kompatibilitätsmatrix

[illegible]

Bild A-11: Prozessketten-Kompatibilitätsmatrix

A3.4 Lösungselemente-Prozess-Kompatibilitätsmatrix

Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Prozessschritte (Prozess)										Lösungselemente (LE)										Kompatibilität														
		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität		Vorarbeiten					Anforderungen definieren					Anforderungen analysieren					Anforderungen spezifizieren					Anforderungen validieren					Anforderungen realisieren					Anforderungen evaluieren				
Vorgehensweise: Identifikation von Lösungselementen (LE) und Prozesskompatibilität																																				

A3.5 Kompatibilität erweiterter Prozess-Anforderungen

[illegible]

Bild A-13: Kompatibilität erweiterter Prozess-Anforderungen


A4 Frühzeitige Eigenschaftsabsicherung mit Prototypen

A4.1 Prototypenklassen

Tabelle A-1: Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklungs- und Prozessaspekten


Produkt \ Prozess			Werkstoff auswählen	Grundkörper herstellen	Strukturieren	Metallisieren	Aufbau- und Verbindungstechnik		
							auftragen	bestücken	verbinden
Werkstoffidentifikation	mech.	Steifigkeit	×						
		Festigkeit	×	×					
		Bruch- und Streckgrenze	×						
	elektr.	Isolationsverhalten	×						
		Durchschlagsfestigkeit	×						
		Stromtragfähigkeit	×			×			
	therm.	Wärmeformbeständigkeit	×	×	×	×			×
		Wärmeleitfähigkeit	×	×	×	×			×
		Ausdehnungsverhalten	×	×	×	×			×
	chem.	Chemikalienresistenz	×		×	×	×		×
		Wasseraufnahme	×	×		×			×
Produktdesign	konstr.	Form (geom. Klasse)		×	×		×	×	
		Zugänglichkeit		×	×		×	×	
		Wandstärken	×	×					×
		Scharfe Kanten		×	×				×
	prozesstechnisch	Genauigkeit	×	×	×	×	×	×	
		Maßhaltigkeit	×	×					
		Oberflächengüte	×	×		×			
		Fließ- und Verzugverhalten	×	×		×			×
		Medienabfluss gewährleisten		×		×			
Leiterbahndesign		Abstände zu Leiterbahnen			×	×	×	×	×
		Abstände zu Schrägen, Wandungen			×	×	×	×	×
		Abstände zu Funktionsflächen			×		×	×	×
		Leiterbahnbreite			×		×	×	×
		Leiterbahnführung			×				
Schichtsystem-design		Schichtaufbau			×	×			×
		Schichtdicke			×	×			×
		Lötbarkeit	×			×	×		×
		Haftbarkeit	×		×	×	×		×
		Oberflächengüte	×			×	×		×

Geometriemuster




Beschreibung

Das Geometriemuster visualisiert die räumliche Struktur des MIDs. Es ist in erster Linie für die Verifikation der Geometrie und der Gestaltung zuständig und dient als Entscheidungsträger. Zudem wird die Machbarkeit der 3D-Laserbearbeitung und der Bestückung verifiziert. Auf den Serienwerkstoff wird verzichtet und keine wesentlichen Anforderungen an die Genauigkeit und die Oberflächenqualität gestellt. Das Geometriemuster verfügt weder über mechanische noch elektrische Funktionen.



Ergebnisse/ Erkenntnisse

- Visualisierung des virtuellen Prototyps
- Bewertung der geometr. Klassifikation
- Visualisierung als Entscheidungsträger
- Verifikation des Zusammenbaus
- Veranschaulichung der Miniaturisierung und Systemintegration
- Verifikation der Leiterbahngestaltung
- Wahl des Bestückungswerkzeugs
- Machbarkeit der 3D-Laserbearbeitung
- Verifikation der Halterungsflächen
- Verifikation der Zugänglichkeit zu Prozessflächen
- Bewertung der geometrischen Struktur
- Machbarkeit der Bestückung & Montage
- Verifikation der Anordnung/Zuordnung der Prozessflächen
- Festlegung Montagereihenfolge
- Bewertung Wand- und Schichtstärken




Fertigungsrestriktionen

- Kein Serienwerkstoff
- Keine Lackierung
- Wahl der Grundkörperfertigung anhand:
 - Kosten
 - Genauigkeit
 - Weiterentwicklungsmöglichkeiten
- Bewertung der Aufbaurichtung (Vermeidung des Stufeneffekts)
- Verifikation der Reinigungsmöglichkeit des Grundkörpers


Wichtig:

- Keine Strukturierung, Layout wird nur visualisiert (Bedruckung oder Bemalung)




Bewertung

Genauigkeit	<div><div></div></div>
Detaillierungsgrad	<div><div></div></div>
Oberflächengüte	<div><div></div></div>
Maßhaltigkeit	<div><div></div></div>
Seriennähe	<div><div></div></div>
Funktionalität	<div><div></div></div>
Komplexität	<div><div></div></div>
Bauteilausrichtung/-position	<div><div></div></div>



Gestaltungsregeln

- Einbaustudien
- Zusammenbaustudien
- LDS MID Designregeln
- Allgemeine Gestaltungshinweise für generative Verfahren



Geometriemuster 1 von 2

Bild A-14: Steckbrief Geometriemuster Seite 1

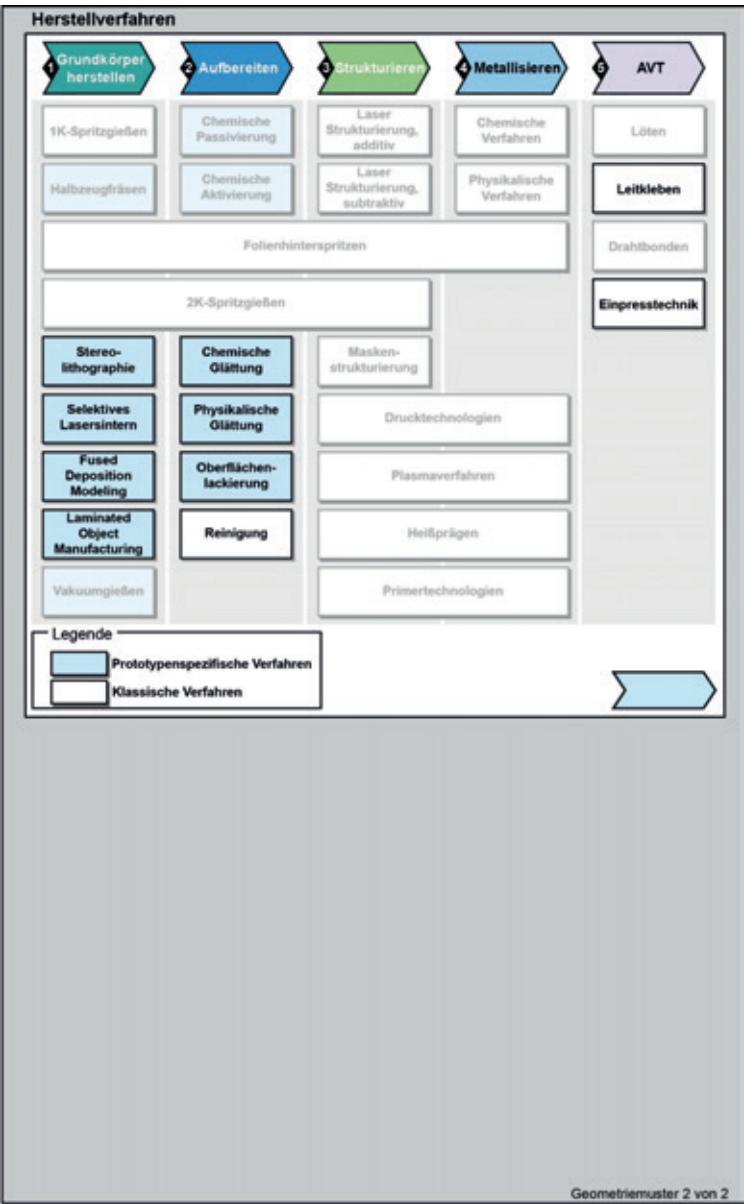


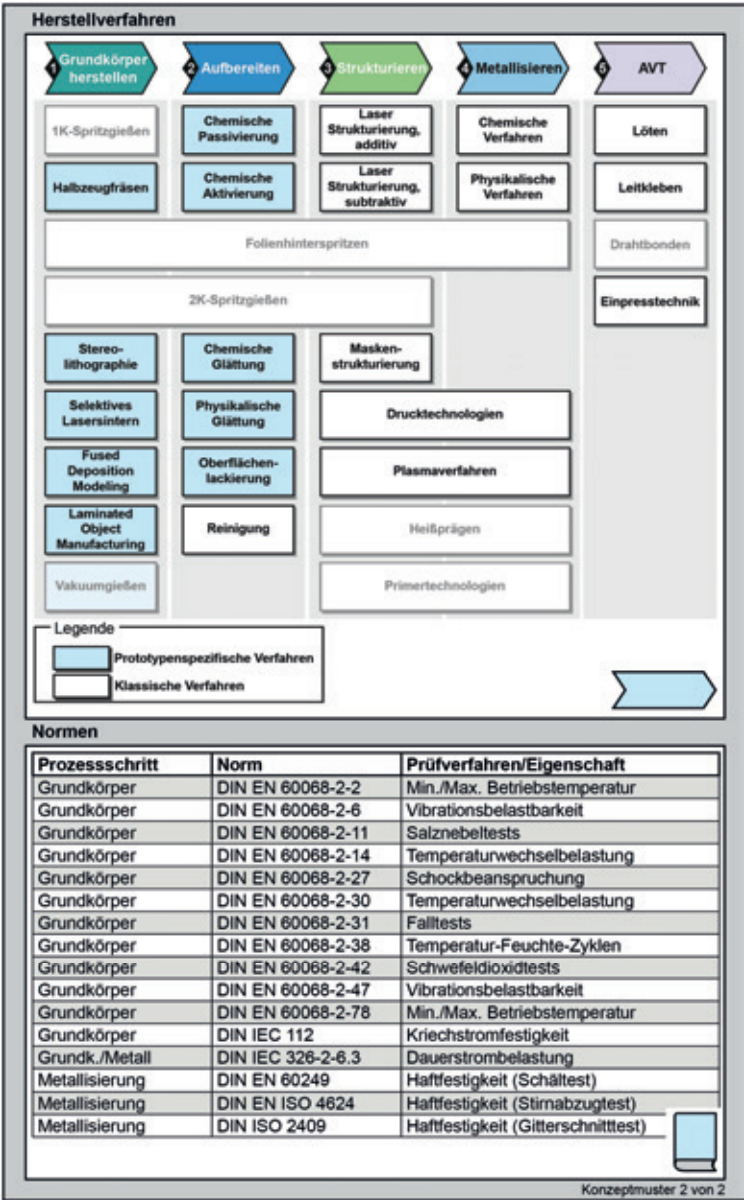







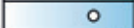

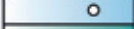
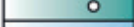





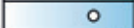

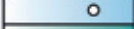
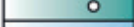





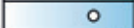

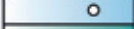
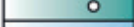



Bild A-15: Steckbrief Geometriemuster Seite 2

Konzeptmuster																		
Beschreibung <p>Das Konzeptmuster dient zur Verifikation von Teilfunktionen und der Qualifizierung des Serienwerkstoffs. Es sind wesentliche Eigenschaften zu testen, die das verwendete Material beschreiben (mechanisch, thermisch, elektrisch, chemisch). Die Verwendung des Serienwerkstoffs ist daher zwingend erforderlich. Darüber hinaus sind die eingesetzten Fertigungstechnologien und deren Anforderungen, z.B. an die Lötbarkeit, zu bewerten. Ergänzt wird das Konzeptmuster durch erste Bewertungen zur Strukturierung und Metallisierung.</p>																		
Ergebnisse/ Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung therm. Eigenschaften (<i>Wärmebeständigkeit, Dehnungsverhalten, ...</i>) • Bewertung chem. Eigenschaften (<i>Feuchteverhalten, Chemikalienresistenz, ...</i>) • Qualifizierung des Serienwerkstoffs • Verifikation der Lötbarkeit (<i>anhand Serienprodukten</i>) • Verifikation Leiterbahnführung • Verifikation der Strukturierung (<i>Laserparameter, Einfallswinkel, ...</i>) • Bewertung mech. Eigenschaften (<i>z.B. Verformbarkeit bei therm. Belastung</i>) • Bewertung elektr. Eigenschaften (<i>Strombelastbarkeit, Isolationsverhalten, ...</i>) • Bewertung der Materialkompatibilität • Bewertung Lebensdauer und Zuverlässigkeit • Verifikation der Antistatik • Verifikation der Metallisierung (<i>Haftbarkeit, Strombelastbarkeit, Schichtstärke, ...</i>) • Definieren von kritischen Stellen • Verifikation der AVT (<i>Verbindungsmedium, Anordnung, Bestückung, Montage, ...</i>) 	Fertigungsrestriktionen <ul style="list-style-type: none"> • Serienwerkstoff • ProtoPaint LDS Lackierung bei generativen Verfahren • Anpassen von Wand- und Schichtstärken • Keine Darstellung der gesamten Geometrie notwendig • Keine komplette Metallisierung und Bestückung notwendig <p>Wichtig:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung über Adaption existierender Produkte zulässig 																	
Bewertung <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Genauigkeit</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Detaillierungsgrad</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Oberflächengüte</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Maßhaltigkeit</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Seriennähe</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Funktionalität</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Komplexität</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Bauteilausrichtung/-position</td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </tbody> </table> <div style="text-align: right;"><input checked="" type="checkbox"/></div>	Genauigkeit	<input type="radio"/>	Detaillierungsgrad	<input type="radio"/>	Oberflächengüte	<input type="radio"/>	Maßhaltigkeit	<input type="radio"/>	Seriennähe	<input type="radio"/>	Funktionalität	<input type="radio"/>	Komplexität	<input type="radio"/>	Bauteilausrichtung/-position	<input type="radio"/>	Gestaltungsregeln <ul style="list-style-type: none"> • LDS MID Designregeln • Allgemeine Gestaltungshinweise für generative Verfahren • Allgemeine Test- und Prüfverfahren 	
Genauigkeit	<input type="radio"/>																	
Detaillierungsgrad	<input type="radio"/>																	
Oberflächengüte	<input type="radio"/>																	
Maßhaltigkeit	<input type="radio"/>																	
Seriennähe	<input type="radio"/>																	
Funktionalität	<input type="radio"/>																	
Komplexität	<input type="radio"/>																	
Bauteilausrichtung/-position	<input type="radio"/>																	

Konzeptmuster 1 von 2

Bild A-16: Steckbrief Konzeptmuster Seite 1



Funktionsmuster																									
Beschreibung <p>Das Funktionsmuster verfügt über die vollständige Geometrie und Funktionalität des Serienprodukts. Der verwendete Serienwerkstoff sowie die Strukturierung, Metallisierung und AVT werden endgültig bewertet. Im Vordergrund stehen der „Design-Freeze“ der Gestaltung und die Entwicklung des Spritzgusswerkzeugs für das Serienmuster. Die gewonnenen Ergebnisse besitzen eine hohe Aussagekraft.</p> 																									
Ergebnisse/ Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> • Abbildung der vollständigen Geometrie • Abschließende Bewertung des Werkstoffs bei vollständiger Bestückung • Bewertung der Bestückungsgenauigkeit • Bewertung der Bestückungspositionierung • Abschließende Bewertung von Strukturierung • Abschließende Bewertung der Metallisierung, Metallisierung und AVT • Hohe Aussagekraft • Bewertung der Genauigkeit und Oberflächenqualität • Entwicklung/Wechsel auf Spritzguss • „Design-Freeze“ aller Spezifikationen • Verifikation der Löt- und Automatisierbarkeit • Verifikation der Absicherung vor Umwelteinflüssen 	Fertigungsrestriktionen <ul style="list-style-type: none"> • Serienwerkstoff (<i>empfehlenswert</i>) • ProtoPaint LDS Lackierung bei generativen Verfahren • Positions-, Dosierungs-, Benetzungs- und Bestückungsgenauigkeit ist zu gewährleisten • Bewertung Schmelz- und Kristallisationsverhalten (<i>Spritzguss</i>) • Verifikation Spritzguss (<i>Fließ- und Verzugverhalten, Entformung, Wandstärken</i>) • Thermische/mechanische Einschränkungen (<i>generative Verfahren</i>) • Verifikation des Einbaus 																								
Bewertung <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Genauigkeit</td> <td></td> <td><input checked="" type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Detaillierungsgrad</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Oberflächengüte</td> <td></td> <td><input checked="" type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Maßhaltigkeit</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Seriennähe</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Funktionalität</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Komplexität</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Bauteilausrichtung/-position</td> <td></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </tbody> </table> 	Genauigkeit		<input checked="" type="radio"/>	Detaillierungsgrad		<input type="radio"/>	Oberflächengüte		<input checked="" type="radio"/>	Maßhaltigkeit		<input type="radio"/>	Seriennähe		<input type="radio"/>	Funktionalität		<input type="radio"/>	Komplexität		<input type="radio"/>	Bauteilausrichtung/-position		<input type="radio"/>	Gestaltungsregeln <ul style="list-style-type: none"> • LDS MID Designregeln • Allgemeine Gestaltungshinweise für generative Verfahren • Allgemeine Gestaltungshinweise für Spritzguss • Allgemeine Test- und Prüfverfahren 
Genauigkeit		<input checked="" type="radio"/>																							
Detaillierungsgrad		<input type="radio"/>																							
Oberflächengüte		<input checked="" type="radio"/>																							
Maßhaltigkeit		<input type="radio"/>																							
Seriennähe		<input type="radio"/>																							
Funktionalität		<input type="radio"/>																							
Komplexität		<input type="radio"/>																							
Bauteilausrichtung/-position		<input type="radio"/>																							

Funktionsmuster 1 von 2

Bild A-18: Steckbrief Funktionsmuster Seite 1

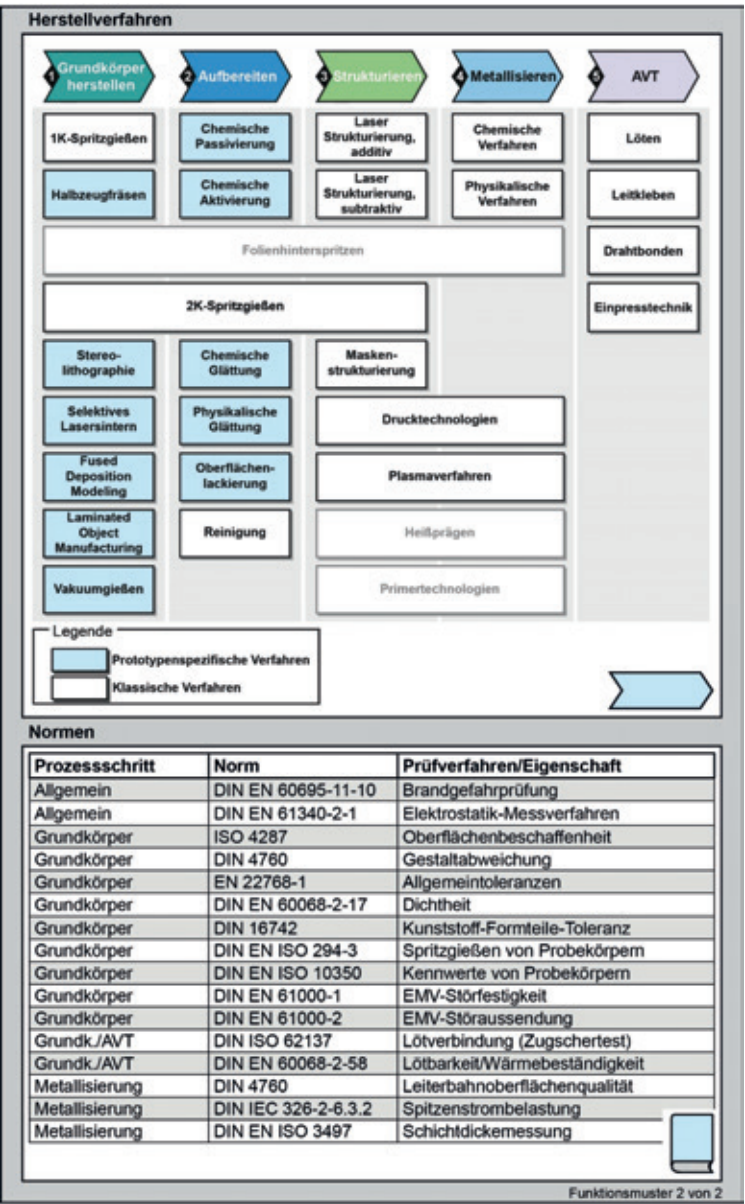


Bild A-19: Steckbrief Funktionsmuster Seite 2

Serienmuster																	
Beschreibung <p>Das Serienmuster entspricht in seinen wesentlichen Merkmalen dem späteren Serienprodukt. Es dient zur Qualifizierung des neuen Produkts und der eingesetzten Fertigungstechnologien. Die Validierung erfolgt unter realen Bedingungen direkt beim Anwender. Die Herstellung des Grundkörpers wird in höchster Qualität per Spritzguss realisiert. Der Prozess ist dabei schon weitestgehend automatisiert.</p>																	
Ergebnisse/ Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> • Entspricht dem Serienprodukt • Hohe Qualitätssicherung • Kaum Änderungspotential • Vollständige Analyse aller Komponenten und Prozesse • Tests unter realen Bedingungen • Tests beim Anwender • Verifikation der Automatisierung 	Fertigungsrestriktionen <ul style="list-style-type: none"> • Serienwerkstoff • Finale Prozesskette • Höchste Ansprüche an Genauigkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität • Spritzguss mit einer bzw. wenigen Kavitäten • Ausschließlich Einsätze aus nicht gehärtetem Stahl 																
Bewertung <table border="1"> <tr><td>Genauigkeit</td><td><input checked="" type="radio"/></td></tr> <tr><td>Detaillierungsgrad</td><td><input type="radio"/></td></tr> <tr><td>Oberflächengüte</td><td><input checked="" type="radio"/></td></tr> <tr><td>Maßhaltigkeit</td><td><input type="radio"/></td></tr> <tr><td>Seriennähe</td><td><input checked="" type="radio"/></td></tr> <tr><td>Funktionalität</td><td><input type="radio"/></td></tr> <tr><td>Komplexität</td><td><input checked="" type="radio"/></td></tr> <tr><td>Bauteilausrichtung/-position</td><td><input type="radio"/></td></tr> </table>	Genauigkeit	<input checked="" type="radio"/>	Detaillierungsgrad	<input type="radio"/>	Oberflächengüte	<input checked="" type="radio"/>	Maßhaltigkeit	<input type="radio"/>	Seriennähe	<input checked="" type="radio"/>	Funktionalität	<input type="radio"/>	Komplexität	<input checked="" type="radio"/>	Bauteilausrichtung/-position	<input type="radio"/>	Gestaltungsregeln <ul style="list-style-type: none"> • LDS MID Designregeln • Allgemeine Gestaltungshinweise für Spritzguss • Vollständige Simulation der realen Bedingungen
Genauigkeit	<input checked="" type="radio"/>																
Detaillierungsgrad	<input type="radio"/>																
Oberflächengüte	<input checked="" type="radio"/>																
Maßhaltigkeit	<input type="radio"/>																
Seriennähe	<input checked="" type="radio"/>																
Funktionalität	<input type="radio"/>																
Komplexität	<input checked="" type="radio"/>																
Bauteilausrichtung/-position	<input type="radio"/>																

Serienmuster 1 von 2

Bild A-20: Steckbrief Serienmuster Seite 1

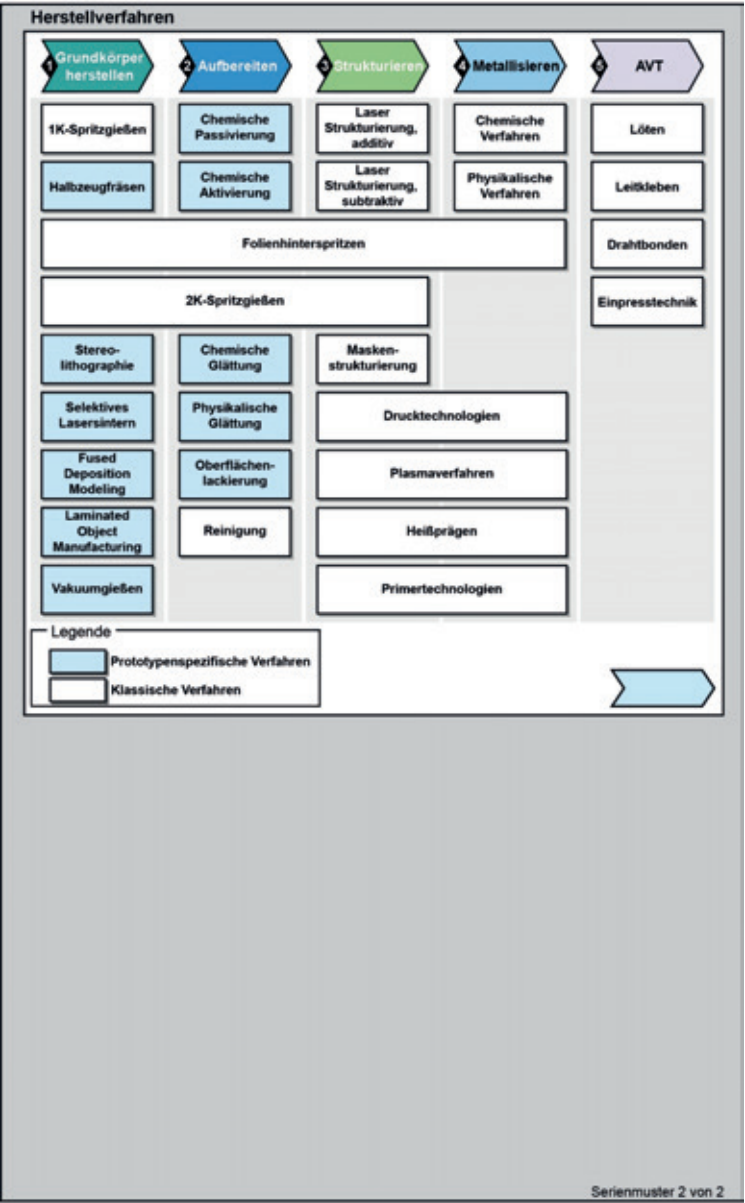


Bild A-21: Steckbrief Serienmuster Seite 2

A4.2 Branchenspezifische Erweiterungen

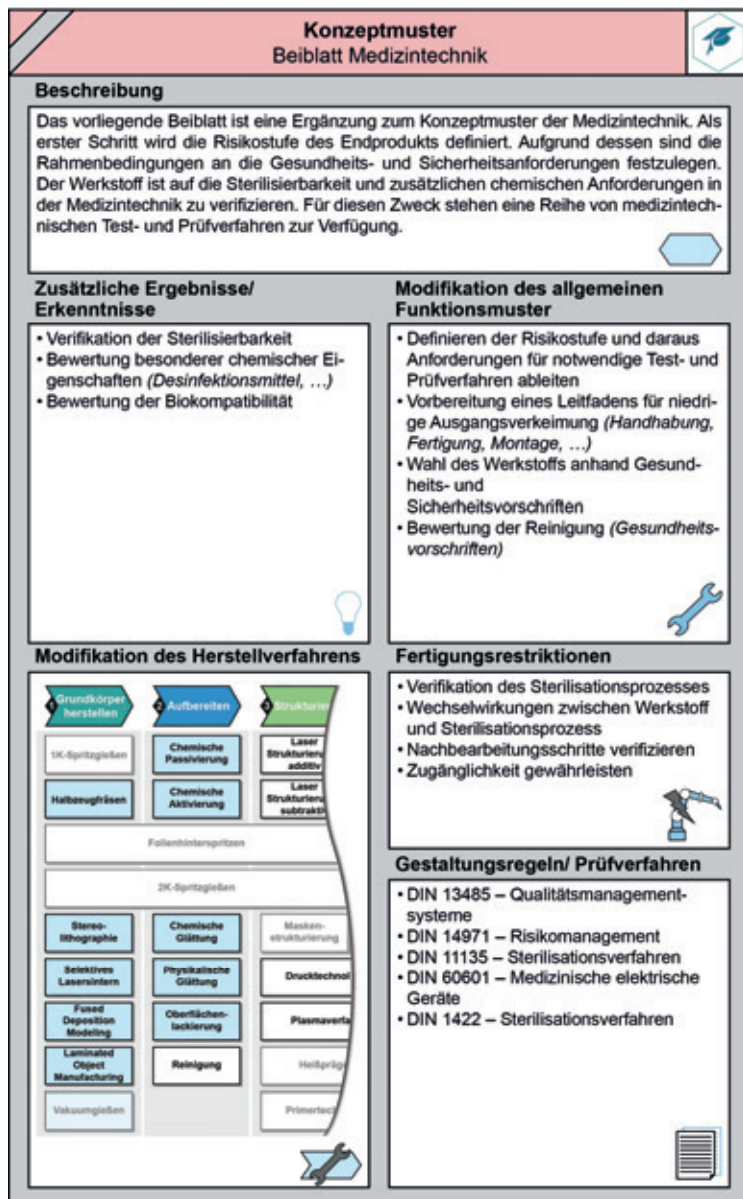


Bild A-22: Steckbrief Konzeptmuster Beiblatt Medizintechnik

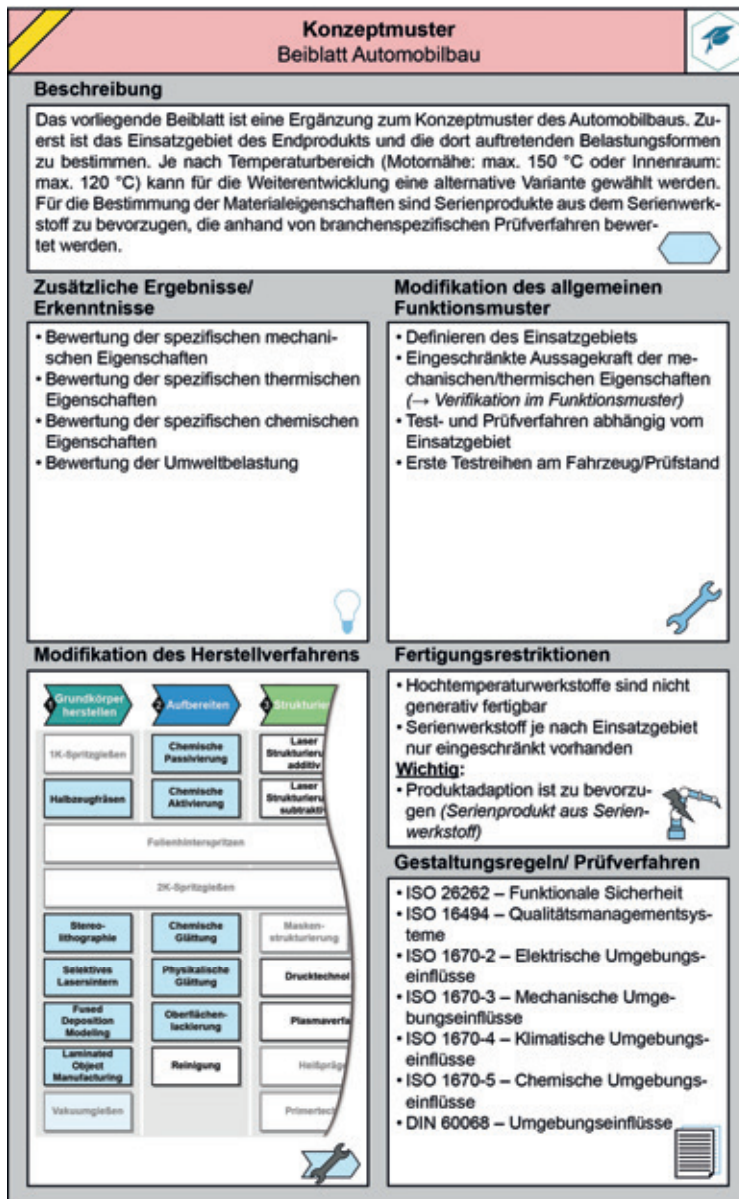


Bild A-23: Steckbrief Konzeptmuster Beiblatt Automobilbau

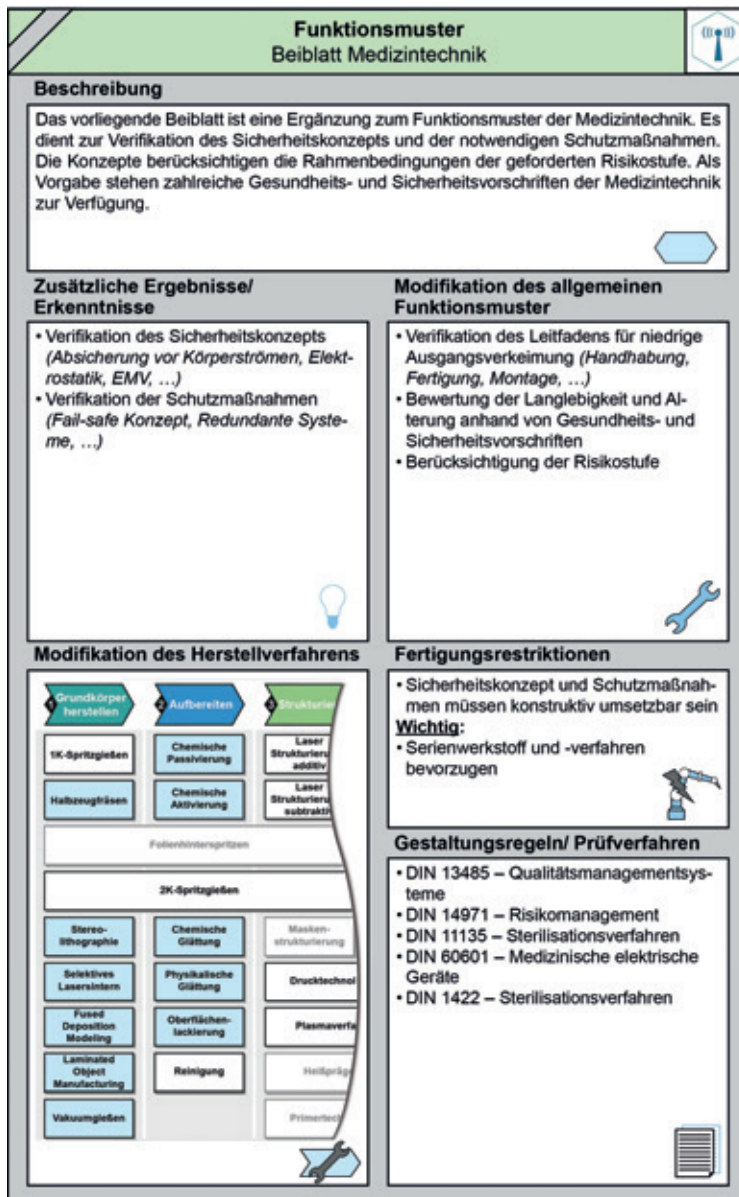


Bild A-24: Steckbrief Funktionsmuster Beiblatt Medizintechnik

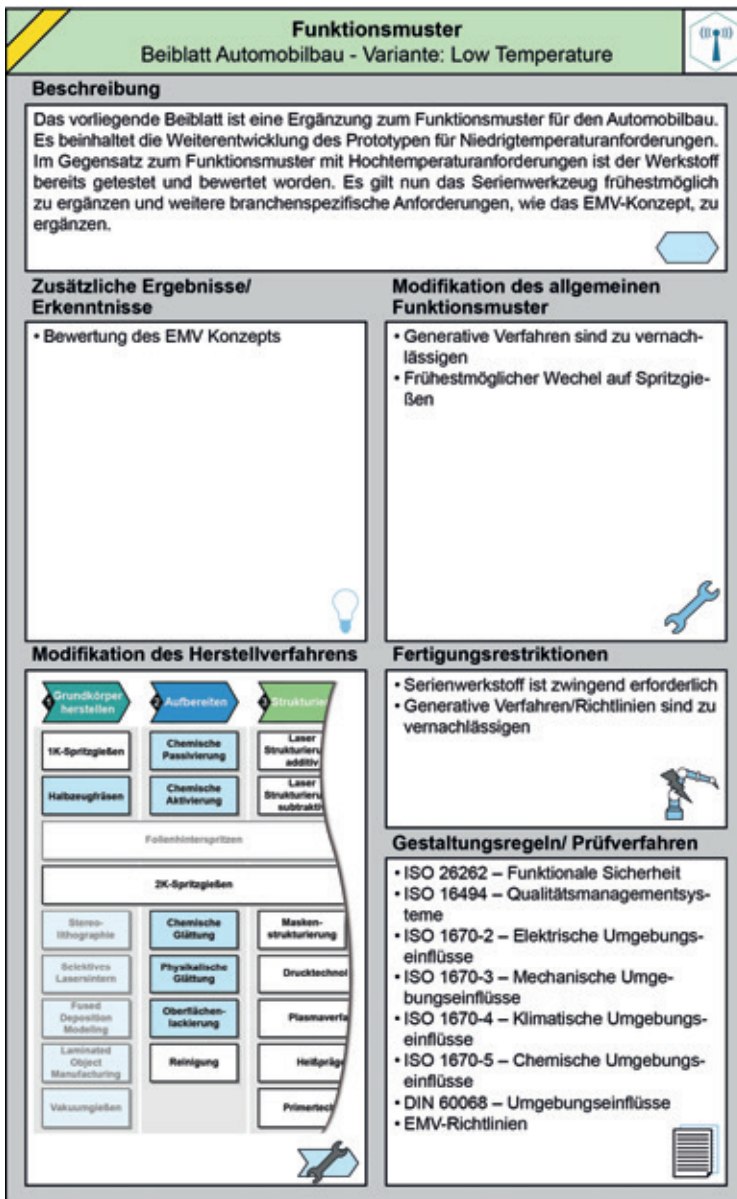


Bild A-25: Steckbrief Funktionsmuster Beiblatt Automobilbau Low Temperature

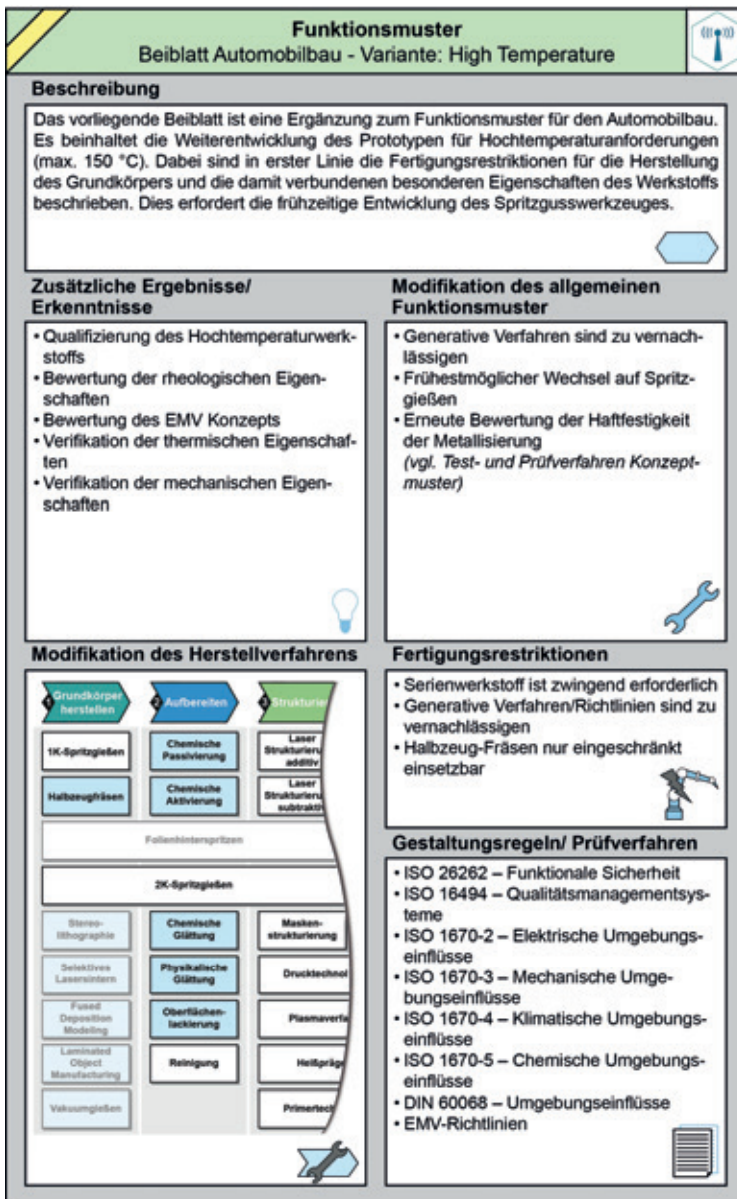


Bild A-26: Steckbrief Funktionsmuster Beiblatt Automobilbau High Temperature

Funktionsmuster Beiblatt IT- und Telekommunikation																
Beschreibung <p>Das vorliegende Beiblatt ist eine Ergänzung zum Funktionsmuster der IT- und Telekommunikation. Das Funktionsmuster verifiziert zusätzlich die Störsicherheit und Störeigenschaften des Endprodukts. Darüber hinaus bewertet es die Hochfrequenzeigenschaften und die Absicherung des Schaltungsträgers vor Umwelteinflüssen, wie Feuchtigkeit oder Staub. Für die Bewertung stehen der IT- und Telekommunikation spezifische Test- und Prüfverfahren zur Verfügung.</p>																
Zusätzliche Ergebnisse/Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung der Hochfrequenzeigenschaften • Bewertung der Störeigenschaften • Verifikation der Störsicherheit • Verifikation der homogenen Wärmeverteilung • Bewertung der Umwelteinflüsse • Absicherung vor Umwelteinflüssen 	Modifikation des allgemeinen Funktionsmuster <ul style="list-style-type: none"> • Abschließende Bewertung des Materials anhand der Hochfrequenzeigenschaften • Definieren der gewünschten Störeigenschaften 															
Modifikation des Herstellverfahrens <table border="1"> <tr> <td>1 Grundkörper herstellen</td> <td>2 Aufarbeiten</td> <td>3 Strukturieren</td> </tr> <tr> <td> 1K-Spritzgießen Halbzeuggrößen </td> <td> Chemische Passivierung Chemische Aktivierung </td> <td> Laser Strukturieren additiv Laser Strukturieren subtraktiv </td> </tr> <tr> <td colspan="3">Folienbindergrößen</td> </tr> <tr> <td colspan="3">2K-Spritzgießen</td> </tr> <tr> <td> Stereolithographie Selektives Lasersintern Fused Deposition Modeling Laminated Object Manufacturing Vakuumgießen </td> <td> Chemische Glättung Physikalische Glättung Oberflächenlackierung Reinigung </td> <td> Maskenstrukturierung Drucktechnol. Plasmaverfahren Heißprägen Primerverfahren </td> </tr> </table>	1 Grundkörper herstellen	2 Aufarbeiten	3 Strukturieren	1K-Spritzgießen Halbzeuggrößen	Chemische Passivierung Chemische Aktivierung	Laser Strukturieren additiv Laser Strukturieren subtraktiv	Folienbindergrößen			2K-Spritzgießen			Stereolithographie Selektives Lasersintern Fused Deposition Modeling Laminated Object Manufacturing Vakuumgießen	Chemische Glättung Physikalische Glättung Oberflächenlackierung Reinigung	Maskenstrukturierung Drucktechnol. Plasmaverfahren Heißprägen Primerverfahren	Fertigungsrestriktionen <ul style="list-style-type: none"> • Wenn notwendig: Zugänglichkeit für das Auftragen des Flammschutzmittels sicherstellen
1 Grundkörper herstellen	2 Aufarbeiten	3 Strukturieren														
1K-Spritzgießen Halbzeuggrößen	Chemische Passivierung Chemische Aktivierung	Laser Strukturieren additiv Laser Strukturieren subtraktiv														
Folienbindergrößen																
2K-Spritzgießen																
Stereolithographie Selektives Lasersintern Fused Deposition Modeling Laminated Object Manufacturing Vakuumgießen	Chemische Glättung Physikalische Glättung Oberflächenlackierung Reinigung	Maskenstrukturierung Drucktechnol. Plasmaverfahren Heißprägen Primerverfahren														
Gestaltungsregeln/ Prüfverfahren <ul style="list-style-type: none"> • DIN 55022 – Funkstöreigenschaften • DIN 300019 – Umweltprüfungen 																

Bild A-27: Steckbrief Funktionsmuster Beiblatt IT- und Telekommunikation

Tabelle A-2: Nationale und internationale EMV-Normen für Kraftfahrzeuge

Nationale und internationale EMV-Normen für Kraftfahrzeuge		
Norm	Inhalt	Letzter Stand
DIN EN 55012	Funkstöreigenschaften: Schutz der Empfänger von außen	2010
DIN EN 55025	Funkstöreigenschaften: Schutz der Empfänger von innen	2009
ISO 7637	Elektrische Störungen durch Leitung und Kopplung	2015
ISO 10605	Prüfverfahren für elektrostatische Störungen	2008
ISO 11451	Prüfverfahren für Störungen durch EM-Energie	2005
ISO 11452	Einstrahlung und Immunität auf Komponenten	2014
ISO 16750	Prüfung elektrischer/elektronischer Komponenten	2012

Literaturverzeichnis

- [AGF+12] AMEND, P.; GOTH, C.; FRANKE, J.; FRICK, T.; SCHMIDT, M.: ADDIMID Technology and Aerosol Jet Printing for Functional MID Prototypes by the Use of Stereolithography. In: Proceedings: 10 th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 19.-20. September 2012.
- [AIS+77] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M.; FIKSDAHLKING, I.; ANGEL, S.: A Pattern Language – Towns, Buildings, Construction. Oxford University Press, 1st Edition, 1977
- [APR+10] AMEND, P.; PSCHERER, C.; RECHTENWALD, T.; FRICK, T.; SCHMIDT, M.: A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology, In: Physics Procedia – Proceedings of the Laser Assisted Net Shape Engineering 6, Elsevier, 2010
- [Ash05] ASHBY, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005
- [Ana15] ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 354, Paderborn, 2015
- [AR11] ABELE, G.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion –Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [Ave02] AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 109, 2002
- [Bar98] BARTER, R. H.: A Systems Engineering Pattern Language. In Proceedings of: 8th Annual International Symposium on the International Council on Systems Engineering, Vancouver, BC, Juli, 1998
- [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
- [BBW+13] BREUNIGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, Springer Vieweg, Berlin, 2013
- [Bee11] BEER, D.: Zuverlässige Qualitätssicherung von MID-Produkten. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 13. Jahrgang, Nummer 4 (2011), S. 927-931
- [Bei09] BEINE, H.: Neue Dimensionen – Reinigen Aktivieren und Beschichten mit kaltaktivem Plasma unter Atmosphärendruck, In: Productronic 12, 2009
- [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
- [BHS13] BERGER, U.; HARTMANN, A.; SCHMID, D.: Additive Fertigungsverfahren – Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten. 2013
- [Boe88] BOEHM, B.W.: A Spiral Model of Software Development and Enhancement. In: IEEE Computer 1988. 5. Ausg.
- [Bor10] BORGEESE, K.: Elektronik in der Fahrzeugtechnik: Hardware, Software, System und Projektmanagement. 2. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2010

- [Bra14] BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 325, Paderborn, 2014
- [Bro01] BROWING, T.: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems – A Review and New Directions. IEEE Transactions on Engineering Management 48(3), Fayetteville, 2001
- [Bro10] BROY, M. (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. acatech DISKUTIERT, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [BS07] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U.; (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 5. überarbeitete Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007
- [Car15-ol] CARBON 3D INC.: A new Approach to 3D Printing. Unter: <http://carbon3d.com>, am 8. April 2015
- [CD06] CLOUTIER, R.; VERMA, D.: Applying Pattern Concepts to Systems (Enterprise) Architecture. Journal of Enterprise Architecture, Volume 2, Number 2, 2006
- [CEK02] COOPER, R.G.; EDGETT, S.J.; KLEINSCHMIDT, E.J.: Optimizing the Stage Gate Process What Best Practice Companies Do, Research-Technology Management, 45:5, 21-27
- [CMM+14] CONNER, B.; MANOGHARAN, G.; MARTOF, A.; RODOMSKY, L.; RODOMSKY, C.; JORDAN, D.; LIMPEROS, J.: Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. In: Additive Manufacturing, Volume 1-4, Elsevier, 2014
- [Coo02] COOPER, R.G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung. Erfolgsstrategien: Von der Idee zum Launch. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
- [Dah90] DAHL, B.: Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1990
- [DH02] DAENZER, W. F.; HUBER, F. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 11. Auflage, 2002
- [Dud10] DUDEN: Das Fremdwörterbuch. Dudenverlag, Mannheim, 10. aktualisierte Auflage, 2010
- [Dud16a-ol] DUDEN: Modell. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Modell>, 26. Januar 2016
- [Dud16b-ol] DUDEN: Muster. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Muster>, 26. Januar 2016
- [Dud16c-ol] DUDEN: Prototyp. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Prototyp>, 26. Januar 2016
- [Dum10] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, 2010
- [EA98] ESAWI, A.M.K.; ASHBY, M.F.: The Development and Use of a Software Tool for Selecting Manufacturing Processes at the Early Stages of Design. Proceedings of the Third Biennial World Conference on Integrated Design and Process Technology (IDPT), July 5 - 9 1998, Volume 3, Berlin, 1998

- [EGG+12] EIGNER, M.; GERHARDT, F.; GILZ, T.; MOGO NEM, F.: Informationstechnologie für Ingenieure, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2012
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2009
- [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
- [EU09] EPPINGER, S.; UNGER, D.: Comparing product development processes and managing risk. In: International Journal of Product Development, 2009, Vol. 8, Nr. 4.
- [EWS+94] EPPINGER, S.; WHITNEY, D.; SMITH, R.; GEBALA, D.: A model-based method for organizing tasks in product development. Research in Engineering Design 6(1), London, 1994
- [Fal00] FALLBÖHMER, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [Fas12] FASTERMANN, P.: 3D-Druck/ Rapid Prototyping: Eine Zukunftstechnologie kompakt erklärt. Springer Vieweg, Berlin, 2012
- [Fel09] FELDMANN, K.: MID – Zukunftstechnologie für mechatronisch integrierte Produkte. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 11/2009, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2009
- [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
- [FG08] FELDMANN, K.; GOTH, C.: Innovative mechatronische Lösungskonzepte für unterschiedliche Produktfelder. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 08/2008, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2008
- [FGG+11] FRANKE, J.; GAUSEMEIER, J.; GOTH, C.; DUMITRESCU, R.: MID-Studie 2011. Markt- und Technologieanalyse. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. Erlangen, 2011
- [FM05] FLEISCH, E.; MATTERN, F. (Hrsg.): Das Internet der Dinge - Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen, Springer, Berlin, 2005
- [FMS12] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A practical guide to SysML – The systems modeling language. Morgan Kaufmann, Waltham, 2. Auflage, 2012
- [Fon62] FONDAHL, J.: Non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry, 2nd Edition, Tech Rept No 9, 131 Pp, Tab, 66 Ref, 8 App, Department of Civil Engineering, Stanford University, USA, 1961
- [For04] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID e.V.: 3D-MID Technologie – Räumliche elektronische Baugruppen, Carl Hanser Verlag, München, 2004

- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fra95] FRANKE, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Dissertation, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [Fra13] FRANKE, J.; (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID) – Werkstoffe Hersteller, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger. Carl HANSER, München, 2013
- [GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WASSMANN, H.; DUMITRESCU, R.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 310, 18.-19. April, Paderborn, 2013
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München 2010
- [GBP03] GAUSEMEIER, J.; BINGER, V.; PEITZ, T.: Chancen und Grenzen der Technologie MID – Markt- und Technologieanalyse. Eine Studie im Auftrag DER FORSCHUNGSVEREINIGUNG 3-D MID E. V. (Hrsg.), Erlangen, 2003
- [GDG10] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; GAUKSTERN, T.: Chancen der Technologie MID erkennen und nutzen. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 2/2010, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 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(4), Elsevier, Oxford, 2011
- [Geb13] GEBHARDT, A.: Generative Fertigungsverfahren: additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling – Produktion. 4. neu bearbeitete und erweiterte Auflage – München, Carl HANSER, 2013
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrative Entwicklung räumlicher 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
- [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
- [GPW14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2014
- [Got13] GOTH, C.: Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID), Dissertation, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2013
- [GPF11] GOTH, C.; PUTZO, S.; FRANKE, J.: Aerosol Jet Printing on Rapid Prototyping Materials for Fine Pitch Electronic Applications, In: Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 978-1-61284-498-5/11/\$26.00, IEEE, 2011
- [Grö15] GRÖZINGER, T.: Untersuchungen zu Zuverlässigkeit und Lebensdauermodellen für gelötete SMD auf spritzgegossenen Schaltungsträgern, Dissertation, Universität Stuttgart, 2015
- [GRS09] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. Universität Paderborn, HNIVerlagsschriftenreihe, Band 234, 2009
- [GS12] GLATZEL, U.; SCHERM, F.: Metallische Werkstoffe. In: Rieg, F.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme – Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [GT15-ol] GOTH, C.; TRÖGER, L.: Prototyping for 3D-MIDs. Unter: http://www.harting-mitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/white_papers/Prototyping_for_3D-MIDs.pdf, 20. Juli 2015
- [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
- [GWR09] GAUBINGER, K.; WERANI, T.; RABL, M.: Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement – Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- [Har12] HARTING AG MITRONICS: Gestaltungsrichtlinie 3D-MID, Unternehmensschrift, Biel, 2012
- [Has05] HASKINS, C.: Application of Patterns and Pattern Languages to Systems Engineering. In Proceedings of: 15th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering, Rochester, New York, Juli, 2005

- [HB11] HABERHAUER, H.; BODENSTEIN, F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, 16. Auflage, 2011
- [Hit07] HITCHINS, D. K.: Systems engineering – A 21st century systems methodology. John Wiley, West Sussex, England, 2007
- [Hor93] HORVÁTH, P. (Hrsg.): Target costing – marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993
- [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 DE, O. L.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli, Zürich, 2012
- [Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Jet05] JETTER, A.: Produktplanung im Fuzzy Front End - Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von Fuzzy Cognitive Maps, Dissertation, RWTH Aachen, Deutscher Universitäts-Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005
- [Joh10] JOHN, W.: New Possibilities for MID Engineers based on LPKF-LDS ProtoPainting. In: Proceedings: 9th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 29.-30. September 2010.
- [JS11] JILLEK, W., SCHMITT, E.: Inkjet gedruckte Schaltungen. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), 13. Jahrgang, Nummer 1 (2011), S. 151–162.
- [Kai13] KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2013
- [Kai09] KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftreihe, Band 248, Paderborn, 2009
- [Kal98] KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998
- [KBR+14] KURTZ, O.; BARTHELMES, J.; RÜTHER, R.; BOZSA, F.: Innovative 3D-MID-Technologie. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 8/2014, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2014
- [KCS+97] KRAUSE, F.L.; CIESLA, M.; STIEL, CH.; ULBRICH, A.: Enhanced rapid prototyping for faster product development processes, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 46, S. 93-96, 1997

- [Kil76] KILBY, J. S.: Invention of the integrated circuit. In: IEEE Transactions on Electron Devices. 23, Nr. 7, 1976, S. 648–654.
- [Kle00] KLEMP, E.: Der Einfluss des Rapid Prototyping auf die Produktentwicklung. Mitteilung aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, 2000
- [Kra04] KRAUSE, F.-L.: Strategische Bedeutung des Digital Engineering, In: Digital Engineering Forum MIT, Bochum, 2004
- [KT14] KONDOH, S.; TEZUKA, A.: Synthesis of verification models in multidisciplinary design of complex engineered systems, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 63, S. 145-148, 2014
- [Lin09] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Lin16] LINDEMANN, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [Lpk11] LPKF LASER & ELECTRONICS: LDS MID Designregeln – Designregeln für laserdirektstrukturierte MID-Komponenten (v2.1), Unternehmensschrift, Garbsen, 2011
- [LR98] LINDEMANN, U.; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement, Springer-Verlag, Berlin, 1998
- [Mau12] MAURER, M.: Komplexitätsmanagement für die industrielle Praxis – Komplexe Systeme und ihre Eigenschaften. Technische Universität München, München, 2012
- [Mei02] MEIER, R.: Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [Mic06] MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, 2006
- [Mül08] MÜLLER, J.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Forschungsberichte IWB, Band 209, 2008
- [Mül11-ol] MÜLLER, D.: 3D-Schaltungsträger - ganz einfach, Unter: <http://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/leiterplatten/artikel/79268/>, 27. Januar 2016
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI Verlagsschriftreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [NW98] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H.: Leiterbahnstrukturen auf einem nichtleitenden Trägermaterial, insbesondere feine Leiterbahnstrukturen und Verfahren zu ihrer Herstellung, Patent Nr. WO 1999005895 A1, 1998

- [NW03] NAUNDORF, G.; WISSBROCK, H.: Leiterbahnstrukturen und Verfahren zu ihrer Herstellung, Patent Nr. WO 2003005784 A2, 2003
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [PBF13+] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre. Springer-Verlag, Berlin, 8. Auflage, 2013
- [Pei08] PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftreihe, Band 221, Paderborn, 2008
- [Per12] PERELAER, J. ET AL.: Plasma and Microwave Flash Sintering of a Tailored Silver Nanoparticle Ink, Yielding 60 % Bulk Conductivity on Cost-Effective Polymer Foils. In: Journal of Advanced Material, Vol. 24, Issue 29 (2012), S. 3993–3998.
- [PL11] PONN, J.; LINDEMANN, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2011
- [Rap10] RAPP, T.: Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen, ID-Consult, München, 2010
- [Rem12] REMER, U.: From Prototyping to Mass Production of a MID Based Flow Sensor. In: Proceedings: 10th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth, 19.-20. September 2012
- [RGF+11] REINHARDT, A.; GOTH, C.; FRANKE, J.; SCHÖBER, M.; KÜCK, H.; MAJCHEREK, S.; HÖLL, S.; SCHMIDT, B.: ZUMIKROSYS – Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID und flexiblen Substraten. Abschlussbericht des AiF-Projekts 303 ZBG, 2011
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1: Konstruktionslehre, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 2000
- [Rot01] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 2: Kataloge, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 2001
- [RP10] REMER, U.; POJTINGER, A.: Entwicklung und Herstellung von MID-Baugruppen. Präsentation 2E mechatronic, Kirchheim, 2010
- [SBA02] SPECHT, G.; BECKMANN, C.; AMELINGMEYER, J.: F&E Management – Kompetenz im Innovationsmanagement, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2002
- [SCA+16] STEIMER, C.; CADET, M.; AURICH, J.; STEPHAN, N.: Approach for an integrated planning of manufacturing systems based on early phases of product development, 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP 57, S. 467-472, 2016
- [Sch11] SCHENK, M. (Hrsg.): Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer, In: Tagungsband 14. IFF-Wissenschaftstage, 28. – 30. Juni 2011, Magdeburg
- [Sch16] SCHIERBAUM, T.: Systematik zur frühzeitigen Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2016

- [Sch13] SCHRAMM, R.: Der MIDster – Umsetzung einer 3D-Fertigung, Fachworkshop 3D-MID-Anwendungen: Gestaltung – Fertigung – Zuverlässigkeit, Vortragsunterlagen, Nürnberg, 2013
- [Sch15] SCHRAMM, R.: Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma, Dissertation, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2015
- [SFV+13] SCHRAMM, R.; FENGLER, M.; VITENSE, L.; MANN, T.; FRANKE, J.: Der MIDster – Die Potenziale der MID-Technik in Verbindung mit einem innovativen Design, In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 08/2013, Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2013
- [Sei93] SEIDENSCHWARZ, W.: Target Costing – marktorientiertes Zielkostenmanagement – Controlling Praxis, Vahler Verlag, München, 1993
- [SK11] SCHUH, G.; KLAPPERT, S. (Hrsg.): Technologiemanagement – Handbuch Produktion und Management 2. Springer Verlag, Berlin, 2. Vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2011
- [SMG+10] SCHMIDT, M., MÜNSTEDT, H., GRIEL, P., FRICK, T., TRAVITZKY, N.: PROMID - Herstellung funktionaler Schaltungsträger mittels Rapid Prototyping für MID-Anwendungen, Schlussbericht AiF-Vorhaben-Nr. /GAG 15684 N/1, Erlangen, 2010
- [Ste81] STEWARD, D.: The Design Structure System – A Method for Managing the Design of Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management, 28(3), Fayetteville, 1981
- [SW15] SEIFERT, I.; WOJCIK, H. (Hrsg.): Mikrochip ABC – Spannende Welt der Mikroelektronik. 3D Infotainment Technologies UG, Dresden, 2015
- [SWS03] SMITH, C.S.; WRIGHT, P.K.; SÉQUIN, C.: The Manufacturing Advisory Service: webbased process and material selection. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 16, No. 6, Taylor & Francis Ltd., London, 2003
- [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
- [TK08] TOUTENBERG, H.; KNÖFEL, P.: Six Sigma – Methoden und Statistiken für die Praxis, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [Tro01] TROMMER, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, 2001
- [UE95] ULRICH, K.; EPPINGER, S.: Product Design and Development. McGraw-Hill Press, New York, 1995
- [Ver99] VERGANTI, R.: Leveraging on systematic learning to manage early phases of product innovation projects, R&D Management, 27, 4, 377–392, 1999
- [Wat06] WATTY, R.: Methode zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik und technisches Design, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006
- [Wei91] WEISER, M.: The Computer for the 21st Century, Scientific American 265, p. 94 - 104, 1991
- [Wes05] WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [Wiß02] WIBBROCK, H.: Laser-Direkt-Strukturieren von Kunststoffen: Ein neues Verfahren im Spiegel eingeführter MID-Technologien. Erschienen in: KU Kunststoffe Jahrg. 92-11. Carl HANSER, München, 2002.
- [WR06] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006

- [ZFG+14] ZEITLER, J.; FISCHER, C.; GOETZE, B.; MOGHADAS, S.; FRANKE, J.: Integration of Semi-Automated Routing Algorithms for Spatial Circuit Carriers into Computer-Aided Design Tools, In: Proceedings of the 13th Electronic Circuits World Convention, 2014
- [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
- [ZMH+11] ZARANDI, M. H. F.; Mansour, S.; Hosseinijou, S.; Avazbeigi, M.: A material selection methodology and expert system for sustainable product design, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 57, Issue 9, pp 885-903, 2011

Normen und Richtlinien

- [DIN657] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung; Deutsche Fassung EN 657:2005, Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [DIN10350] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte – Teil 1: Formmassen. DIN EN ISO-Norm 10350. Beuth-Verlag, 2014
- [DIN60068] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Umgebungseinflüsse – Teil 2: Prüfverfahren. DIN EN-Normreihe 60068-2, Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [DIN60812] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth Verlag, Berlin, 2015
- [DIN8580] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. DIN-Norm 8580, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [IPC2221] IPC ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES: Basisrichtlinien für das Design von Leiterplatten. IPC-Norm 2221B. Fachverband Elektronik-Design, Berlin, 2012
- [ISO16750] ISO INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG: Elektrische und elektronische Kraftfahrzeugausrüstung – Umgebungsbedingungen, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [ISO16949] ISO INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG: Qualitätsmanagementsysteme – Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001:2008 für die Serien- und Ersatzteil-Produktion in der Automobilindustrie. DIN ISO/TS-Norm 16949. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [ISO26262] ISO INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG: Straßenfahrzeuge – Funktionale Sicherheit. ISO-Normreihe 26262 – Teil 1 bis Teil 10. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2218] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie. VDI-Richtlinie 2218, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [VDI2221] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Beuth-Verlag, Berlin, 1993

-
- [VDI2422] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI), Verein Deutscher Elektrotechniker (VDE): Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. VDI/VDE-Richtlinie 2422, Beuth-Verlag, Berlin, 1994
- [VDI2860] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Richtlinie 2860, Beuth-Verlag, Berlin, 1990
- [VDI3404] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) – Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. VDI-Richtlinie 3404, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [VDI3405] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. VDI-Richtlinie 3405, Beuth Verlag, Berlin, 2014
- [VDI4003] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Zuverlässigkeitsmanagement. VDI-Richtlinie 4003, Beuth Verlag, Berlin, 2007

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Christoph Jürgehake
Anschrift: Im Brok 45, 59597 Erwitte
Geburtsdatum: 15. Dezember 1982
Geburtsort: Lippstadt
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung

08/1989 – 07/1993 Grundschule in Stirpe
08/1993 – 07/2002 Städtisches Gymnasium Erwitte
 Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst

08/2002 – 05/2003 von Hoerd'sches Marienhospital, Erwitte

Studium

10/2003 – 11/2009 Technische Universität Braunschweig und Universidad
 Politécnica de Madrid, Spanien
 Abschluss: Diplom Ingenieur

Berufserfahrung

08/2010 – 06/2011 Consultant,
 Altran Technologies, Hamburg

Seit 03/2006 Geschäftsführer
 Jürgehake GmbH & Co KG, Lippstadt

Seit 07/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer-Institut
 für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Paderborn,
 Abteilung Produktentstehung

Erwitte, 26. Oktober 2017

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 neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 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: Enroute 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 tomorrows economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- | | |
|--|--|
| <p>Bd. 348 HEINZEMANN, C.: Verification and Simulation of Self-Adaptive Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 348, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-67-0</p> | <p>Bd. 355 RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 355, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-74-8</p> |
| <p>Bd. 349 MARKWART, P.: Analytische Herleitung der Reihenfolgeregeln zur Entzerrung hochauslastender Auftragsmerkmale. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 349, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-68-7</p> | <p>Bd. 356 SÖLLNER, C.: Methode zur Planung eines zukunftsfähigen Produktportfolios. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5</p> |
| <p>Bd. 350 RÜBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 350, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-69-4</p> | <p>Bd. 357 AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 357, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-76-2</p> |
| <p>Bd. 351 BRENNER, C.: Szenariobasierte Synthese verteilter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 351, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-70-0</p> | <p>Bd. 358 LÖFFLER, A.: Entwicklung einer modellbasierten In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 358, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-77-9</p> |
| <p>Bd. 352 WALL, M.: Systematik zur technologieinduzierten Produkt- und Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 352, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-71-7</p> | <p>Bd. 359 LEHNER, A.: Systematik zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 359, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-78-6</p> |
| <p>Bd. 353 CORD-LANDWEHR, A.: Selfish Network Creation - On Variants of Network Creation Games. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 353, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-72-4</p> | <p>Bd. 360 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. Dezember 2016, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 360, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-79-3</p> |
| <p>Bd. 354 ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 354, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-73-1</p> | <p>Bd. 361 PETER, S.: Systematik zur Antizipation von Stakeholder-Reaktionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 361, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-80-9</p> |

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 362 ECHTERHOFF, O.: Systematik zur Erarbeitung modellbasierter Entwicklungsaufträge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 362, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-81-6
- Bd. 363 TSCHIRNER, C.: Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 363, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-82-3
- Bd. 364 KNOOP, S.: Flachheitsbasierte Positionsregelungen für Parallelkinematiken am Beispiel eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 364, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-83-0
- Bd. 365 KLIEWE, D.: Entwurfssystematik für den präventiven Schutz Intelligenter Technischer Systeme vor Produktpiraterie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 365, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-84-7
- Bd. 366 IWANEK, P.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 366, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-85-4
- Bd. 367 SCHWEERS, C.: Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 367, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-86-1
- Bd. 368 SCHIERBAUM, T.: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 368, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-87-8
- Bd. 369 BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Intelligente technische Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 369, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-88-5
- Bd. 370 KÜHN, A.: Systematik zur Release-Planung intelligenter technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 370, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-89-2
- Bd. 371 REINOLD, P.: Integrierte, selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelrad-aktori. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 371, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-90-8
- Bd. 372 BÄUMER, F. S.: Indikatorbasierte Erkennung und Kompensation von ungenauen und unvollständig beschriebenen Softwareanforderungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 372, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-91-5
- Bd. 373 ECKELT, D.: Systematik zum innovationsorientierten Intellectual Property Management. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 373, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-92-2
- Bd. 374 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 13. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 23. und 24. November 2017, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 374, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-93-9
- Bd. 375 WESTERMANN, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 375, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-94-6