

Ingo Kaiser

***Systematik zur Entwicklung mecha-
tronischer Systeme in der Technologie
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

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2009

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

Satz und Gestaltung: Ingo Kaiser

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

Printed in Germany

Geleitwort

Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten am Heinz Nixdorf Institut ist die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Der Begriff Mechatronik bringt das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik zum Ausdruck. Mechatronische Systeme reichen von 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. Ihre wesentlichen Potentiale liegen in der Miniaturisierung, der Rationalisierung der Fertigung und der Steigerung der Zuverlässigkeit. Die Technologie MID (Molded Interconnect Devices) integriert Mechanik und Elektronik in einem Bauteil und steht an der Schwelle zur Schlüsseltechnologie. Das Besondere bei der Entwicklung von MID-Teilen ist, dass zwischen Produkt und Fertigungsprozess starke Wechselwirkungen bestehen. Das geht so weit, dass bereits das Produktkonzept von dem zugrunde liegenden MID-Verfahren determiniert wird. Deswegen ist es notwendig, das Produkt und das dazugehörige Produktionssystem parallel und integrativ zu entwickeln.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Kaiser eine Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID entwickelt. Sie dient als Leitfaden für die Entwicklung von MID-Teilen. Im Kern besteht die Systematik aus einem generischen Vorgehensmodell, das den grundsätzlichen Ablauf der MID-Entwicklung beschreibt. Dieses wird je nach eingesetztem MID-Verfahren zu spezifischen Vorgehensmodellen ausgeprägt, die die Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und dem jeweiligen MID-Verfahren berücksichtigen.

Mit dieser Arbeit hat Herr Kaiser einen bedeutenden Beitrag zur weiteren Etablierung der Technologie MID geleistet. Die Systematik ist Teil einer übergeordneten Konstruktionslehre MID.

Paderborn, im Februar 2009

Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Ingo Kaiser
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 1. Dezember 2008
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rückert

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudent am Lehrstuhl Rechnerintegrierte Produktion des Heinz Nixdorf Instituts (HNI) der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner Forschungstätigkeit und Projekten, an denen ich mitgewirkt habe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die stete Förderung meiner Ausbildung und der kritischen Auseinandersetzung mit meiner wissenschaftlichen Arbeit. Seine Kritik war stets knapp, treffend und konstruktiv. Sein Vertrauen in meine Fähigkeiten war für mich die Grundlage für ein selbstständiges Arbeiten in spannenden Projekten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rückert, Inhaber des Lehrstuhls Systems and Circuit Technology des Heinz Nixdorf Instituts, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Mein Dank gilt darüber hinaus dem Graduiertenkolleg Automatische Konfiguration in offenen Systemen und der Unity AG für die Ermöglichung und Förderung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Allen Kollegen, sowohl des Lehrstuhls Rechnerintegrierte Produktion als auch des Lehrstuhls Systems and Circuit Technology, danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und den Teamgeist, ohne die mein liebstes Projekt, der Miniaturroboter, nie Wirklichkeit geworden wäre. Mein spezieller Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Peitz, dessen Anregungen und Diskussionen wesentliche Impulse für meine Arbeit beigetragen haben. Weiter hervorzuheben sind Frau Dr.-Ing. Ursula Frank, Herr Dipl.-Wirt.-Ing. Sascha Kahl und Herr Dipl.-Inf. Sebastian Pook, die mich durch ihre intensive Auseinandersetzung mit meiner Dissertation sehr unterstützt haben. Ferner gilt mein Dank allen studentischen Mitarbeitern, Studien- und Diplomarbeitern im Team Entwicklungsmethodik Mechatronik.

Das größte Dankeschön gehört meiner Frau Jing, meinen Eltern und meinen Freunden. Sie haben mich immer uneingeschränkt unterstützt.

Paderborn, im Februar 2009

Ingo Kaiser

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [K GK+06] KAISER, I.; GAUSEMEIER, J.; KAULMANN, T.; WITKOWSKI, U.: Integrative Entwicklung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger am Beispiel eines Miniroboters. Tagungsband 4. Paderborner Workshop „Entwurf mechatronischer Systeme“. 30./31. März 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 189, 2006
- [K GF+06] KAISER, I.; GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; POOK, S.: Entwurf räumlicher elektronischer Schaltungsträger am Beispiel eines Miniaturroboters. Tagungsband Internationales Forum Mechatronik, 16./17. Oktober 2006, Linz, 2006
- [K FG+06] KAISER, I.; FRANK, U.; GAUSEMEIER, J.; POOK, S.: Design of a spatial electronic circuit carrier by the example of a miniature robot. In: Proceedings of IMECE 2006, Paper 14531. November 5-9th, Chicago, Illinois, 2006
- [K G07] KAISER, I.; GAUSEMEIER, J.: Integrativer Entwurf räumlicher elektronischer Schaltungsträger am Beispiel eines Miniroboters. Tagungsband 5. Paderborner Workshop „Entwurf mechatronischer Systeme“, 22./23. März 2007, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 210, 2007
- [K FG07] KAISER, I.; FRANK, U.; GAUSEMEIER, J.: Knowledge-based design of 3D electronic circuit carriers. In: Proceedings of IDETC&CIE 2007, Paper 34663. September 4-7th, Las Vegas, Nevada, 2007
- [K KG+07] KAISER, I.; KAULMANN, T.; GAUSEMEIER, J.; WITKOWSKI, U.: Miniaturization of autonomous robots by the new technology Molded Interconnect Devices (MID). Tagungsband Autonomous Miniature Robots in Research and Edutainment, 2.-5. Oktober 2007, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 216, 2007
- [K MS07] KAISER, I.; MOJRZISCH, S.; SCHIEDECK, F.: Smart Materials as Actuators in Autonomous Miniature Robots. Tagungsband Autonomous Miniature Robots in Research and Edutainment, 2.-5. Oktober 2007, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 216, 2007
- [K PG08] KAISER, I.; POOK, S.; GAUSEMEIER, J.: Design of integrated mechatronics supported by a knowledge base. Tagungsband zum 7. Internationalen HNI-Symposium, 20.-21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 223, 2008

Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	1
1.1 Problematik.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	3
2 Problemanalyse	5
2.1 Einordnung und Begriffsdefinitionen.....	5
2.2 Mechatronische Systeme	6
2.2.1 Klassen mechatronischer Systeme.....	7
2.2.2 Grundstruktur mechanisch-elektronischer Baugruppen	8
2.2.3 Differential- und Integralbauweise	10
2.3 Die Technologie MID	11
2.3.1 Beschreibung der Technologie MID.....	11
2.3.2 MID-Verfahren	14
2.3.3 Aufbau- und Verbindungstechnik.....	17
2.3.4 Nutzenpotentiale der Technologie MID.....	21
2.3.5 Barrieren der Technologie MID.....	22
2.4 Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen	24
2.4.1 Zyklusmodell der Produktentstehung	24
2.4.2 Produktentwicklung.....	27
2.4.2.1 Mechanik-Entwicklung nach PAHL/BEITZ..	27
2.4.2.2 Elektronik-Entwicklung nach GAJSKI	29
2.4.3 Produktionssystementwicklung.....	32
2.5 Problemabgrenzung	34
2.6 Anforderungen an die Systematik.....	36

3	Stand der Technik.....	37
3.1	Systematiken zur Mechatronik-Entwicklung	37
3.1.1	VDI-Richtlinie 2221: Entwicklung technischer Systeme	37
3.1.2	VDI-Richtlinie 2422: Entwicklung mikroelektronisch gesteuerter Systeme	40
3.1.3	VDI-Richtlinie 2206: Entwicklung mechatronischer Systeme	42
3.1.4	Mechatronik-Entwicklung nach ISELMANN	44
3.1.5	Mechatronik-Entwicklung nach LÜCKEL.....	47
3.1.6	Mechatronik-Entwicklung nach KALLENBACH.....	49
3.1.7	Mechatronik-Entwicklung nach LINDEMANN.....	50
3.1.8	Systematik nach EQUAL	53
3.1.9	Systematik nach INERELA.....	55
3.2	Spezifikationstechniken für das Produkt und das Produktionssystem	57
3.2.1	Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme nach FRANK	57
3.2.2	Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen nach MICHELS	59
3.3	MID-spezifische Methoden und Werkzeuge	61
3.3.1	Eigenschaftskarten der MID-Verfahren	61
3.3.2	MID-Konstruktionskatalog	63
3.3.3	MIDIS-Datenbank	64
3.3.4	MIDCAD	66
3.3.5	NEXTRA	68
3.4	Handlungsbedarf	70
4	Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID	73
4.1	Validierungsbeispiel: Autonomer Miniaturroboter	73
4.2	Die Systematik im Überblick	76
4.3	Das Generische Vorgehensmodell.....	78
4.4	Das Spezifische Vorgehensmodell für die Laserdirektstrukturierung.....	82
4.4.1	Planen und Klären der Aufgabe	83
4.4.1.1	Aufgabe klären	83
4.4.1.2	Umfeld analysieren	84
4.4.1.3	Anforderungen analysieren.....	85

4.4.2	Produkt konzipieren	87
4.4.2.1	Funktionen ermitteln	88
4.4.2.2	Lösungsideen generieren	89
4.4.2.3	Wirkstruktur und Gestaltentwurf erstellen	91
4.4.2.4	Restriktionen durch Fertigung erfassen ...	93
4.4.3	Fertigungsprozess konzipieren	94
4.4.3.1	Restriktionen durch Produkt erfassen	94
4.4.3.2	Fertigungstechnologien auswählen	96
4.4.3.3	Prozesskette konzipieren	97
4.4.4	3D-Elektronik entwerfen	99
4.4.4.1	Schaltungsträger grobgestalten	100
4.4.4.2	Schaltungsträger feingestalten	102
4.4.4.3	Schaltungsträger ausarbeiten	104
4.4.4.4	Schaltung entwerfen	105
4.4.4.5	Schaltplan erstellen	107
4.4.4.6	Layout erstellen	109
4.4.4.7	Prototyp erstellen	112
4.4.5	Fertigungsprozess ausarbeiten	113
4.4.5.1	Verträglichkeit und Machbarkeit prüfen..	114
4.4.5.2	Fertigungsprozesskette ausarbeiten	115
4.4.5.3	Prüfverfahren auswählen	117
4.4.6	Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten	117
4.4.6.1	Verträglichkeit und Machbarkeit prüfen..	118
4.4.6.2	AVT-Prozesskette ausarbeiten	119
4.4.6.3	Prüfverfahren auswählen	121
4.5	Konzeption einer Wissensbasis	121
4.5.1	Das Anwendungsszenario der MID-Wissensbasis .	121
4.5.2	Anforderungen an die MID-Wissensbasis	122
4.5.3	Inhalte der MID-Wissensbasis	123
4.5.4	Verknüpfungen zwischen den Wissenselementen..	125
4.5.5	Abfragemöglichkeiten der MID-Wissensbasis	126
4.5.6	Auswahl des MID-Verfahrens	127
	Bewertung der Systematik an den Anforderungen	128
5	Zusammenfassung und Ausblick	131
6	Abkürzungsverzeichnis	133
7	Literaturverzeichnis	135

Anhang

A1 Methoden zur Anforderungsanalyse.....	A1
A1.1 Schwachstellen-Analyse	1
A1.2 Fokusgruppeninterview	1
A2 Methoden zur Lösungsfindung	A3
A2.1 Funktionsmodellierung	3
A2.2 Konstruktionskataloge	3
A2.3 Morphologischer Kasten.....	4
A3 Methoden zur Gestaltung.....	A7
A3.1 Gestaltungsprinzipien.....	7
A3.2 Systematische Variation der Gestalt	8
A3.3 Numerische Simulation	9
A4 Methoden zur Arbeitsplanung	A11
A4.1 Vorranggraphen	11
A4.2 Kapazitätsplanung mit Kapazitätsfeldern	12

1 Einleitung

1.1 Problematik

Globalisierte Märkte, steigende Kundenansprüche, technologischer Wandel und kürzere Produktlebenszyklen bedeuten für den Maschinenbau und verwandten Branchen wie der Automobilindustrie eine verschärfte Wettbewerbssituation. Allein durch Kostensenkungen lässt sich diese Situation nicht bewältigen. Die Unternehmen sind gezwungen, sich mit Produktinnovationen gegenüber Wettbewerbern zu differenzieren. Viel versprechende Möglichkeiten für Produktinnovationen bieten mechatronische Systeme.

Mechatronische Systeme entstehen aus dem symbiotischen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Softwaretechnik und ggf. neuen Werkstoffen. Durch dieses Zusammenwirken können Erzeugnisse einfacher, flexibler und kostengünstiger realisiert werden. Die Gründe für das große Innovationspotential mechatronischer Systeme liegen einerseits in der **funktionalen Integration** von mechanischen und elektronischen Komponenten (z.B. bei der Regelung eines aktiven Fahrwerks), andererseits in der **räumlichen Integration** von mechanischen und elektronischen Komponenten zu einer baulichen Einheit [VDI2206, S. 20]. Der Erfolgsfaktor bei der räumlichen Integration liegt in der hohen Funktionsdichte auf kleinem Bauraum und der damit einhergehenden Miniaturisierung. Bei solchen Systemen stehen die Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) im Vordergrund [GF06, S. 4]. Eine dieser Techniken ist die Technologie MID (Molded Interconnect Devices).

Die **Technologie MID** ermöglicht die Integration von elektronischen Funktionsträgern in mechanische Baugruppen. MID-Teile sind räumliche Spritzgussteile, deren Oberfläche selektiv metallisiert werden kann. Dadurch können Leiterbahnen, Antennen und Sensoren direkt auf einen räumlichen Schaltungsträger gebracht werden [For04, S. 1]. Planare Schaltungsträger (Leiterplatten) lassen sich so durch räumliche ersetzen. Die wesentlichen Vorteile der Technologie MID sind:

- hohe Gestaltungsfreiheit,
- höhere Funktionalität,
- geringere Teilezahl,
- höhere Zuverlässigkeit und
- geringere Herstellkosten [For04, S. 1].

Dies lässt sich anhand von Serienanwendungen belegen: Ein Beispiel ist ein Hörgerät aus der Medizintechnik. Die hohe Gestaltungsfreiheit ermöglichte ein ergonomisches und miniaturisiertes Bauteil, gleichzeitig fielen Schnittstellen und Bauteile weg, so dass die Zuverlässigkeit verbessert wurde [Ern05, S. 2]. Ein anderes Beispiel ist eine RFID-Antenne mit integriertem Funkreflektor, die im Gegensatz zu herkömmlichen Antennen auch auf metallischen oder flüssigkeitsgefüllten Transportbehältern eingesetzt werden kann. Hier konnte die Funktionalität entscheidend verbessert werden [Heh06, S. 1940].

Das Nutzenpotential der Technologie MID ist offensichtlich, dennoch konnte sie sich bisher nicht nachhaltig durchsetzen. So wurden bis 2005 in Deutschland lediglich 35 Serienteile auf den Markt gebracht [GP06, S. 28f], im gleichen Jahr betrug das Marktvolumen in Deutschland gerade mal rund 14,1 Mio. Euro [GP06, S. 16]. Die Gründe dafür liegen in den zahlreichen Barrieren, die die weitere Verbreitung der Technologie MID behindern und insbesondere die Entwicklung von MID-Teilen zu einer Herausforderung machen. Die wesentlichen Barrieren sind die Komplexität der MID-Teile, hervorgerufen durch die hohe Funktionsdichte und die Interdisziplinarität der Entwicklungsaufgabe, und Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und der Fertigung, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen [For04, S. 2], [GP06, S. 46f].

Diese Problematik führt zu der Notwendigkeit, die Entwicklung von MID-Teilen methodisch zu unterstützen. Der geeignete Ansatzpunkt liegt in einem Vorgehensmodell, das als Leitfaden für die Entwickler dient. Dieses Vorgehen muss die zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem beinhalten. Weiterhin fehlen den Entwicklern Methoden und Richtlinien. Insgesamt bedarf es einer Systematik, die den Entwicklungsprozess strukturiert und darin Methoden und Richtlinien einordnet.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik für die Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID*. Sie soll dazu beitragen, die vorhandenen Barrieren der Technologie MID zu überwinden.

Die Systematik soll – ausgehend vom Entwicklungsauftrag – den gesamten Entwicklungsprozess strukturieren und beschreiben. Dies umfasst sowohl die Entwicklung des Produkts als auch des Produktionssystems, da hier starke Abhängigkeiten bestehen. Als Resultat liegen die detaillierten Spezifikationen des MID-Produkts und des dazugehörigen Fertigungssystems vor.

Zu den einzelnen Prozessschritten werden Methoden der Produktentwicklung ebenso wie Richtlinien und Normen empfohlen. Zu beachtende Wechselwirkungen in Form von Restriktionen sind an entsprechender Stelle aufzuführen.

1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird die oben geschilderte Problematik näher erläutert. Dazu wird zunächst der Kontext der Mechatronik näher charakterisiert und Baugruppen in der Technologie MID in die Klassen mechatronischer Systeme eingeordnet. Anschließend wird die Technologie MID vorgestellt. Neben verschiedenen MID-Verfahren werden die Potentiale und Barrieren eingehender beschrieben. Es folgen Grundlagen zur Entwicklung mechanischer und elektronischer Baugruppen. Vor diesem Hintergrund werden die Anforderungen an die zu erarbeitende Systematik abgeleitet.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Es werden dabei sowohl Systematiken zur Mechatronik-Entwicklung als auch MID-spezifische Methoden und Werkzeuge untersucht. Darüber hinaus werden Spezifikationstechniken für Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen vorgestellt. Die untersuchten Systematiken, Methoden und Werkzeuge werden anhand der ermittelten Anforderungen bewertet.

In **Kapitel 4** wird die *Systematik für die Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* vorgestellt. Diese wird am Beispiel eines Miniaturroboters validiert, der zunächst erläutert wird. Danach wird ein Überblick über die Systematik gegeben. Die Systematik, bestehend aus Generischem Vorgehensmodell, Spezifischem Vorgehensmodell und dem Konzept einer Wissensbasis, wird in den Kapiteln 4.3 bis 4.5 erläutert. Abschließend wird die Systematik anhand der Anforderungen aus Kapitel 2 beurteilt.

Eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten werden in **Kapitel 5** gegeben. Der **Anhang** umfasst Kurzbeschreibungen zu den in der Systematik empfohlenen Methoden.

2 Problemanalyse

Ziel des Kapitels Problemanalyse sind Anforderungen an eine *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID*. Zu diesem Zweck werden in Kapitel 2.1 wichtige Begriffe erläutert. Danach werden in Kapitel 2.2 mechatronische Systeme charakterisiert, um in Kapitel 2.3 näher auf die Technologie MID einzugehen. Darin werden insbesondere die Potentiale und Barrieren der Technologie MID erläutert. In Kapitel 2.4 wird auf die Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen und deren Herausforderungen näher eingegangen. Diese betreffen sowohl die Produkt- als auch die Produktionssystementwicklung. In Kapitel 2.5 erfolgt eine Problemabgrenzung. Daraus ergeben sich in Kapitel 2.6 die Anforderungen an die Systematik.

2.1 Einordnung und Begriffsdefinitionen

Ziel dieser Arbeit ist eine Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Das Brockhaus-Lexikon definiert eine **Systematik** als eine

„einheitliche Darstellung und Gliederung nach sachlichen und logischen Gesichtspunkten.“ [Bro03, S. 1942]

Im Rahmen dieser Arbeit bedeutet das eine Strukturierung und Darstellung des Entwicklungsprozesses mechatronischer Systeme. Darüber hinaus werden nach sachlichen Gesichtspunkten wie verschiedenen MID-Verfahren weitere Hilfsmittel wie Methoden und Richtlinien in diese Struktur eingeordnet.

Während eines Entwicklungsprozesses werden von den Entwicklern Methoden, Richtlinien und Spezifikationstechniken eingesetzt. Diese werden daher im Folgenden erläutert.

Eine **Methode** ist eine Menge von Vorschriften, deren Ausführung den Vollzug einer als zweckmäßig erachteten Operationsfolge unter den gegebenen Bedingungen hinreichend sicherstellt [Mül90, S.17]. Der Duden definiert die Methode die Art und Weise des Vorgehens [Dud04, S. 648].

Eine **Richtlinie** ist eine richtungsweisende, praktische Arbeitsunterlage. Mit ihren Beurteilungs- und Bewertungskriterien gibt sie fundierte Entscheidungshilfen und bildet einen Maßstab für einwandfreies technisches Vorgehen. Damit gibt sie Fachleuten die Sicherheit, sich an einer anerkannten Regel der Technik zu orientieren und danach zu handeln [VDI1000, S. 4].

Spezifikationstechniken dienen zur Erarbeitung, Beschreibung und Dokumentation von Entwicklungsergebnissen. Sie bestehen aus Zeichen und Symbolen sowie Regeln über deren Verwendung. Spezifikationstechniken können umgangssprachlich, formal und semiformal sein. Umgangssprachliche Spezifika-

tionstechniken sind unpräzise und interpretierbar (z.B. Texte oder Handskizzen). Formale Spezifikationstechniken können von Computern verarbeitet werden und sind folglich sehr präzise und nicht interpretierbar. Ein Beispiel ist die Netzplantechnik. Semiformale Spezifikationstechniken lassen sich dazwischen einordnen: Sie sind weder so präzise wie formale noch so interpretierbar wie umgangssprachliche Spezifikationstechniken. Beispiele sind technische Zeichnungen oder Hydraulikschaltpläne. [Fra06, S. 8]

Zur hier erarbeiteten Systematik gehört auch das Konzept einer **Wissensbasis**. Eine Wissensbasis ist ein Teil eines Expertensystems. Gespeicherte Informationen können nach Lösungen für bestimmte Probleme durchsucht werden. Dazu müssen diese sorgfältig strukturiert sein. Die Aufgaben einer Wissensbasis bestehen darin, Wissen anderer Personen zu sammeln, zu verknüpfen, leicht auffindbar zu machen und darzustellen. [Ame02, S. 15]

2.2 Mechatronische Systeme

Der Einzug der Informationstechnik in ehemals rein mechanische Systeme hat zu einer neuen Klasse von Produkten geführt – den mechatronischen Systemen. Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik. 1969 prägte der Japaner Ko Kikuchi diesen Begriff. Er verstand darunter die Funktionserweiterung mechanischer Komponenten durch Elektronik. [HTF96, S. 1] Seitdem hat sich die Definition von Mechatronik mehrfach gewandelt. Allen Definitionen gemeinsam ist das synergetische Zusammenwirken verschiedener Domänen. Dazu zählen die Mechanik und Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik sowie ggf. neue Werkstoffe. [GF06, S. 3f], [Ise99, S. 2], [Lin05, S. 7] Die VDI-Richtlinie 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* definiert:

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

Das Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen eröffnet neue Erfolgspotentiale für die Gestaltung neuer Produkte und Anwendungen. Diese lassen sich in vier Bereiche gliedern [Möh04, S. 6]:

- Funktions- und Verhaltensverbesserung technischer Systeme,
- Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten,
- neue Funktionen und Anwendungen sowie
- „intelligente“, selbstoptimierende Systeme.

2.2.1 Klassen mechatronischer Systeme

Mechatronische Systeme umfassen eine große Bandbreite. GAUSEMEIER unterteilt mechatronische Systeme in zwei Klassen. Klasse 1 enthält Systeme, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen. Mechatronische Systeme der Klasse 2 sind Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten (siehe Bild 2-1) [GR05, S. 549], [KFG06, S. 36].

Ziel der Klasse 1 ist die Integration einer möglichst hohen Anzahl mechanischer und elektronischer Funktionsträger auf kleinem Bauraum. Das wesentliche Potential der Integration liegt dabei in der Miniaturisierung, den geringeren Herstellkosten und der höheren Zuverlässigkeit. Die Aufbau- und Verbindungstechnik steht hier im Vordergrund. Besonderes Merkmal sind die starken Abhängigkeiten zwischen Produkt und dem dazugehörigen Produktionssystem. Das geht soweit, dass das Produktkonzept bereits von den Fertigungstechnologien determiniert wird. Dies führt zu der Notwendigkeit, Produkt und Produktionssystem parallel und integrativ zu entwickeln. [GF06, S. 3f]

Ziel von Klasse 2 ist die Verbesserung des Bewegungsverhaltens von Mehrkörpersystemen. Dazu erfassen Sensoren Informationen über die Umgebung, aber auch über das System selbst. Anschließend werden diese Informationen mit Mikroprozessoren verarbeitet und Steuerbefehle für Aktoren erzeugt. Die Aktoren wirken dann auf das Mehrkörpersystem. Zentrale Aufgabe bei der Entwicklung von Systemen der Klasse 2 ist die Regelungstechnik. [GF06, S. 3]

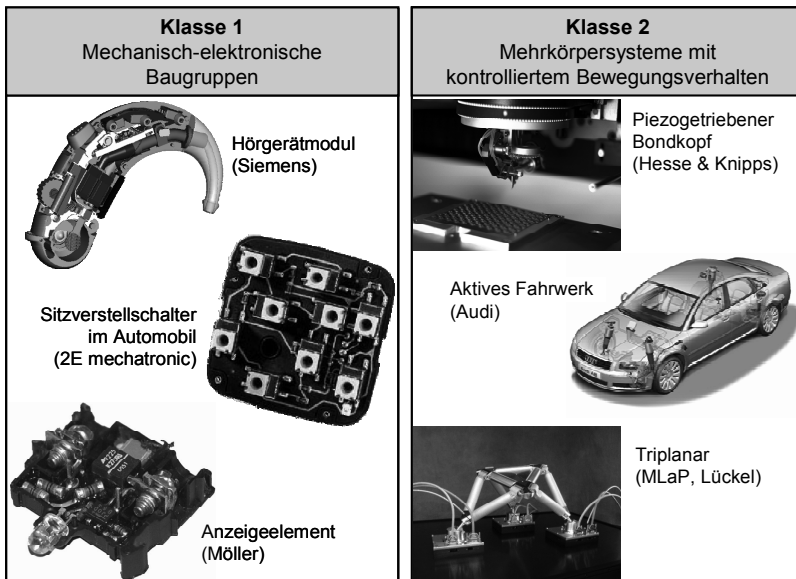
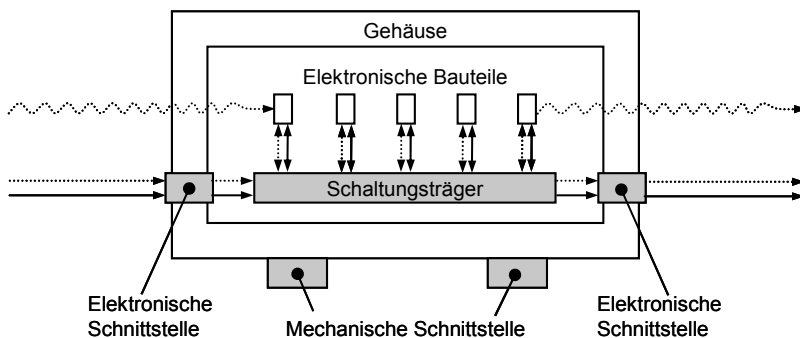


Bild 2-1: Klassen mechatronischer Systeme

Diese Arbeit befasst sich mit der ersten Klasse mechatronischer Systeme. Anwendungen dieser Klasse werden auch als mechanisch-elektronische Baugruppen bezeichnet. Sie sind in der Regel statische Systeme und bestehen aus einem Gehäuse, in das elektronische, optische und akustische Bauteile integriert sind [GF06, S. 17]. Ein Beispiel ist das Hörgerätmodul aus der Medizintechnik (Bild 2-1 links oben). Es integriert Mikrofone, Lautsprecher, Batterien, Prozessoren, Antennen und Schalter auf kleinstem Bauraum. Durch die spezielle Anordnung der Mikrofone und der Funkkommunikation zwischen den Hörgeräten verbessern diese Hörgeräte das räumliche Hören und den Orientierungssinn. Die exakte Positionierung der Bauteile bei gleichzeitiger elektrischer Kontaktierung dabei ist die wesentliche Herausforderung. [Ern05, S. 1ff], [Sau02, S. 110ff] Ein weiteres Beispiel ist das LED-Anzeigenelement (Bild 2-1 links unten). Ursprünglich mit einer herkömmlichen Glühlampe ausgestattet, wurde diese durch eine LED ersetzt, wobei die dafür benötigte Elektronik ins Gehäuse integriert wurde. Hier lagen die Herausforderungen in der Miniaturisierung, Energieeffizienz und Kosteneinsparung. Zwischen 2000 und 2005 wurden 13 Millionen Anzeigenelemente produziert; die Produktion läuft auch künftig weiter [Mau05, S.493].

2.2.2 Grundstruktur mechanisch-elektronischer Baugruppen

Die genannten Beispiele zeigen die vielfältigen Funktionen von mechanisch-elektronischen Baugruppen. Trotzdem besitzen sie in der Regel die gleichen Komponenten: ein Gehäuse, einen Schaltungsträger, elektrische/elektronische/elektromechanische Bauteile (z.B. Sicherung, Transistor, Relais) sowie elektrische und mechanische Schnittstellen (z.B. Stecker, Schraubverbindung). Bild 2-2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau solcher Systeme.



Legende:

.....> Informationsfluss (leitungsgebunden) —> Energiefluss

.....> Informationsfluss (drahtlos)

Bild 2-2: Grundstruktur mechanisch-elektronischer Baugruppen [Pei08, S. 9]

Gehäuse: Das Gehäuse dient als Tragstruktur. Zusätzlich schützt es die enthaltenen Bauteile vor schädigenden Umwelteinflüssen wie Staub, Feuchtigkeit, Berührung und Stößen. [GF06, S. 81f]

Schaltungsträger: Auf dem Schaltungsträger sind die elektronischen Bauteile befestigt. Hauptfunktion ist die elektrische Verbindung der Bauteile untereinander. Sie lassen sich in starre, flexible und starrflexible Schaltungsträger einteilen [Sch99, S. 15], [Han94, S. 31]. Starre Schaltungsträger verbessern darüber hinaus die mechanische Stabilität der Baugruppe.

Elektronische Bauteile: Elektronische Bauteile dienen der Informationsverarbeitung. Sie unterscheiden sich in aktive und passive Bauteile. Aktive Bauteile beeinflussen den Strom in Form einer Verstärkung oder Schaltung (z.B. Operationsverstärker, Transistoren). Passive Bauteile beeinflussen den Strom durch ihre Eigenschaften z.B. ihren Widerstand. Weitere passive Bauteile sind Kondensatoren, Induktivitäten und Trimmer. [Sch99, S. 29ff]

Schnittstellen: Schnittstellen werden für die elektrische und mechanische Verbindung zu Nachbarbaugruppen benötigt [Wat06, S. 14].

Mechanische und elektronische Bauteile werden über Flussbeziehungen miteinander verknüpft. PAHL/BEITZ unterteilen diese in Energie-, Stoff- und Informationsflüsse. [PB07, S. 43]

- **Energiefluss:** Als Energiefluss zählt jegliche Art von Energie, z.B. mechanische, elektrische oder thermische Energie mit den dazugehörigen Größen wie Kraft oder Strom.
- **Stofffluss:** Stoffflüsse beziehen sich auf den Transport von Gasen, Flüssigkeiten oder festen Körpern. Die Kühlung von elektronischen Bauteilen durch Luftzufuhr stellt beispielsweise einen Stofffluss dar.
- **Informationsfluss:** Damit sind Informationen gemeint, die zwischen den elektronischen Bauteilen ausgetauscht werden wie z.B. Messgrößen, Steuerimpulse etc. Es werden drahtgebundene (z.B. über Kabel) und drahtlose Informationsübertragung (z.B. Funk, Licht) unterschieden. [Con01, S. 18]

Bei mechanisch-elektronischen Baugruppen stehen die Informationsflüsse im Vordergrund. Sie gelangen als Eingangsinformationen in die Baugruppe, werden dort von der Elektronik verarbeitet und verlassen die Baugruppe als Ausgangsinformationen. Über Schnittstellen werden sie von oder zu anderen Baugruppen geleitet. Energieflüsse müssen ebenfalls berücksichtigt werden, während Stoffflüsse eine untergeordnete Rolle spielen.

2.2.3 Differential- und Integralbauweise

Je nach Zielstellung kann der Aufbau mechanisch-elektronischer Baugruppen unterschiedlich erfolgen. Stehen Flexibilität und Kostensenkung im Vordergrund werden die Baugruppen aus mehreren, meistens standardisierten Einzelteilen gefertigt und anschließend montiert. Liegt der Fokus auf Miniaturisierung, werden anwendungsspezifische Bauteile mit hohem Funktionsumfang verwendet. Die Konstruktionslehre unterscheidet daher die *Differential-* und die *Integralbauweise*. [PB07, S. 447ff]

Bei der **Differentialbauweise** wird ein Bauteil in mehrere, einfacher zu fertigende Werkstücke aufgeteilt und diese anschließend gefügt. Im Falle einer Reparatur ist die Differentialbauweise günstiger, da nur die beschädigten Teile ausgetauscht werden müssen. Die Differentialbauweise wird daher meistens bei der Einzelfertigung oder bei sehr großen Bauteilen verwendet. Ihr größter Nachteil ist der hohe Montageaufwand. [Ehr07, 474ff], [PB07, S. 447ff] Die Baugruppe in Bild 2-3 (links) ist in Differentialbauweise ausgeführt.

Bei der **Integralbauweise** werden verschiedene Bauteile zu einem zusammengefasst, welches dann den gleichen Funktionsumfang besitzt. Dabei reduziert sich die Zahl der Teile und der Fügstellen, was sich positiv auf die Produktqualität auswirkt. Die Integralbauweise ermöglicht eine kompaktere Bauform, macht das Bauteil in der Regel aber auch komplexer. Sie wird daher meist bei seriengefertigten Baugruppen eingesetzt. Durch die hohe Stückzahl können trotz höherer Fixkosten (aufwändige Werkzeuge und schwierigere Beschaffung) Kosteneinsparungen erzielt werden, da umfangreiche Montageschritte entfallen. Ausschuss aufgrund von Bearbeitungsfehlern ist allerdings sehr teuer, weil das ganze Bauteil verworfen werden muss. [Ehr07, S. 474f], [PB07, S. 450] Die Baugruppe in Bild 2-3 (rechts) ist in Integralbauweise ausgeführt.

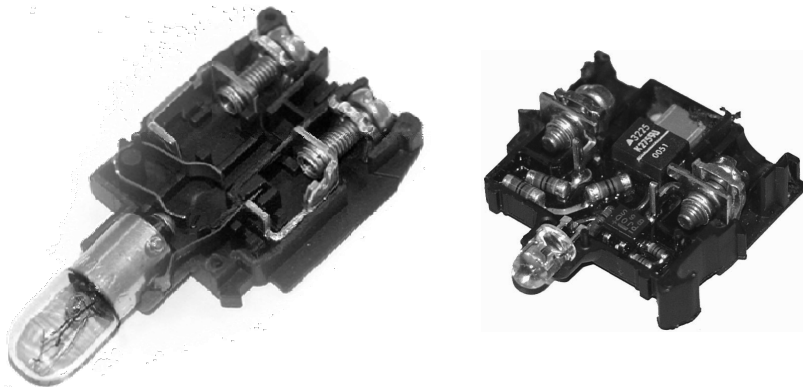


Bild 2-3: *Differentialbauweise (links) und Integralbauweise (rechts) einer mechanisch-elektronischen Baugruppe [Möller]*

2.3 Die Technologie MID

Die Technologie MID (Molded Interconnect Devices) ist eine Technologie zur Integralbauweise und ermöglicht neue Lösungen und Funktionen für mechanisch-elektronische Baugruppen. Sie ist Gegenstand dieses Kapitels. Das Prinzip und die Eigenschaften der Technologie MID werden in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Kapitel 2.3.2 erläutert die etablierten Herstellverfahren und einige viel versprechende neue Ansätze. Verschiedene Verfahren zur Montage- und Verbindungstechnik von elektronischen Bauteilen werden in Kapitel 2.3.3 vorgestellt. In den Kapiteln 2.3.4 und 2.3.5 werden sowohl die Potentiale als auch die Barrieren der Technologie MID beschrieben.

2.3.1 Beschreibung der Technologie MID

MID-Teile sind räumliche Spritzgussteile, die elektronische und mechanische Funktionen integrieren. Dabei wird die Oberfläche der dreidimensionalen Kunststoffteile partiell metallisiert. So entstehen Leiterbahnen und Kontakte, die anschließend mit elektronischen Bauteilen bestückt werden können. Die Metallisierungen lassen sich aber auch so gestalten, dass sie als Antennen, Schirmungen oder Sensoren genutzt werden können. Darüber hinaus bietet die Technologie MID eine hohe räumliche Gestaltungsfreiheit, weil prinzipiell die ganze Oberfläche des Kunststoffteils als Schaltungsträger Verwendung finden kann. Mechanische Funktionen wie „Kraft übertragen“ werden durch die Form des Kunststoffteils realisiert, z.B. in Form von Schnappverbindungen. Das Kunststoffteil vereint dann mechanische und elektrische Funktionen in einem Bauteil. [For04, S. 1], [FSW04, S. 3], [GBP03, S. 17], [Pei08, S. 13]

Bild 2-4 zeigt die Skizze des MID-Gehäuses eines Miniaturroboters. Leiterbahnen verbinden elektronische Bauteile, Kontaktflächen übertragen Signal- und Energieflüsse. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Kapitel 4.1.

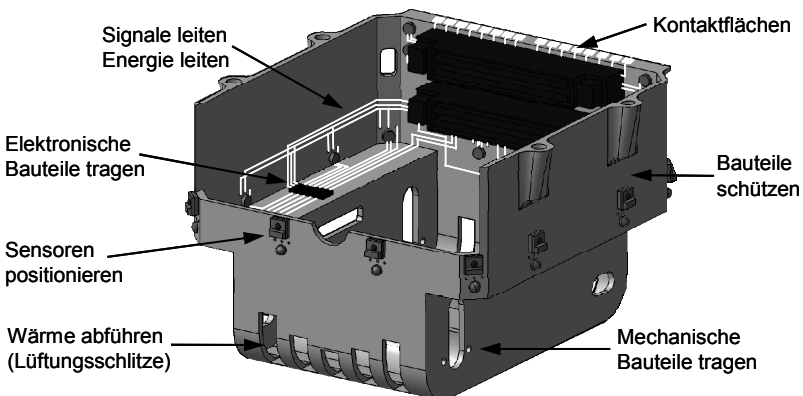


Bild 2-4: Funktionsintegration in ein Gehäuse durch MID

Das Miniaturroboter-Gehäuse zeigt, dass die Technologie MID eine Reihe mechanischer und elektrischer Funktionen erfüllt. PEITZ hat daraus generische Funktionen erzeugt, die er als *MID-Funktionen* bezeichnet. Insgesamt definiert er fünf elektrische und vier mechanische MID-Funktionen [Pei08, S. 15].

Elektrische MID-Funktionen sind:

- **Elektrische Energie leiten:** Metallisierungen auf dem Schaltungsträger können als Leiterbahnen ausgeführt sein.
- **Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren:** Elektrische Steckverbinder können in das MID-Teil integriert werden.
- **Elektronische Bauteile kontaktieren (AVT):** Elektronische Bauteile werden durch Aufbau- und Verbindungstechniken elektronisch mit dem Schaltungsträger kontaktiert.
- **Vor elektromagnetischen Feldern schirmen:** Metallisierte Flächen können als Schirmung vor elektrischen Feldern dienen.
- **Vor hohen Strömen sichern:** Die Leiterbahnen können als elektrische Sicherung oder Widerstand dienen und vor hohen Strömen schützen.

Mechanische MID-Funktionen sind:

- **Bauteile tragen:** Die Gestaltungsfreiheit bei MID-Teilen eröffnet neue Wege für die Positionierung elektronischer und mechanischer Bauteile.
- **Kraft übertragen:** Über die Gestalt des Schaltungsträgers kann mechanische Energie übertragen werden.
- **Vor Umwelteinflüssen schützen:** Die Gestalt des Schaltungsträgers kann als Gehäuse ausgeführt sein.
- **Thermische Energie leiten:** Über metallisierte Flächen kann thermische Energie aus kritischen Bereichen des Schaltungsträgers abgeleitet werden.

Prägendes Merkmal der Technologie MID sind die zahlreichen Verfahren zur Herstellung des MID-Schaltungsträgers. Zu den etablierten MID-Verfahren zählen der Zweikomponentenspritzguss, die Laserstrukturierung und das Heißprägen. [For04, S. 149f] Neuere Verfahrensentwicklungen sind das FLAME-CON- sowie das M³D-Verfahren. [HKR+07, S. 525ff], [SD07, S. 321f] Alle Herstellverfahren orientieren sich am übergeordneten Referenzprozess MID [GBP03, S. 29f], [GF06, S. 86], [Pei08, S. 16]. Dieser umfasst drei Prozessstufen zur Herstellung des MID-Schaltungsträgers und zwei Prozessstufen der Aufbau- und Verbindungstechnik (Bild 2-5). Für jede Prozessstufe existieren verschiedene Technologien, die kurz charakterisiert werden.

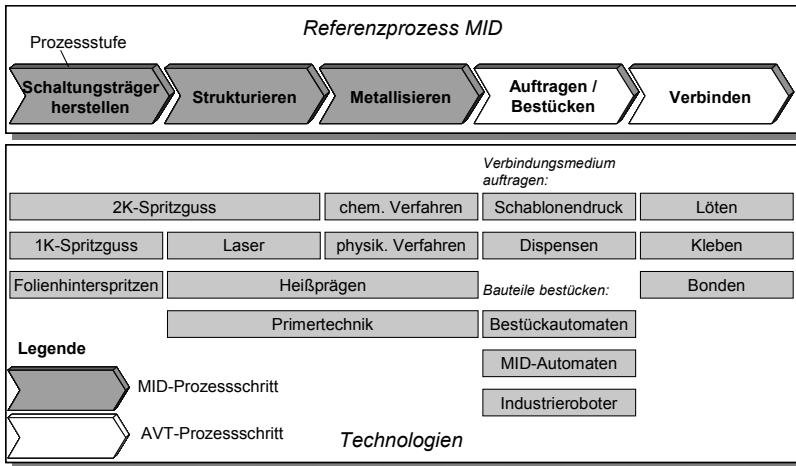


Bild 2-5: Referenzprozess MID [Pei08, S. 16]

Zur **Herstellung des Schaltungsträgers** gibt es die Technologien 1K- und 2K-Spritzguss sowie das Folienhinterspritzen. Beim *1K-Spritzguss* wird lediglich der Schaltungsträger hergestellt. Die Herstellung des Leiterbahnlayouts erfolgt durch separate Technologien in den nachfolgenden Prozessstufen. Beim *2K-Spritzguss* werden zwei verschiedene Kunststofftypen kombiniert. Einer ist metallisierbar, der andere nicht. Dadurch kann das Leiterbahnbild direkt in den Schaltungsträger „eingespritzt“ werden. Bei der Technologie *Folienhinterspritzen* wird eine zuvor strukturierte und metallisierte Folie durch Hinterspritzen mit Kunststoff mechanisch verstärkt. [FG06, S. 82ff], [FK04, S. 18ff], [For04, S. 153ff], [GBP03, S. 30]

Beim **Strukturieren** wird das Leiterbahnlayout auf dem Schaltungsträger erzeugt. Beim *2K-Spritzguss* wird das Leiterbahnlayout bereits beim Spritzgießen erzeugt. Bei der *Laserdirektstrukturierung LDS* (auch: additives Laserverfahren) werden dem Kunststoff Füllstoffe hinzugefügt, die durch den Laser für die spätere Metallisierung chemisch aktiviert werden. Beim *subtraktiven Laserverfahren* wird zuerst die gesamte Oberfläche des Kunststoffteils metallisiert, die anschließend durch den Laser strukturiert und dann abgetragen wird (direkt durch den Laser oder chemisch). Bei der *Primertechnik* werden lackähnliche, metallisierbare Pasten auf das Spritzgussteil „aufgedruckt“ und dann chemisch metallisiert. Beim *Heißprägen* wird eine metallbeschichtete Folie mit einem Prägestempel auf den Schaltungsträger aufgespresst und mit diesem verschmolzen. Strukturierung und Metallisierung erfolgen dabei in einem Schritt. [GBP03, S. 32], [GF06, S. 85ff], [FK04, S. 18ff], [For04, S. 153ff]

Das **Metallisieren** der Spritzgussteile kann über chemische oder physikalische Verfahren erfolgen. Bei der *chemischen Metallisierung* werden die Kunststoffteile in ein galvanisches Bad (wässrige Lösung von Metallionen) getaucht. Die Metallionen scheiden sich auf den Kunststoffteilen ab. Stromzufuhr beschleunigt diesen Prozess. Bei der *physikalischen Metallisierung* wird die Metallschicht durch Bedampfen erzeugt. [GBP03, S. 31], [GF06, S. 85ff], [FK04, S. 18ff], [For04, S. 153ff]

Das Aufbringen von Elektronik geschieht in der Regel durch **Auftragen** eines Verbindungsmediums (Lot oder Leitkleber), **Bestücken** der elektronischen Bauteile und anschließendem **Verbinden** von Schaltungsträger und Bauteil (durch Löten, Bonden oder Aushärten des Klebers). [Sch99, S. 95ff]

Werden die verschiedenen Technologien zur Schaltungsträgerherstellung, Strukturierung und Metallisierung miteinander kombiniert, ergeben sich Technologieketten, die als MID-Verfahren bezeichnet werden. Auf die wesentlichen MID-Verfahren und Aufbau- und Verbindungstechniken gehen die nächsten Kapitel (Kapitel 2.3.2 und Kapitel 2.3.3) detaillierter ein.

2.3.2 MID-Verfahren

In diesem Kapitel werden die etablierten MID-Verfahren und einige neue Ansätze beschrieben. Ferner werden deren Vor- und Nachteile erläutert.

Laserdirektstrukturierung LDS

Bei der *Laserdirektstrukturierung* wird der Schaltungsträger im Einkomponentenspritzguss hergestellt. Dabei ist der Kunststoff mit Paladium dotiert, das bei der Strukturierung von einem Laserstrahl freigelegt und damit chemisch aktiviert wird. Auf den aktivierten Stellen lagert sich im anschließenden Galvanikbad Kupfer ab. Die Schichtdicke hängt von der Dauer der Galvanisierung ab. Eventuell erfolgt eine Oberflächenveredelung mit Nickel und/oder Gold. Bild 2-6 zeigt die Prozesskette der Laserdirektstrukturierung LDS, eingeordnet am Referenzprozess MID.

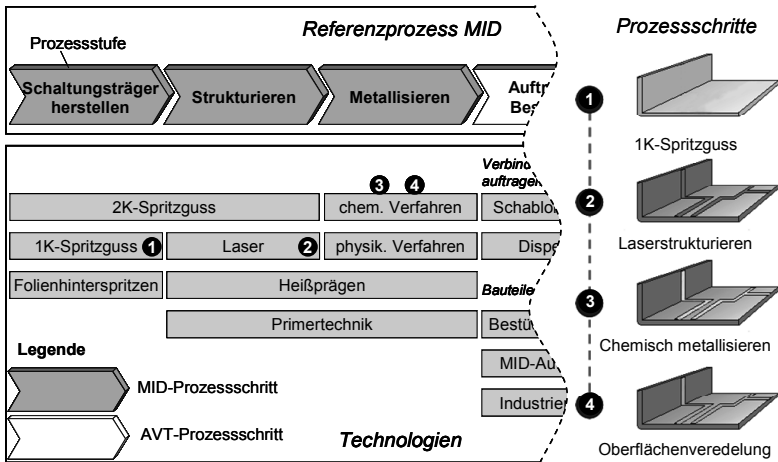


Bild 2-6: Prozessschritte bei der Laserdirektstrukturierung LDS

Der große Vorteil der Laserdirektstrukturierung ist der geringe Änderungsaufwand bei der Leiterbahnstrukturierung. Durch Änderung des Laser-Steuerungsprogramms kann das Layout sehr schnell und einfach angepasst werden. Dadurch können Varianten in Losgröße 1 hergestellt werden. Auch ist die Prozesskette vergleichsweise kurz. Nachteilig ist die eingeschränkte räumliche Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen. Diese wird durch die Freiheitsgrade der Laseranlage eingeschränkt. Sie ist im Vergleich zu anderen MID-Verfahren nur als mittel einzustufen. [FK04, S. 21], [For04, S. 180], [GBP03, S. 39f]

Zweikomponentenspritzguss

Beim Zweikomponentenspritzguss wird der Schaltungsträger aus zwei verschiedenen Kunststofftypen hergestellt. Dabei ist ein Kunststoff metallisierbar und der andere nicht. Durch die Form der Werkzeuge wird die Leiterbahnstruktur beim Spritzguss erzeugt. Es werden zwei Verfahrensvarianten unterschieden. Beim PCK-Verfahren (**P**rinted **C**ircuit **B**oard **K**ollmorgen) erfolgen die beiden Spritzguss-Schüsse direkt nacheinander in ein oder zwei Werkzeuge. Anschließend werden die Leiterbahnen chemisch metallisiert. Beim SKW-Verfahren (**S**ankyo **K**asei **W**iring Board) wird zuerst die metallisierbare Komponente gespritzt, chemisch katalysiert und anschließend mit der zweiten Komponente umspritzt. Hinterher erfolgt ebenfalls eine chemische Metallisierung.

Der wesentliche Vorteil des Verfahrens ist die große räumliche Gestaltungsfreiheit. Leiterbahnbreiten und -querschnitte sind größer als bei anderen Verfahren, erlauben dann aber auch hohe Stromflüsse. Ein entscheidender Nachteil ist der beträchtliche Änderungsaufwand der Spritzgusswerkzeuge. Dies hat bisher dazu geführt, dass Anwendungen lediglich eine geringe Schaltungskomplexität aufweisen. [For04, S. 156], [GBP03, S. 37f], [PGE02, 159]

Heißprägen

Beim Heißprägen wird zunächst der Schaltungsträger im Einkomponenten-Verfahren spritzgegossen. Auf den Schaltungsträger wird eine metallisierte Kunststoffolie aufgebracht. Mit einem Prägestempel werden die Leiterbahnstrukturen auf dem Schaltungsträger abgebildet. Unter Hitze und Druck verbindet sich die Metallschicht mit dem Schaltungsträger. Nur in Ausnahmefällen müssen bei der Verarbeitung Klebstoffe eingesetzt werden. Zuletzt wird die Restfolie vom Bauteil abgezogen. Zurück bleibt die Leiterbahnstruktur.

Das Heißprägen benötigt keine nasschemische Metallisierung. Dadurch ist die Prozesskette sehr kurz, Kosten sparend und umweltschonend. Ein weiterer Vorteil sind die schnellen Taktzeiten des Verfahrens von ca. 1 Sekunde. Der Prägestempel ist einfach herzustellen und entsprechend einfach zu ändern. Durch verschiedene Folien können unterschiedliche Schichtdicken der Metallisierung bis zu 100 μm aufgebaut werden. Wesentlicher Nachteil ist die eingeschränkte Gestaltungsfreiheit. Die Geometrie des Schaltungsträgers wird durch den Prägestempel stark eingeschränkt. Der Verlauf der Leiterbahnen darf maximal eine Neigung von $\pm 45^\circ$ zur Prägebene betragen. Durchkontaktierungen sind nur mit Zusatzmaßnahmen realisierbar. [FK04, S. 18f], [For04, S. 163], [GBP03, S. 41f], [Poj02, S. 4]

FLAMECON

FLAMECON ist ein von dem internationalen Automobilzulieferer Leoni AG entwickeltes und patentiertes Verfahren zur automatisierten Aufbringung von metallischen Strukturen auf unterschiedliche Trägermaterialien, üblicherweise Kunststoff, aber auch Keramik. Der Schaltungsträger wird im Einkomponentenspritzguss hergestellt. Das aufzutragende Metall wird geschmolzen und mit Druck auf die Oberfläche des Schaltungsträgers aufgespritzt. Kleine Tropfen flüssigen Kupfers treffen auf die Oberfläche und erstarren dort. Gleichzeitig wird die Oberfläche lokal mittels Laser aufgeraut, um eine gute Haftbarkeit zu gewährleisten. So lassen sich Leiterbahnen mit einer Breite von 1 mm bis 10 mm erzeugen. Aufgrund der Porosität der Leiterbahnen ist der Leitwert von dem aufgetragenen Kupfer um 50% geringer als der Leitwert von massivem Kupfer. Dies kann durch eine Schichtdickenerhöhung kompensiert werden.

Das FLAMECON-Verfahren bietet drei wesentliche Vorteile: Das Verfahren ist sehr flexibel (einfache Anpassung des Leiterbahnlayouts durch NC-Programmierung), überträgt hohe Ströme und es kommt ohne nasschemische Prozesse aus. Die Gestaltungsfreiheit ist mit dem LDS-Verfahren vergleichbar. Es erlaubt eine wirtschaftliche Fertigung mit Losgröße 1. Nachteilig sind die sehr großen Leiterbahnbreiten und die poröse Metallisierung. Die FLAMECON-Technologie ist ein sehr junges Verfahren und befindet sich noch in der Entwicklung. [RG05, S. 73f], [SD07, S. 323]

Maskless Mesoscale Materials Deposition (M³D)

Auch mit dem M³D-Verfahren können unterschiedliche Substratwerkstoffe mit Metallstrukturen beschichtet werden. Der Schaltungsträger wird im Einkomponentenspritzguss hergestellt. Das beschichtende Metall befindet sich in einer tintenähnlichen Lösung. Ein Ultraschallgenerator zerstäubt diese Lösung zu einem Aerosol. Eine Düse fokussiert das Aerosol zu einem Strahl und besprüht damit den Schaltungsträger. Der Düsenkopf wird NC-gesteuert. Das Verfahren arbeitet berührungslos und kann Strukturen von 20 µm bis 10 mm Breite erzeugen. Abschließend wird die Lösung ausgehärtet. Die Leiterbahnen sind dann auch mechanisch fest. Das Verfahren ist seit dem Februar 2007 am Hahn-Schickard-Institut für Mikroaufbautechnik (HSG-IMAT) verfügbar.

Auch das M³D-Verfahren arbeitet masken- und chemielos, daher ist die Prozesskette kurz und umweltverträglich. Das Verfahren ist sehr flexibel und erlaubt die Fertigung in Losgröße 1. Die 3D-Gestaltungsfreiheit ist mit dem LDS-Verfahren vergleichbar. Die Strukturen können sehr fein und gleichzeitig variabel gestaltet werden, ebenso die Metallschichtdicke (5 µm bis 100 µm). Allerdings ist das Verfahren noch nicht serienreif. [HKR+07, 525ff]

2.3.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Herausforderung bei der Herstellung mechanisch-elektronischer Baugruppen allgemein und bei MID-Teilen im Besonderen ist die Bestückung und Kontaktierung der elektronischen Bauteile auf und mit dem Schaltungsträger. Die entsprechenden Technologien werden unter dem Begriff **Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT)** zusammengefasst [Han94, S. 15]. Im Folgenden wird daher ein Überblick über diese Technologien gegeben.

Aufbautechnik

Als Aufbautechnik gelten die verschiedenen Bauformen von Schaltungsträgern und elektronischen Bauteilen. [Sch99, S. 62ff] Schaltungsträger verbinden die elektronischen Bauteile elektrisch miteinander. Es existieren starre¹, flexible² und starrflexible³ Schaltungsträger [Han94, S. 124]. Räumliche Schaltungsträger in der Technologie MID zählen zu den starren Schaltungsträgern. Auf ihnen liegt der Fokus dieser Arbeit.

¹ Starre Leiterplatten (engl. PCB – Printed Circuit Board) bestehen aus verpressten glasfaserverstärkten Kunststoffschichten.

² Flexible Schaltungsträger sind kupferbeschichtete Kunststofffolien, die sehr dünn und verformbar sind.

³ Starrflexible Leiterplatten sind eingekerbte Leiterplatten, die an den Kerbstellen gebogen werden, ohne dass die Kupferschicht reißt.

Bei elektronischen Bauelementen werden drei grundsätzliche Bauformen unterschieden: die Through Hole Technology (THT), die Surface Mounted Technology (SMT) und Chip on Board (CoB) [Sch99, S. 64]. Bild 2-7 visualisiert die genannten Bauteilformen.

Bei der **Through Hole Technology (THT)** ragen aus dem Kunststoffgehäuse der Bauteile Drähte, die durch Löcher im Schaltungsträger gesteckt und auf der Rückseite verlötet (elektrisch und mechanisch kontaktiert) werden. Sie werden heuter immer seltener eingesetzt, da sie in der Dichte ihrer Anschlussdrähte begrenzt sind. [Hän06, S. 50f], [Sch99, S. 11]

Ihr Nachfolger sind elektronische Bauteile in der **Surface Mounted Technology (SMT)**. Sie werden als Surface Mounted Devices (SMD) bezeichnet. Ihre Anschlussbeine werden auf lötfähige Anschlussflächen auf der Oberfläche des Schaltungsträgers gelötet – daher der Name oberflächenmontiert (engl. surface mounted). Der Abstand ihrer Beinchen, als Pitch bezeichnet, ist wesentlich geringer als bei THT-Bauteilen. Das geht bis zum UltraFinePitch mit Beinabständen von 0,3 mm. Alternativ dazu werden elektronische Bauteile, insbesondere Chips, auch flächig kontaktiert. Diese Ball Grid Arrays (BGA) besitzen keine Beinchen mehr, sondern Kontaktflächen auf ihrer Unterseite in Form eines Schachbrettes. Über Lotkugeln, den Balls, werden die Anschluss-Flächen auf dem Schaltungsträger verlötet. Die Vorteile von SMD-Bauteilen liegen in der hohen Anschlussdichte, geringen Bauhöhe, rationeller Bestückung auf Vorder- und Rückseite des Schaltungsträgers und geringerem Gewicht. SMD-Bauteile machen daher 60% aller elektronischen Bauteile aus [Sch99, S. 12f].

Chip on Board (CoB) werden ebenfalls oberflächenmontiert, besitzen aber kein Gehäuse mehr. Daher bauen sie noch kleiner. Die „nackten“ Siliziumchips (bare die) werden mit hauchdünnen Drähten (Bonddrähte) oder Leitkleber mit dem Schaltungsträger verbunden und anschließend mit Kunststoff vergossen. [Sch99, S. 13] Es gibt eine Vielzahl an weiteren Sonder- und Mischbauformen (FlipChip, Chip Scale Package usw.), die hier nicht weiter behandelt werden.

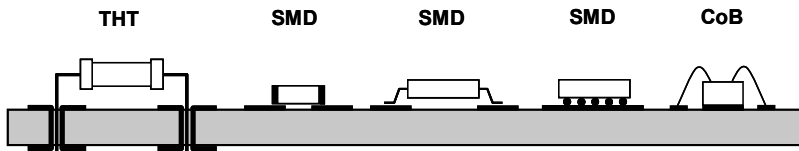


Bild 2-7: Bauformen elektronischer Bauteile [Sch99, S. 64]

Montagetechnik

Die Montagetechnik umfasst das Aufbringen der Verbindungsmedien wie Lot oder Leitkleber und Hilfsstoffe wie Flussmittel⁴ oder Schutzlack sowie das Bestücken der elektronischen Bauteile auf den Schaltungsträger [For04, S. 221]. Der Auftrag des Verbindungsmediums erfolgt entweder über den Schablonendruck oder das Dispensieren. Beim **Schablonendruck** wird eine gelochte Stahlschablone auf den Schaltungsträger gelegt. Die Löcher befinden sich über den Anschlussflächen. Das pastenartige Verbindungsmedium (z.B. Lotpaste) wird auf die Schablone gegossen und mit einer Rakel über die gesamte Fläche verteilt. Dabei werden alle Kontaktflächen gleichzeitig belotet. Beim **Dispensieren** erfolgt der Medienauftrag sequentiell. Ein Dispenser verfährt dabei über den Schaltungsträger und verteilt ähnlich einer Pipette eine kleine Menge des Mediums auf die Kontaktflächen. Dispenser besitzen höhere Freiheitsgrade als Schablonen, dadurch sind sie auch für räumliche Schaltungsträger geeignet. Ihre Auftragsgeschwindigkeit ist jedoch weitaus geringer als beim Schablonendruck. [For04, S. 221ff], [Sch99, S. 334ff] Ähnliches gilt für den Auftrag der Flussmittel und Schutzlacke.

Die Platzierung der Bauteile auf dem Schaltungsträger erfolgt entweder manuell, mit Bestückautomaten oder Industrierobotern. **Manuelle Bestückung** wird nur bei geringen Stückzahlen (Prototypen oder Nullserien) oder sehr großen, meist elektromechanischen Bauteilen eingesetzt, die nicht oder nur schwer automatisiert zu bestücken sind. **Bestückautomaten** sind am weitesten verbreitet. Es gibt sie in verschiedenen Bauformen (Pick-and-Place⁵, Revolver-Chip Shooter⁶ oder Kombinationen aus beiden Verfahren). Sie zeichnen sich durch eine hohe Bestückgenauigkeit und -leistung aus (mehr als 100.000 Bauteile/Stunde). Allerdings reichen die Freiheitsgrade nur für die Bestückung planarer Schaltungsträger. **Industrieroboter** haben die größten Freiheitsgrade bei der 3D-Bestückung. In ihrer Bestückgeschwindigkeit liegen sie aber wesentlich unter den Fähigkeiten von Bestückautomaten. [For04, S. 225ff], [Sch99, S. 93ff]

⁴ Flussmittel dienen zur Erzeugung einer reinen metallischen Oberfläche für eine einwandfreie Benetzung der Kontaktfläche mit Lot während des Lötens. Es beseitigt Verunreinigungen wie Oxid-, Sulfid- und Karbonatschichten und schützt vor erneuter Passivierung. [Sch99, S. 220]

⁵ Pick-and-Place-Anlagen nehmen ein Bauteil (pick), befördern es zur Bestückposition und setzen es auf dem Schaltungsträger ab (place). Pick-and-Place-Anlagen sind sehr flexibel und können alle Bauelementtypen bestücken. [Sch99, S. 94]

⁶ Chip-Shooter wurden speziell für hohe Bestückgeschwindigkeiten entwickelt. Sie bestehen aus einem „Bestückkarussell“ (Revolver) mit bis zu 120 Saugpipetten. Während der Rotation nehmen diese ein Bauteil, transportieren es zur Bestückposition und setzen es dort mit einem Luftstoß ab (shoot). [Sch99, S. 97]

Verbindungstechnik

Der Begriff Verbindungstechnik bezeichnet die elektrische und mechanische Verbindung zwischen elektronischem Bauteil und Schaltungsträger. Die Vielzahl an Verfahren wird in die Kategorien Löten, Leitleben, Bonden und Einpressen unterteilt. [Sch99, S. 159ff] Das Löten dominiert dabei u.a. wegen der mechanischen und elektrischen Qualität und Stabilität der Verbindung [Sch99, S. 159]. Beim **Löten** wird mit Hilfe eines Zusatzwerkstoffs (Lot) eine stoffschlüssige, elektrisch leitfähige und mechanisch feste Verbindung zwischen den elektronischen Bauteilen und dem Schaltungsträger hergestellt. Jedes Lötverfahren besitzt eine eigene Charakteristik und unterscheidet sich in der Auftragung des Flussmittels, der Bereitstellung des Lotes und der Einbringung der Wärme. Die am weitesten verbreiteten Lötverfahren sind das Wellenlöten und das Reflowlöten. Beim Wellenlöten wird der bestückte Schaltungsträger über eine Lotwelle gefahren. Das flüssige Lot wird auf diese Weise auf den Schaltungsträger aufgebracht und verbindet diesen mit den elektronischen Bauteilen. Beim Reflowlöten (Wiederaufschmelzlöten) wird ein vorher auf den Schaltungsträger aufgebrachtes Lot aufgeschmolzen und verbindet dabei Bauteil und Schaltungsträger. Der Wärmeeintrag geschieht entweder über Strahlungs-, Konvektions- oder Kondensationserwärmung. Dabei wird entweder die gesamte Baugruppe erwärmt (Massenlötverfahren) oder nur der zu verlötende Teil (Selektives Löten z.B. Laserstrahllöten). [For04, S. 221], [Sch99, S. 301ff] Das **Leitleben** als Füge­technik für elektronische Baugruppen ist eine relativ junge Verbindungstechnik. Sie erweist sich bei vielen Anwendungen als zuverlässige, kostengünstige und umweltfreundliche Technik [Sch99, S. 374]. Leitleber erfüllen zwei Funktionen: Erstens verbinden sie den Schaltungsträger mit den elektronischen Bauteilen. Nach dem Aushärten bildet sich die mechanische Verbindung. Zweitens kontaktieren sie die Bauteile elektrisch. Leitleber sind mit metallischen Partikeln gefüllte Klebstoffe. Diese berühren sich und stellen die elektrische Verbindung her. [Sch99, S. 385ff] Chips werden hauptsächlich mittels **Bonden** kontaktiert. Praktisch jeder Chip ist über Bonds mit seinem Gehäuse verbunden, das anschließend auf dem Schaltungsträger kontaktiert wird. Seitdem immer öfter nackte Chips ohne Gehäuse verbaut werden, nimmt auch das Bonden auf Schaltungsträger zu. Dazu werden Chip und Schaltungsträger mit feinen Drähten aus Gold oder Aluminium verbunden, die mit den Kontaktflächen verschweißt werden. Häufigstes Verfahren ist das Ultraschallreißschweißen. Zum Schutz und zur mechanischen Befestigung wird der Chip anschließend mit Kunststoff, dem Globe Top, überzogen. [Sch99, S. 459f] Eine Sonderform der Verbindungstechnik ist die Einpresstechnik, die ohne zusätzliches Verbindungsmedium auskommt. Das elektronische Bauteil wird mit dem Schaltungsträger elektrisch verbunden, indem ein Metallstift des Bauteils in ein metallisiertes Loch im Schaltungsträger eingepresst wird. Die Presspassung realisiert die mechanische Verbindung. [For04, S. 233f], [Sch99, S. 65ff]

2.3.4 Nutzenpotentiale der Technologie MID

Die Technologie MID ermöglicht es, mechanische und elektrische Funktionen in einem einzigen Bauteil zu integrieren. Schon daraus ergeben sich Vorteile gegenüber Bauteilen in herkömmlicher Technologie (weniger Teile, höhere Zuverlässigkeit). Darüber hinaus ermöglicht die Technologie MID neue konstruktive Lösungen bei der Realisierung mechanischer und elektrischer Funktionen. Die wesentlichen Vorteile sind [Bur06, S. 20f], [For04, S. 1f], [GBP03, S. 18f], [GF06, S. 84], [Kri02, S. 7f], [Sch99, S. 148]:

- **Hohe Gestaltungsfreiheit:** Die hohe Gestaltungsfreiheit und die Integration von mechanischen und elektrischen Funktionen in ein Bauteil führen zu einer kompakteren Bauweise. Gleichzeitig lassen sich Gewichtsreduzierungen realisieren.
- **Höhere Funktionalität:** Durch den Einsatz der Technologie MID können neue Funktionen wie z.B. Stecker-, Antennen- und Sensorfunktionen realisiert werden.
- **Höhere Zuverlässigkeit:** Aufgrund der Integralbauweise entfallen sowohl Einzelteile als auch die Prozesse zu deren Fertigung und Montage. Fehlerquellen im Produkt und im Produktionsprozess werden so minimiert und die Zuverlässigkeit erhöht.
- **Reduzierung der Herstellkosten:** Durch die verringerte Teilezahl und der Reduzierung der Fertigungs- und Montageschritte ergibt sich eine verkürzte Prozesskette. Als Folge reduzieren sich die Herstellkosten.
- **Verbesserte Umweltverträglichkeit:** Neben einem geringeren Materialverbrauch reduziert sich auch die Werkstoffvielfalt in der Baugruppe. Das erleichtert das Recycling und die Entsorgung.

Diese Vorteile lassen sich anhand von Serienanwendungen belegen. Ein Beispiel ist das bereits in Kapitel 2.2.1 erläuterte Mikrofonmodul im Hörgerät. Die hohe Gestaltungsfreiheit erlaubte die Konstruktion eines ergonomischen und leichten Bauteils. Gleichzeitig fielen Schnittstellen und Bauteile weg, so dass Zuverlässigkeit und Tragekomfort des täglich benutzten Produkts verbessert wurden. [Ern05, S. 2] Ein weiteres Beispiel kommt fast ohne elektronische Bauteile aus. Die von der Fa. HARTING entwickelte RFID⁷-Antenne besitzt einen dreidimensionalen Aufbau. Dahinter befindet sich eine Gitterstruktur, die als Funkreflektor dient (Bild 2-8). Dadurch funktioniert der RFID-Transponder

⁷ RFID: Radio Frequency Identification. Ein über Funk auslesbares Etikett erlaubt die Identifikation eines Gegenstandes ähnlich einem Barcode [Heh06, S. 1938].

auch auf metallischen oder flüssigkeitsgefüllten Transportbehältern, was bei herkömmlichen Lösungen nicht der Fall ist. Der RFID-Transponder wird mit einem Deckel aus Kunststoff verschweißt und erfüllt dann die Schutzklasse IP67. Er ist daher für viele Industrieanwendungen geeignet. Das verwendete Herstellverfahren ist die Laserdirektstrukturierung. [Heh06, S. 1940]

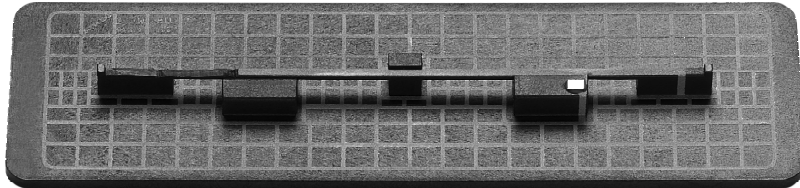


Bild 2-8: In MID-Technologie ausgeführte RFID-Antenne [HARTING]

2.3.5 Barrieren der Technologie MID

Das vorausgegangene Kapitel hat das hohe Potential der Technologie MID verdeutlicht. Diesem Potential steht jedoch nur ein geringes Marktvolumen gegenüber: Von 1988 bis 2005 gelangten in Deutschland gerade mal 35 Anwendungen zur Serienreife [GP06, S. 28f]. Das Marktvolumen für MID-Teile lag 2005 bei 14,1 Mio. Euro, Investitionen in die Technologie wurden in Höhe von 2,1 Mio. Euro getätigt [GP06, S. 16]. Verglichen mit dem Markt für Leiterplatten in Deutschland mutet das bescheiden an: Laut ZVEI erwirtschaftete dieser Bereich einen Umsatz von 1,4 Mrd. Euro [ZVEI06, S. 1886].

Die Technologie MID hat sich demnach noch nicht nachhaltig durchsetzen können, nur wenige Unternehmen haben MID-Produktideen bislang zur Serienreife gebracht. Das Heinz Nixdorf Institut hat zwei Markt- und Technologiestudien durchgeführt, um die Gründe für den mangelnden Markterfolg zu analysieren. Folgende Barrieren wurden darin identifiziert [GBP03, S. 53ff und 73ff], [GP06, S. 36ff und 46ff]:

- **Interdisziplinarität bei der Entwicklung:** Die traditionelle Aufteilung der Aufgaben in der Produktentwicklung muss bei der Entwicklung von MID-Teilen aufgegeben werden. Mechanik-Konstrukteure, Elektronik-Entwickler, Werkzeug-Konstrukteure und Spritzgießer müssen schon in der Konzeptionsphase eng zusammenarbeiten, um auftretende Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zu berücksichtigen.
- **Komplexität der MID-Teile:** Durch die Integralbauweise steigt die Komplexität der MID-Bauteile. Je mehr Funktionen integriert werden, umso größer wird die Komplexität. Diese Komplexität wird nicht beherrscht. Das ist ein Grund dafür, dass MID-Serienteile bisher einen einfachen Aufbau haben.

- **Restriktionen durch die Fertigung:** Abhängig von den MID-Verfahren müssen bei der Entwicklung von MID-Teilen vielfältige Restriktionen durch die Fertigungstechnologien berücksichtigt werden (z.B. eingeschränkte Gestaltungsfreiheit des MID-Verfahrens). Das geht soweit, dass die Fertigung das Produktkonzept determiniert. Diese Restriktionen sind aber häufig nicht bekannt oder führen zu unerwarteten Wechselwirkungen.
- **Keine 3D-Bestückungsanlagen:** Die Einschränkungen durch die Aufbau- und Verbindungstechnik sind fast immer der Flaschenhals bei der Entwicklung von MID-Produkten. Herkömmliche Bestückungsautomaten erlauben keine dreidimensionale Bestückung elektronischer Bauteile. Spezielle MID-Bestücker befinden sich noch in der Entwicklung.
- **Time-to-Market zu lang:** Die Zeit von der MID-Produktidee bis zum erfolgreichen Markteintritt ist zu lang. Die Gründe dafür liegen in der Komplexität und der langen Entwicklungszeit von MID-Teilen sowie Problemen bei der Fertigung aufgrund nicht berücksichtigter Restriktionen. Diese Barriere ist eine Folge aus den oben genannten Barrieren.
- **Hohe Kosten:** Die Herstellkosten für MID-Teile sind zu hoch. Als Gründe werden ebenfalls die lange Entwicklungszeit und die komplexe Prozesskette angeführt. Dies wird durch die geringe Effizienz der gezwungenermaßen eingesetzten Betriebsmittel (Dispenser, Bestückroboter) noch verschärft. Auch diese Barriere ist daher eine Folge aus den oben genannten Barrieren.

Es handelt sich bei den Barrieren also sowohl um technologische als auch entwicklungstechnische Barrieren. Beide Studien belegen, dass die Bedeutung der technologischen Barrieren eher gering ist, mit Ausnahme der fehlenden 3D-Bestückungsanlagen. Die Machbarkeit von MID-Anwendungen stellt daher nicht das Problem dar. Die Schwierigkeiten liegen bei der Beherrschung der Technologie MID durch die Entwickler [GP06, S. 47]. Sie klagen über die Komplexität der MID-Teile (verursacht durch die Integralbauweise von Mechanik und Elektronik) und der Restriktionen durch die Fertigungstechnologien [GP06, S. 47]. Ein wichtiger Ansatzpunkt für eine Verbesserung ist daher der Entwicklungsprozess von mechanisch-elektronischen Baugruppen. Dieser wird im Folgenden näher untersucht.

2.4 Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen

Die Entwicklung von MID-Teilen ist eine Herausforderung. Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, liegt dies vor allem an der Komplexität des Produkts und den Restriktionen durch die Fertigung. Vorgehensmodelle helfen, diese Komplexität zu beherrschen. Das bezieht sich sowohl auf die Produkt- als auch auf die Produktionssystementwicklung. In diesem Kapitel werden entsprechende Vorgehensmodelle vorgestellt. Zunächst wird das Zyklenmodell der Produktentstehung erläutert, das den grundsätzlichen Ablauf von der Produktidee zum erfolgreichen Markteintritt beschreibt. In Kapitel 2.4.2 werden Vorgehensweisen der Entwicklung sowohl für mechanische als auch elektronische Systeme vorgestellt. Kapitel 2.4.3 erläutert dies entsprechend für Produktionssysteme.

2.4.1 Zyklenmodell der Produktentstehung

Nach GAUSEMEIER erstreckt sich der Produktentstehungsprozess von der Geschäfts- bzw. Produktidee bis zum erfolgreichen Markteintritt. Er gliedert sich in die drei Hauptphasen *Strategische Produktplanung*, *Produktentwicklung* und *Produktionssystementwicklung* (Bild 2-9). In der Praxis ist der Ablauf der Produktentwicklung allerdings nicht stringent, sondern iterativ. Jede Phase wird in Zyklen durchlaufen, wie in Bild 2-9 dargestellt. [Gau04, S. 329ff]

Erster Zyklus: Strategische Produktplanung

Der erste Zyklus beschreibt den Weg von den Erfolgspotentialen der Zukunft zur Erfolg versprechenden Produktkonzeption (Prinziplösung). Er unterteilt sich in die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Produktkonzipierung und Geschäftsplanung. Das Ziel der **Potentialfindung** ist die Identifizierung der Erfolgspotentiale der Zukunft sowie die Ermittlung entsprechender Handlungsoptionen. In der **Produktfindung** werden neue Produkt- und Dienstleistungsideen gesucht und ausgewählt. Wesentliches Hilfsmittel sind Kreativitätstechniken. In der **Produktkonzipierung** wird die Prinziplösung des Produkts erarbeitet. Sie legt die physikalische und logische Funktionsweise des zu entwickelnden Produkts fest. Dieser Bereich ist nach GAUSEMEIER sowohl dem ersten als auch dem zweiten Zyklus zugeordnet. Das Produktkonzept ist notwendig für die Geschäftsplanung, stellt aber auch den Ausgangspunkt für die weitere Produktentwicklung dar. In der **Geschäftsplanung** werden die Geschäfts- und die Produktstrategie erarbeitet. In ersterer wird festgelegt, welche Marktsegmente wann und wie bearbeitet werden sollen. Letztere enthält Aussagen über das Produktprogramm, die Variantenvielfalt, eingesetzte Technologien etc. Die Produktstrategie mündet in den Geschäftsplan, der den Nachweis über die Wirtschaftlichkeit erbringen soll. [Gau04, S. 331]

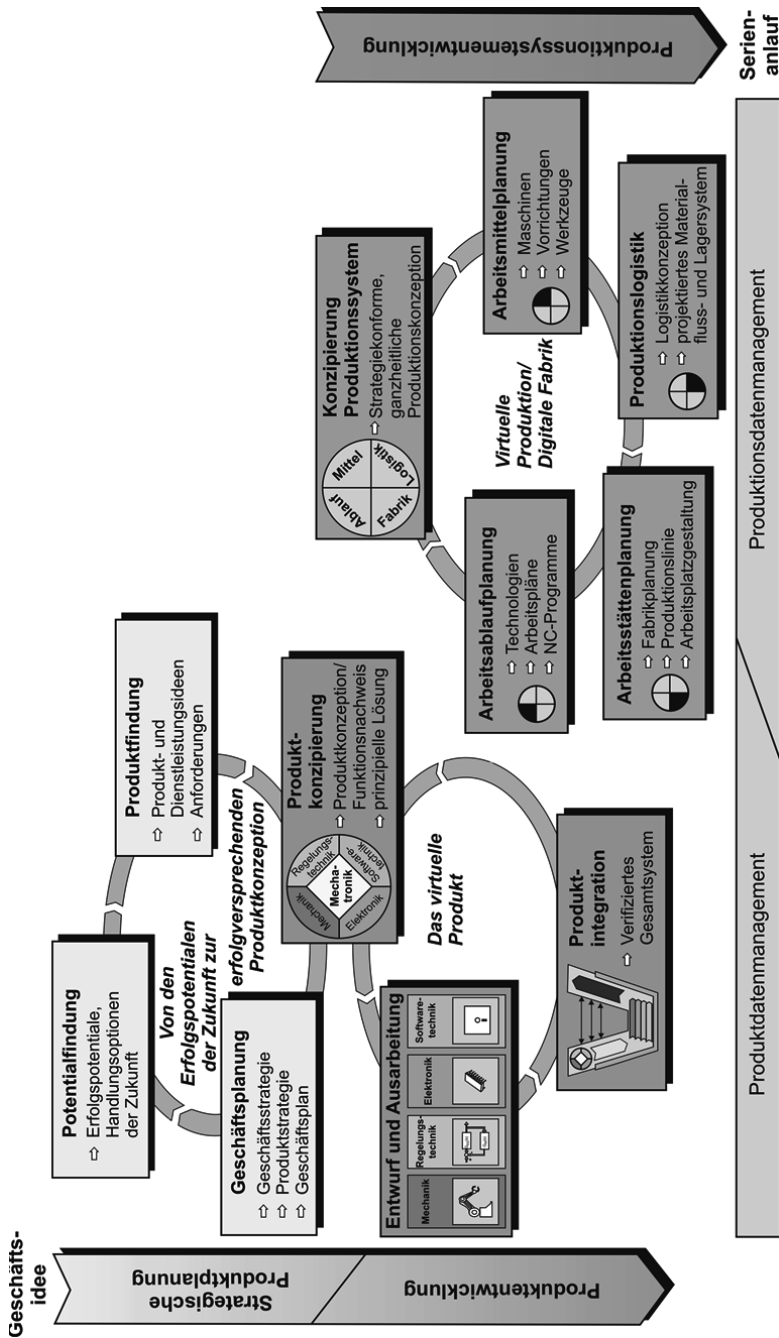


Bild 2-9: Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung [Gau04, S. 332]

Zweiter Zyklus: Produktentwicklung

In diesem Zyklus findet die Produktentwicklung bzw. die Konstruktion statt. Ausgehend von der Produktkonzipierung wird im Arbeitsbereich **Entwurf und Ausarbeitung** die domänenübergreifende Prinzipiellösung durch die Experten der beteiligten Domänen Mechanik, Regelungstechnik, Elektronik und Softwaretechnik verfeinert und ausgearbeitet. Dies geschieht in der Regel domänenspezifisch. In der **Produktintegration** werden die Ergebnisse sukzessive zu einer Gesamtlösung zusammengeführt und diese mit den Produkthanforderungen verglichen.

Zwischen den Aufgaben der Produkt- und der Produktionssystementwicklung gibt es enge Verbindungen. Die Pfeile in Bild 2-9 deuten dies an. Die gewünschten Eigenschaften des Produkts beeinflussen das Produktionssystem. Gleichzeitig müssen Restriktionen durch die Fertigungstechnologien und Betriebsmittel bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Das gilt insbesondere bei integrierten mechanisch-elektronischen Systemen. [Gau04, S. 332]

Dritter Zyklus: Produktionssystementwicklung

Im dritten Zyklus steht die Planung des Produktionssystems im Vordergrund. Sie erstreckt sich von der Produktionssystemkonzipierung bis zum Serienanlauf. Ausgangspunkt ist dabei die Produktkonzeption, da die Konzipierung von Produkt und Produktionssystem integrativ erfolgen soll. Die **Konzipierung des Produktionssystems** betrifft die Aspekte Arbeitsablauf, Arbeitsmittel, Arbeitsstätte und Materialfluss (Logistik). Ziel ist die Erarbeitung einer technischen und wirtschaftlich fundierten Konzeption des Produktionssystems.

Im Rahmen des dritten Zyklus werden diese Aspekte dann weiter konkretisiert (*Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung und Produktionslogistik*). In der **Arbeitsablaufplanung** werden die Fertigungstechnologien bestimmt, Arbeitsvorgänge festgelegt und Arbeits- und Montagepläne erstellt. In der **Arbeitsmittelplanung** werden die Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen geplant und entwickelt. Die **Arbeitsstättenplanung** umfasst die Gestaltung der einzelnen Arbeitsplätze, beschäftigt sich aber auch mit der Planung kompletter Produktionsbereiche und Fabriken. In der **Produktionslogistik** wird der Materialfluss geplant sowie das zugehörige Materialflusssystem erarbeitet. [Gau04, S. 332]

Dem Zyklusmodell muss ein leistungsfähiges Datenmanagement unterlegt werden, das die Partialmodelle des Produkts und des Produktionssystems abbildet und integriert. Das Wechselspiel der Produkt- und Produktionssystementwicklung ist durch das Datenmanagement zu unterstützen [Gau04, S. 332].

2.4.2 Produktentwicklung

Im Folgenden werden Vorgehensmodelle zur Entwicklung mechanischer und elektronischer Systeme vorgestellt. Sie sind seit Jahren anerkannt und bewährt, fokussieren aber jeweils eine Domäne.

2.4.2.1 Mechanik-Entwicklung nach PAHL/BEITZ

Nach PAHL/BEITZ verläuft der Arbeitsfluss beim Entwickeln von dem Planen und Klären der Aufgabe über das Erarbeiten prinzipieller Lösungen, den Aufbau modularer Baustrukturen mit Baugruppen und Bauteilen und deren Gestaltung bis zur Dokumentation des gesamten Produkts [PB07, S. 193]. Bild 2-10 zeigt die Hauptphasen und Arbeitsschritte bei der Mechanik-Entwicklung sowie die Phaseergebnisse.

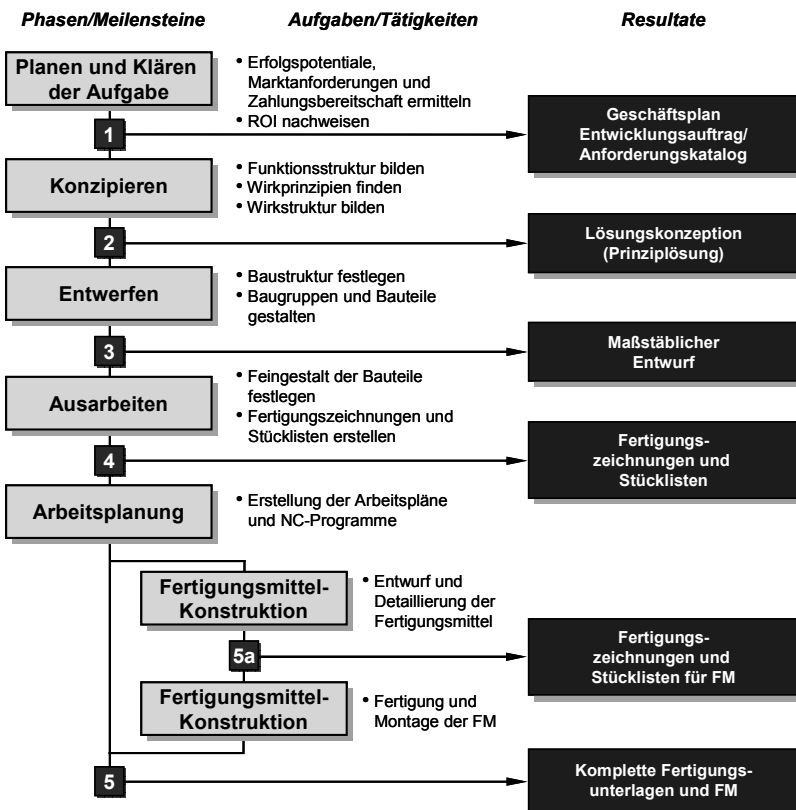


Bild 2-10: Hauptphasen und -arbeitsschritte bei der Mechanik-Entwicklung nach PAHL/BEITZ [PB07, S. 193]

Für die Hauptphasen werden Hauptarbeitsschritte vorgeschlagen. Diese führen zu einem bedeutsamen Arbeitsergebnis, wobei in der Regel viele weitere untergeordnete Arbeitsschritte notwendig sind. Nach jeder Hauptphase sind Entscheidungsschritte erforderlich, die die gewünschten Ergebnisse sicherstellen und die weiteren Arbeiten freigeben.

Die Phase **Planen und Klären der Aufgabe** dient zur Informationsbeschaffung über die Anforderungen an das Produkt (z.B. durch Marktanalysen) sowie über Randbedingungen. Das Ergebnis ist deren Festlegung in einer Anforderungsliste.

Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, in dem durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in einer Wirkstruktur die prinzipielle Festlegung der Lösung geschieht.

Entwerfen ist der Teil des Konstruierens, in dem ausgehend von der Wirkstruktur die Baustruktur (also Gestalt und Anordnung aller Teile) nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien vollständig erarbeitet wird. Dabei werden Form und Werkstoff festgelegt und die entstehenden Entwürfe nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet. Das Entwerfen ist demnach die gestalterische Festlegung der Lösung.

Ausarbeiten ist die finale Phase des Konstruierens, in der die Gestaltung des Produkts mit der endgültigen Festlegung der Mikrogeometrie durchgeführt wird. Dies geschieht unter besonderer Berücksichtigung der Fertigung. Die Funktionssicherheit und die Produktionskosten werden dadurch stark beeinflusst, daher ist an dieser Stelle große Sorgfalt erforderlich. Das Ergebnis ist die herstellungstechnische Festlegung der Lösung.

Für die Hauptphasen werden eine Reihe von Methoden, Grundregeln, Gestaltungsprinzipien und -richtlinien vorgegeben, die den Entwickler bei seiner Tätigkeit unterstützen sollen. Fokus liegt hier auf dem Bereich Entwerfen, aber auch Methoden zur Qualitätssicherung (Fehlerbaumanalyse, FMEA und QFD) und Kostenerkennung werden empfohlen. [PB07, S. 193ff]

Abschließend ist festzuhalten, dass PAHL/BEITZ mit ihrer Konstruktionslehre die Grundlage für methodisches Konstruieren im Maschinenbau gelegt haben. Die Entwickler erhalten einen umfassenden Satz an Hilfsmitteln, allerdings nur für die Konstruktion mechanischer Systeme. Andere Domänen werden nicht berücksichtigt. Auch die Fertigung wird nur indirekt berücksichtigt, z.B. über Richtlinien zum fertigungsgerechten Gestalten.

2.4.2.2 Elektronik-Entwicklung nach GAJSKI

Bei der Entwicklung elektronischer Schaltungen, insbesondere digitaler Mikroelektronik, erweist sich die steigende Komplexität als problematisch. Um diese Komplexität zu beherrschen, werden neben einem Vorgehensmodell zwei Grundprinzipien genutzt: der Einsatz eines Sichtenkonzepts und eine hierarchische Entwicklung über mehrere Abstraktionsebenen. Diese Grundprinzipien wurden maßgeblich von GAJSKI entwickelt. [Gaj97, S. 11ff], [GT88, S. 3ff]

Sichtenkonzept

Bei der Entwicklung digitaler Schaltungen existieren drei Sichten auf das Produkt: Verhalten, Struktur und Geometrie. Sie ergeben das so genannte Y-Modell (Bild 2-11).

Verhalten: Die Verhaltensbeschreibung befasst sich ausschließlich mit der Funktion des Produkts. Sie spezifiziert, *was* das Entwurfsobjekt leistet. Das Ein- und Ausgangsverhalten wird anhand von Prozeduren beschrieben und durch zusätzliche Leistungsdaten ergänzt [Esc93, S. 9].

Struktur: Aus der Strukturbeschreibung geht hervor, *wie* das Verhalten implementiert wird. Sie beschreibt den Aufbau des Produkts. Insbesondere wird spezifiziert, wie das Produkt durch Verschaltung untergeordneter Komponenten mit einfacherer Funktionalität realisiert werden kann [Esc93, S. 9].

Geometrie: Die Geometriebeschreibung definiert den genauen Ort, wo sich Komponenten z.B. auf einem Chip befinden. Sie definiert daher den zwei- bzw. dreidimensionalen Aufbau der realen Schaltung [Esc93, S. 9].

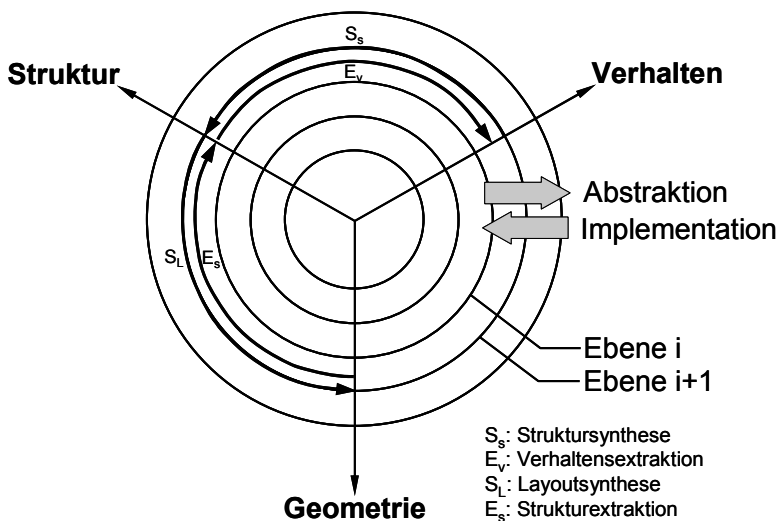


Bild 2-11: Das Y-Modell der Schaltungsentwicklung [Gaj97, S. 11]

Abstraktionsebenen

Ein weiteres Grundprinzip der Schaltungsentwicklung sind Abstraktionsebenen. Der Schaltungsentwurf erfolgt anhand eines Top-Down-Ansatzes über mehrere Abstraktionsebenen zum Layout. Diese Abstraktionsebenen wurden von GAJSKI [GT88] eingeführt und von ARMSTRONG [Arm89] erweitert.

Systemebene: Auf dieser obersten Ebene wird das zu erstellende System durch verknüpfte Funktionseinheiten modelliert. Als Funktionseinheiten dienen Prozessoren, Speicher und Busse.

Algorithmische Ebene: Das genaue Ein- und Ausgangsverhalten der Funktionseinheiten wird modelliert. Dies geschieht durch Systemzustände und nebenläufig notierte Algorithmen. Die Verhaltenssicht steht hier im Vordergrund: Da Verzögerungszeiten eine entscheidende Bedeutung besitzen, werden diese für die einzelnen Funktionseinheiten modelliert.

Registertransferebene: Die nebenläufig notierten Algorithmen, Flowcharts und Befehlssätze werden in Register-Komponenten überführt, z.B. Register, Zähler, Stapelspeicher (Stacks), Wartereihen (Queues) und Addierer (Struktursicht). Das Verhalten wird durch Finite State Machines (FSM) beschrieben.

Logikebene: Das Verhalten der Schaltung wird durch Boolesche Gleichungen beschrieben. Boolesche Gleichungen lassen sich durch Gatter und Flip-Flops modellieren (Struktursicht). Gatter (AND, OR, NAND, NOR) sind Logikbausteine mit einfachem Ein- und Ausgangsverhalten, Flip-Flops sind Speicherbausteine.

Transistorebene: Auf der Transistorebene verlagert sich der Fokus von der logischen auf die physikalische Modellierung. Die Gatter der Logikebene werden durch Transistoren, Widerstände und Kapazitäten ersetzt. Standardisierte Transistorschaltungen für Gatter sind in Bibliotheken verfügbar. Das Verhalten der Schaltung kann dann mit Hilfe von so genannten „SPICE“-Werkzeugen simuliert werden.

Layoutebene: Die Schaltung wird durch geometrische Grundmuster modelliert, die je einen Transistor oder Widerstand darstellen. Dieses Modell dient als Vorlage für die anschließende Fertigung. [Arm89, S. 2]

Die Sichtenwechsel innerhalb einer Ebene werden als Synthese und Extraktion bezeichnet. Synthese beschreibt den Übergang von einer Verhaltens- zu einer Strukturbeschreibung (Struktursynthese) oder von einer Struktur- zu einer Geometriebeschreibung (Layoutsynthese). Die Extraktion ist die Umkehrung der Synthese (siehe auch Bild 2-11).

Vorgehensmodell

GAJSKI [Gaj97, S. 11ff] definiert einen allgemeingültigen Entwicklungsprozess für den Entwurf digitaler Schaltungen. Beginnend mit der Spezifikation und anschließender Bibliotheksentwicklung besteht der Hauptteil des Prozesses aus der wechselseitigen Entwurfssynthese und Entwurfsanalyse. Abschließend erfolgen die Dokumentation und die Fertigung der Baugruppe.

Spezifikation: Die Marktanforderungen werden analysiert und in einer Produktspezifikation (Verhaltensbeschreibung) dokumentiert. Sie definiert die Funktionalität und die Schnittstellen zur Systemumgebung. Häufig wird der grundsätzliche Aufbau des Systems grob in einem Blockdiagramm skizziert. [Gaj97, S. 11f]

Bibliotheksentwicklung: In der Bibliotheksentwicklung wird das grobe Blockdiagramm soweit unterteilt und verfeinert, bis es schließlich nur noch aus Komponenten besteht, die in einer vordefinierten technologieabhängigen Komponentenbibliothek stehen. Die Komponenten müssen fertig entworfen, getestet und vollständig dokumentiert sein. Sollten Komponenten nicht enthalten sein, werden sie in der folgenden Entwurfssynthese erzeugt [Gaj97, S. 12f].

Entwurfssynthese: In dieser Phase wird die Spezifikation (Verhaltensbeschreibung) in eine Strukturbeschreibung überführt. Dazu werden die innere Struktur der Komponenten und deren Verknüpfungen miteinander definiert. Das geschieht für jede der beschriebenen Abstraktionsebenen [Gaj97, S. 13].

Entwurfsanalyse: Sobald ein Entwurf erstellt wurde, wird dieser auf Erfüllung der Anforderungen überprüft. Die Tests beschränken sich dabei in der Regel auf Aspekte wie Herstellkosten, Leistung und Prüfbarkeit [Gaj97, S. 14].

Dokumentation: Abschließend werden die Benutzer- und Fertigungsunterlagen erstellt. Diese beinhalten sowohl Verhaltens- als auch Geometrieinformationen, aber keine Strukturinformationen. Aus Benutzersicht wichtige Informationen sind Blockdiagramm und Flowchart (Verhalten), Gehäuseform und Anschlussbezeichnung (Geometrie) sowie Minimal- und Maximalbereiche für Spannung, Strom und Temperatur sowie Verzögerungszeiten [Gaj97, S. 14f].

Abschließend ist festzuhalten, dass GAJSKI die Art des Schaltungsentwurfs durch sein Sichten- und Abstraktionsebenenkonzept entscheidend beeinflusst hat. Der Wechsel zwischen verschiedenen Sichten und das generelle Vorgehen vom Verhalten (abstrakt) zur Geometrie (konkret) sind Grundprinzipien bei der Entwicklung elektronischer Schaltungen geworden. Das Vorgehen fokussiert sich allerdings auf rein elektronische Systeme und speziell auf den Chip-Entwurf. Wie ein elektronisches System als Ganzes zu entwerfen ist, wird nicht spezifiziert.

2.4.3 Produktionssystementwicklung

Während für die Produktentwicklung eine ganze Reihe verschiedener Systematiken und Vorgehensmodelle mit unterschiedlichen Schwerpunkten existiert, fehlen diese für den Bereich Produktionssystementwicklung weitgehend. Einen Ansatz liefert REFA. Die Systematik nach REFA ist ein übergeordneter, allgemeingültiger Leitfaden für die Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. REFA definiert dabei komplexe Produktionssysteme als:

„... Arten von Produktionseinrichtungen, bei denen mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen, sowohl bei der Bearbeitung als auch im Material- und Informationsfluss, weitgehend selbstständig ablaufen. Ein wesentliches Merkmal komplexer Produktionssysteme ist die informationstechnische Verknüpfung der Komponenten des Systems.“ [REF90, S. 15]

Die Systematik geht von einem vorhandenen Produktionssystem aus und betrachtet technische, menschliche, organisatorische und informative Aspekte. Sie umfasst mehrere Phasen und Meilensteine (Bild 2-12) [REF90, S. 86ff].

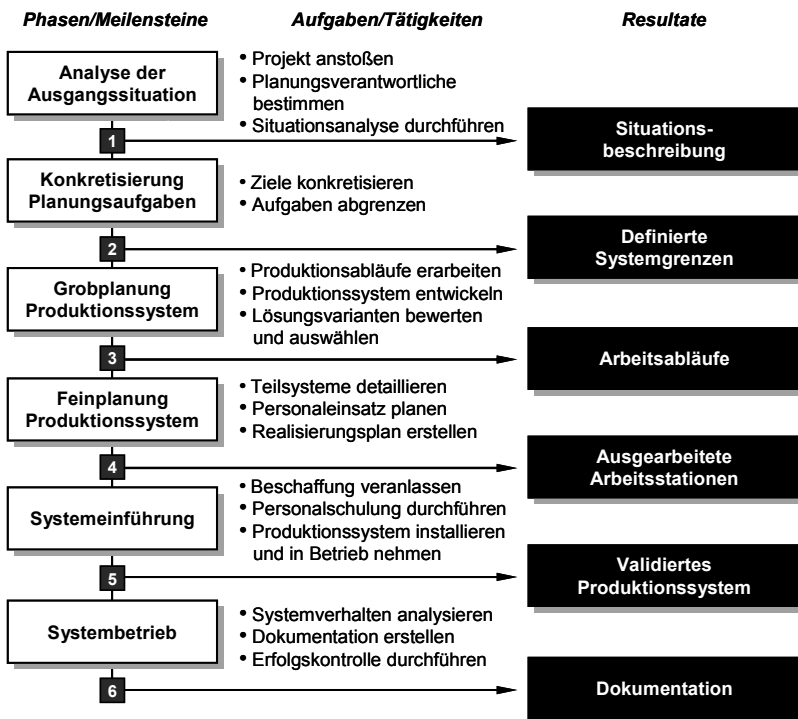


Bild 2-12: Phasenmodell der Systematik zur Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme nach REFA [REF90, S. 89]

Analyse der Ausgangssituation: Die auslösenden Faktoren zur Planung eines Produktionssystems sind entweder produktbezogen (z.B. Einführung eines neuen Produkts) oder produktionsbezogen (z.B. Einführung neuer Produktionstechnologien). Das zu fertigende Produktspektrum, die vorhandenen Betriebsmittel und deren Stärken und Schwächen sowie die aktuelle Kostensituation werden analysiert. Auf Basis dieser Analyse werden die Planungsziele festgelegt und die Situationsanalyse durchgeführt.

Konkretisierung der Planungsaufgabe: Aus den allgemein formulierten Planungszielen werden konkrete Zielkriterien abgeleitet. Dabei wird zwischen organisatorischen, technischen, monetären und personellen Zielen unterschieden. Weiterhin werden die Grenzen des zu planenden Produktionssystems festgelegt und seine Schnittstellen zu benachbarten Systemen definiert.

Grobplanung des Produktionssystems: In dieser Phase werden die Produktionsabläufe erarbeitet und das Konzept des Produktionssystems entwickelt. Dies geschieht auf Basis der geplanten Stückzahlen. Dazu werden Arbeitsvorgänge zur Herstellung der Produkte ermittelt, denen Arbeitssysteme zugeordnet sind und die über Materialflusssysteme verkettet werden. Die so erarbeiteten Lösungskonzepte werden bewertet und eines ausgewählt.

Feinplanung des Produktionssystems: Das Grobkonzept des Produktionssystems wird im Detail ausgearbeitet. Betrachtet werden dabei Zeitbedarfe der Arbeitsvorgänge sowie arbeitsorganisatorische, ergonomische und sicherheitstechnische Regeln. Die einzusetzenden Werkzeuge und Vorrichtungen werden festgelegt und der Personaleinsatz und die spätere Systemeinführung geplant.

Systemeinführung: Zuerst wird die Beschaffung der Produktionsmittel veranlasst und das Personal im Umgang mit den Maschinen geschult. Anschließend wird das Produktionssystem installiert. Im Testbetrieb werden technische und organisatorische Erfahrungen gesammelt und das System optimiert.

Systembetrieb: Abschließend erfolgt die Übergabe des Produktionssystems, vorausgesetzt der Testbetrieb lief erfolgreich. Die Abschlussdokumentation wird erstellt und eine Erfolgskontrolle durchgeführt.

Die Systematik nach REFA unterstützt vor allem das Projektmanagement und ist unabhängig von Fertigungstechnologien und Anlagen formuliert. Sie hat nur wenig Bezug zur Produktentwicklung. Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem werden nicht betrachtet. Dennoch handelt es sich bei der Systematik nach REFA um einen wichtigen Leitfaden, stellt sie das bisher einzige etablierte Vorgehen bei der Produktionssystementwicklung dar.

2.5 Problemabgrenzung

Nutzenpotentiale der Technologie MID

Mechanisch-elektronische Baugruppen zeichnen sich durch eine hohe Funktionsdichte aus. Die wesentlichen Ziele solcher Baugruppen sind Miniaturisierung, geringere Herstellkosten und eine hohe Zuverlässigkeit [For04, S. 1], [GF06, S. 3f], [KFG06, S. 36]. Technologien wie planare Leiterplatten stoßen dabei an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit [GBP03, S. 17]. Einen Ansatz zur Überwindung dieser Grenzen stellen neue Technologien dar.

Die Technologie MID bietet neue Lösungen und Funktionen für mechanisch-elektronische Baugruppen. Sie ersetzt planare durch räumliche Schaltungsträger. Ihre hohe Gestaltungsfreiheit unterstützt die Miniaturisierung, ihre Integralbauweise reduziert die Teilezahl sowie Fertigungs- und Montagekosten. Zahlreiche Serienteile belegen dies. [For04, S. 1], [Ern05, S. 1f]

Herausforderungen bei der Entwicklung von MID-Teilen

Trotz der oben genannten Potentiale hat sich die Technologie MID bisher nicht nachhaltig durchgesetzt. Von vielen MID-Produktideen (die MIDIS-Datenbank der Forschungsvereinigung 3D-MID e.V. listet 171 auf) haben es nur 35 in die Serie geschafft. Grund dafür sind die in Kapitel 2.3.5 genannten Barrieren, besonders aber die Interdisziplinarität, die Komplexität und die bei der Entwicklung zu berücksichtigenden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. [GBP03, S. 53ff], [GP06, S. 36ff], [FK04, S. 18], [KFG06, S. 42] Diese Barrieren und ihre Folgen werden daher näher erläutert.

MID-Teile sind **interdisziplinäre** Produkte. Die an der Entwicklung beteiligten Domänen verfügen über eigene Begriffswelten, Methoden und Werkzeuge. Daraus folgen inkonsistente Teilentwicklungen sowie nicht berücksichtigte Wechselwirkungen. [KFG06, S. 45] Inkonsistenzen entstehen z.B. wenn die Mechanikkonstruktion in 3D, das Schaltungslayout jedoch in 2D erstellt wird.

Durch die Integralbauweise steigt die **Komplexität** der MID-Bauteile. Je mehr Funktionen integriert werden, umso größer wird diese. Die Beherrschung dieser Komplexität ist nicht trivial: Es fehlt an geeigneten Werkzeugen und Methoden [FPR06, S. 4], [Pei08, S. 39].

Bei MID-Teilen existieren starke **Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem**: Die Gestalt des Schaltungsträgers bestimmt das MID-Verfahren, umgekehrt schränken die Verfahren die Gestaltungsfreiheit ein. Zudem ist die Aufbau- und Verbindungstechnik fast immer der Flaschenhals. Das geht soweit, dass die Fertigung das Produktkonzept determiniert. Nur durch eine integrative Produkt- und Produktionssystementwicklung können MID-Produkte erfolgreich realisiert werden. [GF06, S. 18]

Fazit

Durch die Technologie MID können mechanisch-elektronische Baugruppen entscheidend verbessert werden. Die Vorteile der Technologie (siehe Kapitel 2.3.4) belegen dies. Allerdings fehlt es bislang an Unterstützung zur Entwicklung von MID-Teilen:

- Es werden detaillierte Vorgehensweisen im Sinne von Leitfäden benötigt, um der Interdisziplinarität der Entwicklungsaufgabe zu begegnen. In den Vorgehensweisen müssen die beteiligten Disziplinen gleichberechtigt und domänenübergreifend verständlich beschrieben sein.
- Es bedarf geeigneter Methoden und Richtlinien zur Beherrschung der Komplexität. Diese Methoden und Richtlinien sollten vorzugsweise MID-spezifisch oder leicht adaptierbar sein.
- Die Wechselwirkungen können nur berücksichtigt werden, wenn diese den Entwicklern bewusst sind. Die Wechselwirkungen hängen dabei vom verwendeten MID-Verfahren ab. Dies muss bei der Entwicklungsunterstützung berücksichtigt werden.
- Die Fülle an benötigten Informationen verlangt nach einer Wissensbasis, in der diese Informationen strukturiert abgelegt und einfach abrufbar sind. Die Wissensbasis muss darüber hinaus den Entwicklern Unterstützung bei MID-spezifischen Fragen wie z.B. der Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens gewähren.

Deshalb wird eine *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* benötigt. Die Systematik soll der Definition entsprechend (vgl. Kapitel 2.1) den Entwicklungsprozess strukturieren. Dazu zählt die Einteilung in Phasen und Meilensteine und die Zuordnung weiterer Informationen. Die Systematik soll die domänenübergreifende Entwicklung unterstützen, indem detaillierte Tätigkeitsbeschreibungen im Sinne von Leitfäden den Phasen zugeordnet sowie Methoden- und Richtlinienempfehlungen gegeben werden. Dabei müssen bei den Tätigkeitsbeschreibungen die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem aufgezeigt werden. Für jedes MID-Verfahren existieren andere Wechselwirkungen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen des MID-Verfahrens Laserdirektstrukturierung LDS näher untersucht. Dieses Verfahren hat augenblicklich den höchsten Verbreitungsgrad. Die Systematik soll auch Entscheidungshilfen bei der Auswahl des MID-Verfahrens geben und durch eine Wissensbasis rechnerunterstützt werden.

2.6 Anforderungen an die Systematik

Aus der Problemanalyse ergeben sich folgende Anforderungen für eine *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID*:

A1) Strukturierung des Entwicklungsprozesses: Die Systematik soll den Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme anhand eines Vorgehensmodells strukturieren und dabei die Unterschiede der MID-Verfahren beachten.

A2) Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Produkt und Produktionssystem: Die Integralbauweise bei MID-Teilen verursacht Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Werden diese bei der Entwicklung nicht berücksichtigt, entstehen schwerwiegende Probleme bei der späteren Fertigung. Die Systematik soll auf diese Wechselwirkungen hinweisen.

A3) Entwicklungsunterstützung durch Methoden- und Richtlinienempfehlung: Die Komplexität von MID-Teilen verlangt den Einsatz von Hilfsmitteln wie Methoden und Richtlinien. Die Systematik soll daher geeignete Methoden und Richtlinien empfehlen und in den Entwicklungsprozess einordnen.

A4) Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des MID-Verfahrens: Es existieren verschiedene MID-Verfahren, die sich in ihrer Leistungsfähigkeit unterscheiden. Mehrere Produktmerkmale, insbesondere die Gestalt, beeinflussen die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen MID-Verfahren. Die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens soll durch die Systematik unterstützt werden.

A5) Rechnerunterstützung durch eine Wissensbasis: Das in der Systematik enthaltene Wissen über Entwicklungstätigkeiten, Methoden, Richtlinien und Wechselwirkungen muss für die Entwickler einfach abrufbar sein. Die Systematik soll daher durch eine Wissensbasis unterstützt werden. In dieser soll das Wissen strukturiert abgelegt werden.

A6) Verständlichkeit: Die Systematik soll insbesondere Anfängern in der Technologie MID bei der Entwicklung von MID-Teilen unterstützen. Das erfordert eine einfache und verständliche, mit Beispielen erläuterte Systematik.

A7) Beherrschung der Komplexität: Aufgrund der Komplexität von MID-Teilen wird ein praxisnaher Leitfaden für die Entwickler benötigt, der sie durch den Entwicklungsprozess führt. Die Systematik soll daher die Entwicklungstätigkeiten in Phasen und Meilensteine strukturieren und die Tätigkeiten innerhalb der Phasen detailliert beschreiben.

A8) Gleichberechtigung der Domänen: Bei der Entwicklung von MID-Teilen stehen die beteiligten Domänen gleichberechtigt nebeneinander. Die Systematik soll die Bereiche Mechanik, Elektronik, Fertigungstechnik und Aufbau- und Verbindungstechnik gleichermaßen behandeln.

3 Stand der Technik

Dieses Kapitel untersucht Systematiken, Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme und speziell von MID-Teilen. Kapitel 3.1 beschreibt Systematiken zur Entwicklung mechatronischer Systeme. In Kapitel 3.2 werden Spezifikationstechniken für das Produkt und das Produktionssystem vorgestellt. Kapitel 3.3 erläutert Methoden und Werkzeuge, die speziell auf die Technologie MID ausgerichtet sind. Kapitel 3.4 bewertet die Ansätze anhand der ermittelten Anforderungen (vgl. Kapitel 2.6) und leitet den Handlungsbedarf ab.

3.1 Systematiken zur Mechatronik-Entwicklung

Im Vergleich mit anderen technischen Domänen ist die Mechatronik eine recht junge Disziplin. Dessen ungeachtet sind aufgrund ihrer Potentiale und ihrer Komplexität (vgl. Kapitel 2.1) bereits eine ganze Reihe von Vorgehen und Systematiken entwickelt worden, von denen die bedeutendsten im Folgenden kurz charakterisiert werden.

3.1.1 VDI-Richtlinie 2221: Entwicklung technischer Systeme

Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] beinhaltet eine allgemein anwendbare Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme. Sie behandelt allgemeingültige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens und definiert Arbeitsabschnitte und -ergebnisse, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit als Leitlinie für ein Vorgehen in der Praxis dienen. Sie orientiert sich dabei stark an der Systemtechnik als allgemeine Problemlösungsmethodik [VDI2221, S. 2].

Vor diesem Hintergrund definiert die VDI-Richtlinie 2221 ein generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren. Es besteht aus sieben Arbeitsabschnitten mit entsprechend sieben Arbeitsergebnissen, die teilweise, vollständig oder mehrmals iterativ durchlaufen werden (Bild 3-1).



Bild 3-1: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [VDI2221, S. 9]

Zum Abschnitt 1 **Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung** gehören das Sammeln aller verfügbaren Informationen und das Erkennen von Informationslücken. Arbeitsergebnis ist die Anforderungsliste. Diese begleitet die Entwicklung während aller Arbeitsabschnitte und ist stets aktuell zu halten.

Im Arbeitsabschnitt 2 **Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen** werden zunächst die Gesamtfunktion und die wesentlichen Teilfunktionen des Produkts bestimmt. Diese werden über Energie-, Stoff- und Signalflüsse zur Funktionsstruktur verknüpft. Diese dient als formale Darstellung des Systems.

Im Arbeitsabschnitt 3 **Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen** werden für alle Funktionen Lösungsprinzipien gesucht. Dazu werden physikalische, chemische und andere Effekte ausgesucht; diese bilden das jeweilige Lösungsprinzip. Die für die Teilfunktionen gefundenen Lösungsprinzipien werden gemäß der Funktionsstruktur zur Wirkstruktur verknüpft. Arbeitsergebnis ist die prinzipielle Lösung.

Im Arbeitsabschnitt 4 **Gliedern in realisierbare Module** wird die prinzipielle Lösung in Module gegliedert, bevor deren Konkretisierung erfolgt. Ergebnis ist eine modulare Struktur. Bei diesem Arbeitsabschnitt verzweigt sich eine Produktentwicklung oft in simultane Teilentwicklungen, die getrennt voneinander bearbeitet werden.

Der Arbeitsabschnitt 5 **Gestalten der maßgebenden Module** enthält die Konkretisierung der geometrischen, stofflichen oder programmtechnischen Gestalt der einzelnen Module. Die Gestaltung erfolgt jedoch nur grob. Als Ergebnis entstehen Vorentwürfe (z.B. maßstäbliche Zeichnungen, Stromlaufpläne etc.), die anschließend bewertet werden.

Im Arbeitsabschnitt 6 **Gestalten des gesamten Produkts** werden die grobgestalteten Module durch Detaillieren endgültig festgelegt. Fehlende Elemente werden ergänzt und ebenfalls detailliert. Ergebnis ist der Gesamtentwurf des Produkts.

Der Arbeitsabschnitt 7 **Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben** dient dem Ausarbeiten z.B. der Fertigungs- und Betriebsanweisungen. Ergebnis ist die Produktdokumentation in Form von Zeichnungen, Stücklisten, Fertigungsvorschriften, Betriebsanleitungen sowie Benutzerhandbüchern. [VDI2221, S. 9ff]

Bewertung: Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt ein allgemeines Vorgehen zur Entwicklung technischer Produkte. Sie ist vom Maschinenbau geprägt, aber prinzipiell domänenübergreifend einsetzbar. Durch umfangreiche Beispiele wird das Vorgehen detailliert beschrieben. Die Systematik ist dadurch auch leicht verständlich. Die VDI-Richtlinie 2221 empfiehlt den Einsatz von Methoden und rechnerbasierten Werkzeugen wie Produktmodellen sowie Daten- und Wissensbasen. Auf Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem wird nicht eingegangen. Weitere Anforderungen aus Kapitel 2.6 werden nicht erfüllt.

3.1.2 VDI-Richtlinie 2422: Entwicklung mikroelektronisch gesteuerter Systeme

Die VDI-Richtlinie 2422 [VDI2422] entstand aufgrund des Wandels von elektromechanischen hin zu mikroelektronischen Steuerungen. Dieser Wandel führte zu einer Verlagerung der Entwicklungsschwerpunkte: Energie- und Signalflüsse sind bei mikroelektronischen Steuerungen getrennt und werden auch getrennt voneinander entwickelt, hinzugekommen ist die Entwicklung und Erstellung von Software. Durch den Einzug der Mikroelektronik hat sich auch eine neue Aufgabenverteilung ergeben. Die Entwicklung findet sowohl in der elektromechanischen Konstruktion als auch in der Schaltungsentwicklung und im Software-Labor statt. Diese Dreiteilung spiegelt sich auch im Vorgehensplan wider (Bild 3-2). [VDI2422, S. 16]

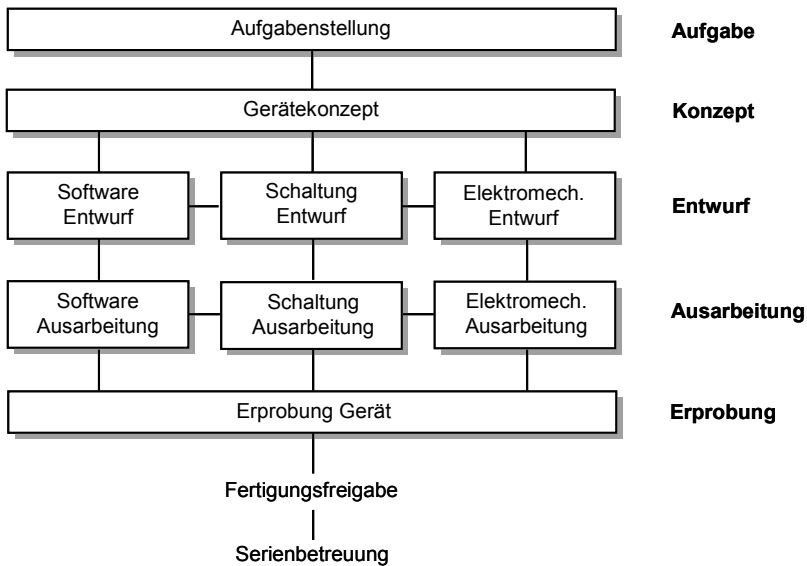


Bild 3-2: Vorgehensplan für die Entwicklung von Geräten mit Steuerung durch Mikroelektronik nach VDI 2422 [VDI2422, S. 15]

Der vorgeschlagene Vorgehensplan startet mit der **Aufgabenstellung**, die anhand des Anforderungskatalogs präzisiert wird. In Abstimmung mit dem Auftraggeber mündet der Anforderungskatalog im Pflichtenheft, das die zu realisierenden Funktionen enthält und für die Entwicklung verbindlich ist. Das **Gerätekonzept** wird in drei Teilschritten erarbeitet: Erstellung einer Funktionsstruktur auf Benutzer- und Prozessebene mit den Steuerungsschnittstellen, Auswahl der Steuerung (analog, digital, Mikrocomputer) und Abstimmung der Teilkonzepte für den mechanischen Geräteteil, die Schaltung und die Software.

In der Entwurfs- und der Ausarbeitungsphase spaltet sich die Entwicklung in die drei Teilgebiete Software-Entwicklung, Schaltungsentwicklung und den Elektromechanischen Entwurf auf.

Software-Entwicklung: Nach der Problemanalyse des Gerätekonzeptes werden die Schnittstellen zwischen der Benutzer- und Steuerungsebene definiert und eine grobe Funktionsstruktur entworfen. Danach werden die Datenstrukturen festgelegt und die Funktionsstruktur mit Mitteln der strukturierten Programmierung modularisiert und feinstrukturiert. In der Ausarbeitung erfolgt die Implementierung der Module; die Gerätefunktionen werden getestet. Abschließend werden die begleitend erstellten Dokumentationen zusammengefasst.

Schaltungsentwurf: Zuerst wird die Bauteiltechnologie (Analog- oder Digital-schaltung) festgelegt und der Stromlaufplan erstellt. Diese logische Schaltung wird dahingehend analysiert, ob Ein- und Ausgangsdaten korrekt definiert sind, die Logik richtig verschaltet ist und das Laufzeitverhalten/Übertragungsverhalten den Anforderungen entspricht. Anschließend wird die Baugruppe als prüfbare Einheit entworfen und bzgl. der Elektromagnetischen Verträglichkeit geprüft. In der Ausarbeitung werden die Verdrahtungsart festgelegt (Stecker und Anschlüsse an Peripherie-Geräte), die Bauteile platziert und untereinander verbunden. Nach einer automatischen Fehlersuche werden die Fertigungsunterlagen und Prüfanweisungen erstellt.

Elektromechanischer Entwurf: Als erster Schritt wird der Grobentwurf erstellt, indem die Grundgeometrie, die Kinematik der bewegten Teile und die Werkstoffe festgelegt werden. Anschließend wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle entworfen. Danach werden die Einbauart der Platinen und die Verbindungsarten der Schnittstellen festgelegt, die in der Schaltungsausarbeitung berücksichtigt werden müssen. Als letzter Schritt des Entwurfs werden die Mechanik, Baugruppenträger und das Gehäuse feingestaltet. Abschließend erfolgt in der Ausarbeitung die Erstellung der Fertigungs-, Montage- und Prüfunterlagen sowie der Stücklisten.

In der letzten Phase findet die Erprobung des gesamten Gerätes statt. Dazu werden Prototypen erstellt und im Labor sowie anschließend im Feld getestet. [VDI2422, S. 16ff]

Bewertung: Die VDI-Richtlinie 2422 beschreibt die Entwicklung von Geräten mit mikroelektronischer Steuerung und kommt damit integrierten mechanisch-elektronischen Systemen schon sehr nahe. Das Vorgehen ist domänenübergreifend gestaltet und sehr detailliert, allerdings auch sehr komplex. Methoden und Richtlinien werden nicht empfohlen. Weitere Anforderungen werden nicht erfüllt.

3.1.3 VDI-Richtlinie 2206: Entwicklung mechatronischer Systeme

Die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklung mechatronischer Systeme“ [VDI2206] 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, S. 26]. Aus diesem Grund schlägt die VDI-Richtlinie 2206 ein flexibles Vorgehensmodell vor, das sich aus drei Elementen zusammensetzt: *Problemlösungszyklus als Mikrozyklus*, *V-Modell als Makrozyklus* und *Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte*.

1. 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* [DH02, S. 47ff]. Durch Aneinanderreihen und Verschachteln von Vorgehenszyklen lässt sich die Prozessplanung flexibel an die Eigenheiten jeder Entwicklungsaufgabe anpassen.

2. Das V-Modell als Makrozyklus: Das V-Modell auf der Makroebene wurde aus der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst. Es beschreibt das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Erzeugnisse und definiert die wesentlichen Teilschritte *Anforderungen*, *Systementwurf*, *Domänenspezifischer Entwurf* und *Systemintegration* mit gleichzeitiger *Eigenschaftsabsicherung*. Prozessbegleitend fungiert die Modellbildung und -analyse. Bild 3-3 zeigt das V-Modell. Dieses ist fallweise auszuräumen. [VDI2206, S.29]

Anforderungen: 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.

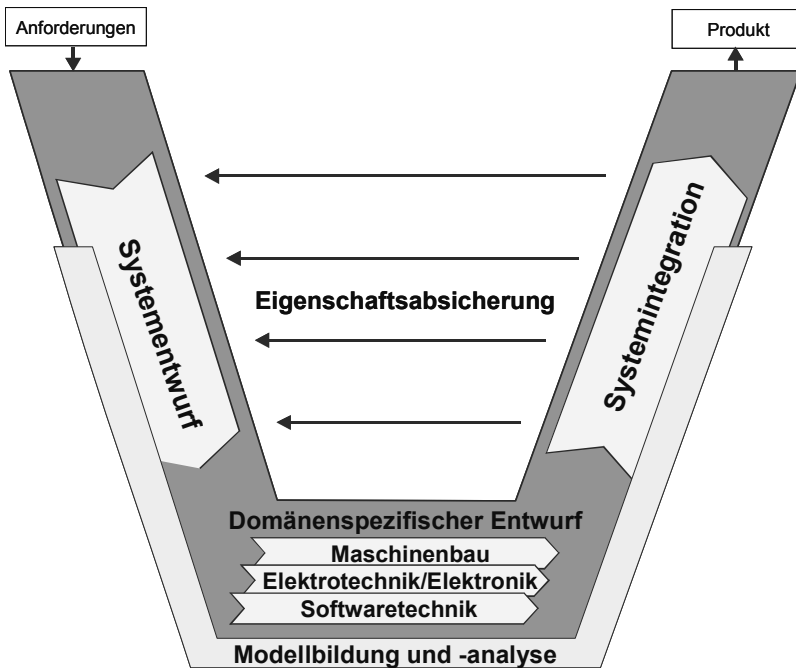


Bild 3-3: Das V-Modell als Makrozyklus [VDI2206, S. 32]

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 Systemeigenschaften müssen mit den gewünschten 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.

Das Ergebnis eines durchlaufenen Makrozyklus ist das **Produkt**. Komplexe mechatronische Erzeugnisse entstehen in der Regel innerhalb mehrerer Durchläufe, in denen das Produkt unterschiedliche Reifegrade erlangt. Reifegrade sind Labormuster, Funktionsmuster und Vorserienprodukt. [VDI2206, S. 30]

Bewertung: Die VDI-Richtlinie 2206 war die erste Richtlinie speziell für mechatronische Systeme. Sie führt bestehende Richtlinien zu einer domänenübergreifenden Systematik zusammen. Daher ist sie insbesondere im domänenspezifischen Entwurf wenig detailliert. Weitere Schwerpunkte sind die Rechnerunterstützung beim Entwurf und die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Weitere Anforderungen Kapitel 2.6 werden nicht erfüllt.

3.1.4 Mechatronik-Entwicklung nach ISERMANN

ISERMANN [Ise99] betrachtet technische Systeme als Prozess mit Ein- und Ausgangsgrößen. Eine motorgetriebene Pumpe ist demnach ein mechanischer Prozess. Mechatronische Systeme besitzen zusätzlich noch elektrische, informationstragende und thermodynamische Teilprozesse, die mit dem mechanischen Prozess gekoppelt sind [Ise99, S. 9]. Die Versorgung des Motors mit elektrischer Energie stellt z.B. den gekoppelten elektrischen Teilprozess dar. Basierend auf diesem Verständnis hat ISERMANN zwölf Vorgehensschritte für die Entwicklung mechatronischer Systeme definiert (Bild 3-4).

1. Prozeszentwurf: Ausgangspunkt ist in der Regel die mechanische Grundkonstruktion einer bekannten Lösung. Dann werden die Teilprozesse analysiert. Ergebnis der Phase ist die schematische Darstellung des Prozesses.

2. Funktionsaufteilung: Nach der Analyse des Systems werden dessen Grundfunktionen zwischen Prozess- und Informationsverarbeitung aufgeteilt. Dabei wird im „mechatronischen Sinne“ überlegt, welche Funktionen einfacher, besser oder kostengünstiger auf digitalelektronischem Weg gelöst werden können.

3. Aktorik, Sensorik und Hilfsenergie: Der Einsatz von Sensoren und Aktoren erhöht die Anpassungsfähigkeit des Systems [Ise99, S. 23]. Sie sind die wesentlichen Schnittstellen zwischen Prozess und Elektronik. Ihre Auswahl erfolgt unter Berücksichtigung der Rand- und Einsatzbedingungen wie Genauigkeit, Energiebedarf und Robustheit.

4. Grundfunktionen der Informationsverarbeitung: Aufgrund der gewählten Sensoren werden die Grundfunktionen der Informationsverarbeitung festgelegt. ISERMANN unterteilt die Informationsverarbeitung in drei Ebenen: Auf unterster Ebene erfolgt die Regelung, auf der mittleren die Überwachung mit Fehlererkennung, auf der obersten Ebene befinden sich Managementfunktionen wie Koordinierung und Optimierung [Ise99, S. 24]. Der Entwurf der Informationsverarbeitung erfordert ein umfassendes Prozesswissen; so hat die konstruktive Auslegung der Mechanik einen großen Einfluss auf die Regelgüte.

5. Bedienungskonzept: Inhalt dieser Phase ist die Interaktion des mechatronischen Systems mit dem Anwender (Mensch-Maschine-Schnittstelle). Dies umfasst die Informationsdarstellung anhand geeignet gestalteter Displays und Bildschirme sowie elektronisch angepasste Bedienelemente (Pedale, Lenkrad).

6. Informationsverarbeitung: Die Möglichkeiten der Mikroelektronik prägen die Hardware-Architektur. Je nach Anwendung und Stückzahl werden Standardprozessoren oder anwendungsspezifische Schaltungen (ASIC) verwendet. Die Kommunikation erfolgt über Bussysteme. Direkt an der Mechanik angebrachte Mikroelektronik ist hoher mechanischer und thermischer Beanspruchung ausgesetzt, ihre mechanische Einbindung daher besonders wichtig.

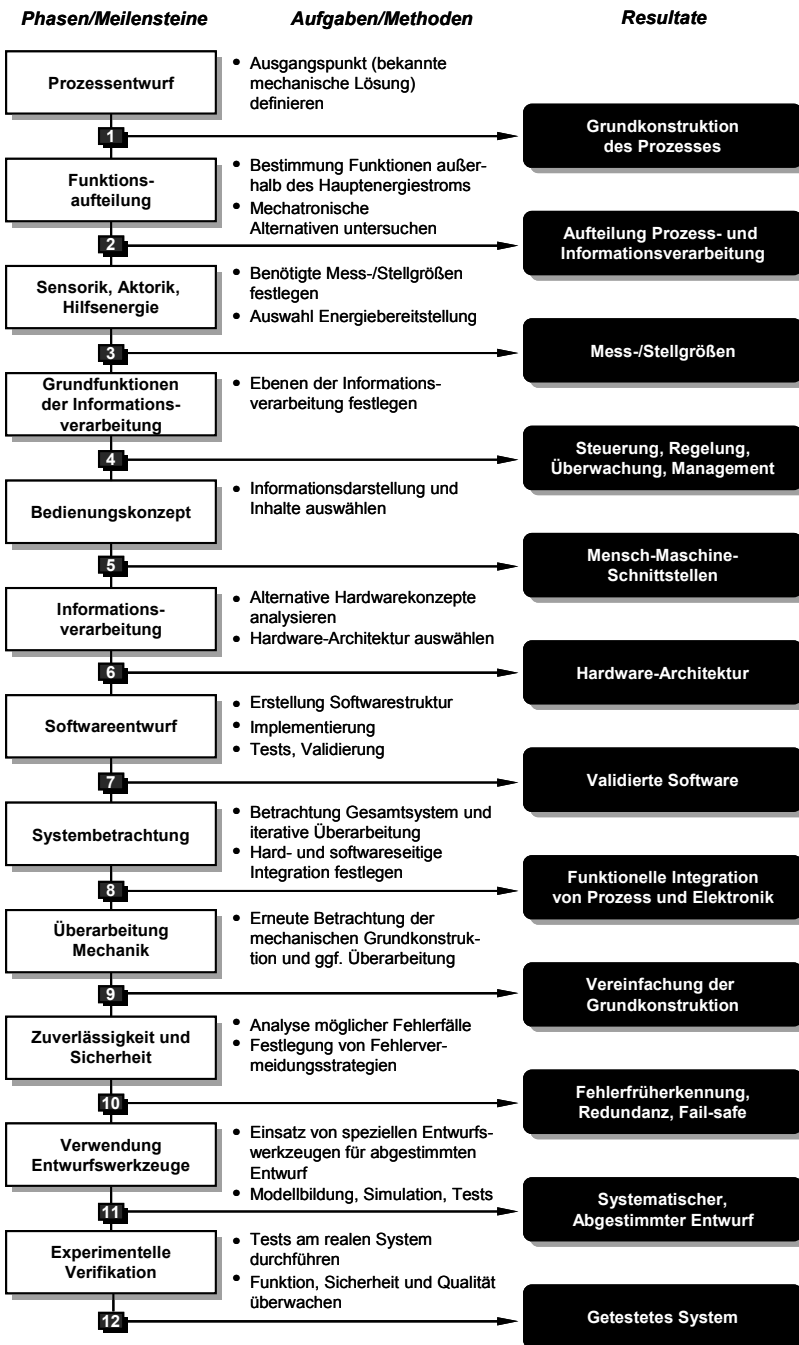


Bild 3-4: Entwurf mechatronischer Systeme nach ISERMANN [Ise99, S. 26]

7. Software-Entwurf: Die Erstellung der Software orientiert sich an dem Vorgehen des Software-Engineerings, also von der Anforderungsdefinition über die Erstellung der Struktur und Festlegung der (prozessorabhängigen) Sprache bis zur Implementierung mit Tests und Validierung. Ergebnis der Phase ist die zum Betrieb der Informationsverarbeitung notwendige validierte Software.

8. Systembetrachtung: In dieser Phase werden Mechanik, Elektronik und Software integriert. Es werden iterativ die Phasen 2 bis 7 durchlaufen und dabei das System als Ganzes und dessen Funktionsaufteilung erneut betrachtet. Falls sich aus der Betrachtung Änderungen ergeben, werden die Phasenergebnisse entsprechend angepasst. Resultat ist das integrierte Gesamtsystem.

9. Überarbeitung der Mechanik: In dieser Phase wird analysiert, ob sich die Grundkonstruktion vereinfachen lässt, z.B. durch den Einsatz dezentraler Antriebe, verstärkten Leichtbau, elektronische Dämpfung, Linearisierung durch Algorithmen und reduzierte Präzisionsanforderungen durch Regelung.

10. Zuverlässigkeit und Sicherheit: Wegen des größeren Funktionsumfangs durch Sensorik, Mikroelektronik und Aktorik kommt der Zuverlässigkeit und Sicherheit eine große Bedeutung zu. Daher wird untersucht, wie das System verbessert werden kann. Dazu zählen Methoden der Fehlererkennung, Fehler-toleranz durch Redundanz und Rekonfiguration (z.B. für Notbetrieb).

11. Verwendung von Entwurfswerkzeugen: Da mechatronische Systeme aufgrund der Komplexität und der verschiedenen beteiligten Domänen häufig verteilt entwickelt werden, ist der abgestimmte Entwurf aller Komponenten durch den Einsatz von speziellen Werkzeugen zu unterstützen. ISERMANN empfiehlt CAX-Werkzeuge für die jeweiligen Domänen, Modellbildung und Simulation des Verhaltens sowie rechnergestützten Reglerentwurf. [Ise99, S. 27]

12. Experimentelle Verifikation: Das mechatronische Gesamtsystem wird abschließend nach bewährten Qualitätsprüfungsmethoden auf Zuverlässigkeit und Sicherheit geprüft und die Funktionen getestet. Dies geschieht auf Prüfständen, wobei Hardware-in-the-loop-Simulationen besonders wichtig sind.

Bewertung: Das Vorgehen nach ISERMANN ist domänenübergreifend ausgeprägt; alle Domänen werden berücksichtigt. Allerdings ist das Vorgehen stark sequentiell, die Teilbereiche werden wenig integrativ entwickelt. Zudem fokussiert ISERMANN die zweite Klasse mechatronischer Systeme (Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten). Das Vorgehensmodell ist wenig detailliert beschrieben, es eignet sich daher nicht als Leitfaden für den Praktiker. Domänenspezifische Leitfäden sind weiterhin notwendig. Weitere Anforderungen erfüllt das Vorgehen nach ISERMANN nicht.

3.1.5 Mechatronik-Entwicklung nach LÜCKEL

Das Vorgehensmodell nach LÜCKEL [LKS00] basiert auf dem Vorgehen von PAHL/BEITZ [PB07], nimmt sich aber besonders des Komplexitätsproblems mechatronischer Systeme an. Zur Lösung dieses Problems nutzt LÜCKEL Methoden zur horizontalen (Modularisierung) und vertikalen (Hierarchisierung) Strukturierung von Systemen aus dem Mikrochip-Entwurf. LÜCKEL unterscheidet drei Typen von mechatronischen Systemen: Mechatronische Funktionsmodule MFM (Antriebs Elemente mit eigener lokaler Informationsverarbeitung), Autonome Mechatronische Systeme AMS (gekoppelte MFM) und Vernetzte Mechatronische Systeme VMS (über Informationsflüsse vernetzte AMS) [LKS00, S. 15]. Bild 3-5 zeigt diese Hierarchisierung mechatronischer Systeme am Beispiel eines Fahrzeugs: Ein aktives Federbein stellt dabei ein MFM dar, das Fahrzeug entspricht einem AMS, während beim Kreuzungsmanagement VMS auftreten.

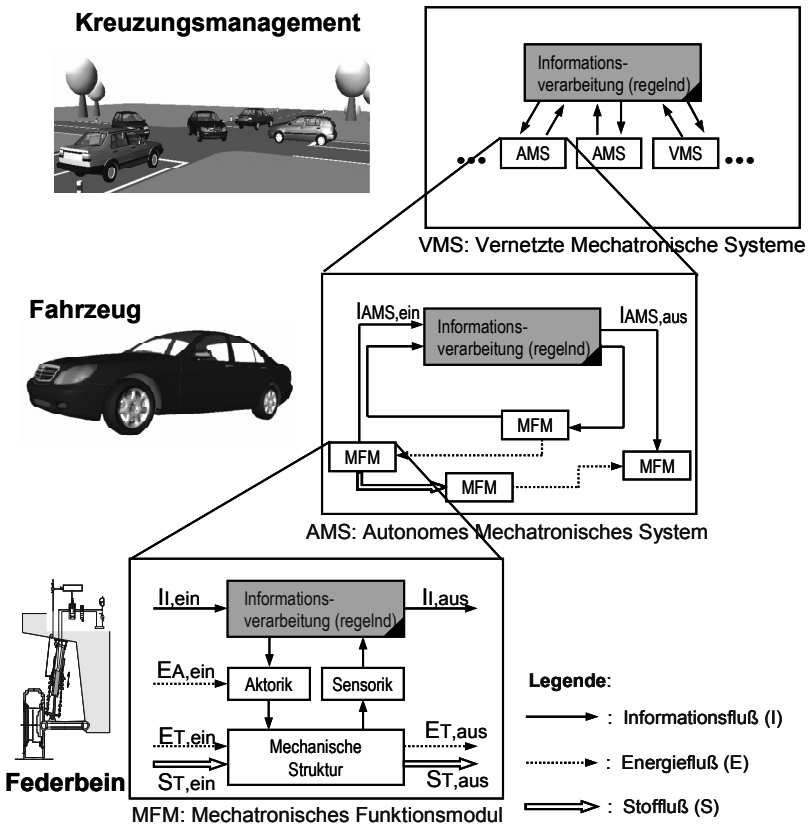


Bild 3-5: Hierarchien mechatronischer Systeme nach LÜCKEL [LKS00, S. 15]

LÜCKEL betrachtet die Mechatronik als Weiterentwicklung der Regelungstechnik. Im Fokus stehen daher die frühzeitige Berücksichtigung des dynamischen Systemverhaltens sowie der Einsatz rechnergestützter Methoden. Das „klassische“ Vorgehen der Konstruktion (Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) wird dazu um die *Mechatronische Komposition* ergänzt (Bild 3-6).

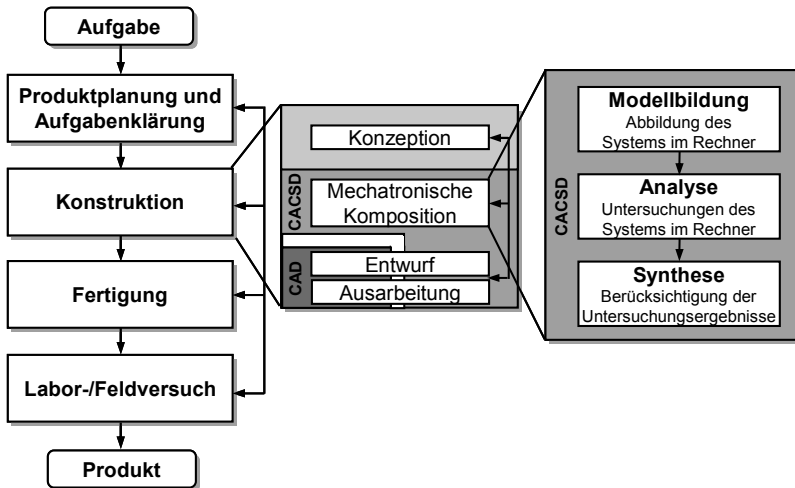


Bild 3-6: Der mechatronische Entwurf nach LÜCKEL [LKS00, S. 16]

Die *Mechatronische Komposition* unterteilt sich in die drei Phasen *Modellbildung*, *Analyse* und *Synthese*:

Bei der **Modellbildung** wird das wesentliche physikalische Verhalten des Systems abgebildet. Dies geschieht mit Hilfe von Software-Werkzeugen, z.B. CAMEL-View (Computer Aided Mechatronics Laboratory – Visual Engineering Workbench). Das Modell muss dabei den Ansprüchen des Mechatronikentwurfs (funktions- statt gestalterorientierte Sicht, Strukturierung des Systems mittels Blockdiagramme) gerecht werden. So entstehen Funktionsgruppen (Mechatronische Funktionsmodule MFM), die separat modelliert werden.

Im folgenden **Analyseschritt** werden die Bewegungsmöglichkeit und das gewünschte Bewegungsverhalten ermittelt und Aussagen zum Arbeitsraum, zu benötigten Kräften, dem Zeit- und Frequenzverhalten und zur Robustheit (Stabilität und Empfindlichkeit) gemacht. So kann analysiert werden, ob das System die gestellten Anforderungen wie geplant erfüllt.

In der abschließenden **Synthese** werden die Ergebnisse der Analyse genutzt, um das System zu verbessern und das Modell anzupassen. Regelungskonzepte werden entworfen und in einem iterativen Vorgehen modelliert, analysiert und wieder zur Verbesserung des Systemverhaltens bzw. des Modells benutzt.

Die *Mechatronische Komposition* wird solange durchlaufen, bis das System ausreichend optimiert wurde. Entwurf und Ausarbeitung finden mit Hilfe von CAD-Werkzeugen statt. Treten dabei Änderungen mit Einfluss auf das Verhalten auf, so sind deren Auswirkungen in der mechatronischen Komposition zu berücksichtigen. Andernfalls folgen Fertigung und Labor- bzw. Feldversuch.

Bewertung: Auch LÜCKEL betrachtet allein die zweite Klasse mechatronischer Systeme. Die *Mechatronische Komposition* basiert auf rechnerbasierter Modellbildung und Simulation. Die Domäne Elektronik wird nicht betrachtet. Das Vorgehen nach LÜCKEL erfüllt keine Anforderung aus Kapitel 2.6 und eignet sich daher nicht für die Entwicklung mechanisch-elektronischer Systeme.

3.1.6 Mechatronik-Entwicklung nach KALLENBACH

Der Entwurfsprozess nach KALLENBACH [KBS+97] orientiert sich an dem Vorgehen im klassischen Maschinenbau, sein Schwerpunkt ist aber der funktionale Entwurf und die rechnergestützte Umsetzung. Es handelt sich um einen iterativen Top-Down-Prozess in Form eines Phasenmodells (siehe Bild 3-7).

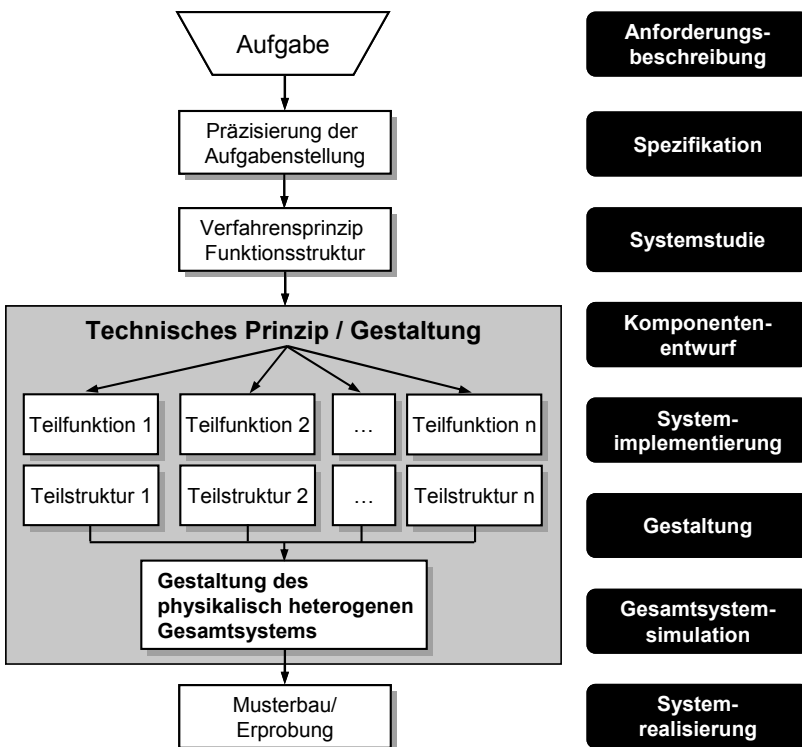


Bild 3-7: Entwurf mechatronischer Systeme nach KALLENBACH [KBS+97, S. 6]

Zunächst wird im Rahmen der **Anforderungsbeschreibung** die Aufgabe analysiert und anschließend in der **Spezifikation** präzisiert. Dies muss sehr gründlich geschehen, da sonst wichtige Informationen nicht oder nur unvollständig in den Entwurfsprozess einbezogen werden und sich die Zahl der Iterations-Schleifen erhöht [KBS+97, S. 6]. In der **Systemstudie** erfolgt die Aufstellung der hierarchischen Funktionsstruktur. Dieser Schritt umfasst die Zerlegung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen. In den anschließenden Phase **Komponentenentwurf** werden Elemente gesucht und gestaltet, die diese Teilfunktionen möglichst optimal erfüllen. Dies geschieht im ständigen Wechsel zwischen Funktions- und Gestaltsicht. Diese Phase ist laut KALLENBACH von besonderer Bedeutung [KBS+97, S. 7]. Die Elemente werden in der Phase **Systemimplementierung** zusammengeführt und auf Verträglichkeit analysiert. Nach einer Bewertung wird die vielversprechendste Elementkomposition ausgewählt. Damit steht erstmals eine Art Konzept des Systems fest. Die Phase **Gestaltung** umfasst die Bestimmung des Materials und der Geometrie der Elemente. Die Elemente werden so gestaltet, dass sie die vorgegebenen Anforderungen erfüllen und gleichzeitig kostengünstig gefertigt werden können [KBS+97, S. 9]. Als letzter Schritt der Entwicklung erfolgt die **Gesamtsystemsimulation**, in der die angesprochenen Rechnerwerkzeuge zur virtuellen Eigenschaftsüberprüfung eingesetzt werden, bevor in der Phase **Systemrealisierung** Prototypen des Systems gebaut und getestet werden.

Bewertung: KALLENBACH orientiert sich stark am klassischen Maschinenbau. Besonderes Merkmal ist der iterative Wechsel zwischen Funktions- und Gestaltsicht in den Phasen *Systemstudie* bis *Gestaltung*. Auf diese Weise wird das domänenübergreifende Vorgehen unterstützt. Das Vorgehen ist allerdings wenig detailliert, Methoden oder Richtlinien werden nicht empfohlen. Auch Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem werden nicht berücksichtigt. KALLENBACH empfiehlt jedoch den Einsatz von Wissensbasen.

3.1.7 Mechatronik-Entwicklung nach LINDEMANN

Basierend auf der Erkenntnis, dass es ideale Vorgehensmodelle aufgrund der Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Entwicklungsprozesse nicht geben kann, hat LINDEMANN das *Münchener Vorgehensmodell* (MVM) entwickelt [Lin05]. Es wird als Hilfsmittel zum Planen und Orientieren in Problemlösungsprozessen und zum Zerlegen komplexer Probleme in handhabbare Elemente verwendet. Darüber hinaus enthält es ein Standard-Vorgehen für Anfänger, ist jedoch flexibel genug, um von erfahrenen Entwicklern an die jeweilige Aufgabe angepasst werden zu können [Lin05, S. 39].

Das Münchener Vorgehensmodell besteht aus sieben Schritten, die sequenziell und/oder iterativ durchlaufen werden (Bild 3-8):

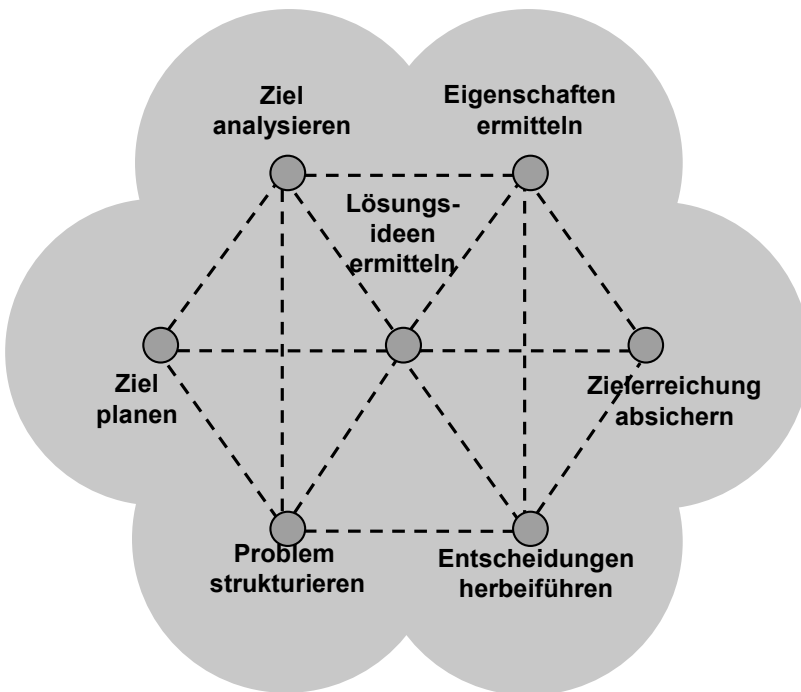


Bild 3-8: Das Münchener Vorgehensmodell nach LINDEMANN [Lin05, S. 39]

- **Ziel planen:** Die Situation und vorhandene Einflussgrößen (Markt, Produktportfolio, Gesetzeslage) werden analysiert sowie übergeordnete Anforderungen geklärt.
- **Ziel analysieren:** Konkrete und detaillierte Anforderungen an das Produkt werden geklärt und Zielkonflikte herausgearbeitet. Die Anforderungen werden anhand einer Anforderungsliste dokumentiert.
- **Problem strukturieren:** Die Handlungsschwerpunkte werden ermittelt, indem das Problem in Teilprobleme zerlegt wird. Wesentliche Kundenanforderungen und technische Widersprüche bilden die Schwerpunkte. Für diese wird ein Problemmodell mit konkreten Entwicklungszielen abgeleitet.
- **Lösungs-ideen ermitteln:** Es werden vorhandene und neue Lösungen gesucht und für die Teilprobleme vorausgewählt. Abschließend werden alternative Teillösungen zu möglichst optimalen Gesamtlösungsvorschlägen kombiniert.

- **Eigenschaften ermitteln:** Die Ausprägungen des technischen Systems und der Lösungsalternativen werden hinsichtlich der relevanten Merkmale untersucht.
- **Entscheidungen herbeiführen:** Die Alternativen werden bewertet und ausgewählt.
- **Zielerreichung absichern:** Zur Verminderung von Risiken werden die Ziele abgesichert. Mögliche Risiken werden hierbei erkannt und bewertet. Gegebenenfalls werden Maßnahmen zur Risiko-Minimierung festgelegt.

Diese Sequenz der Tätigkeiten stellt zugleich den Standardweg durch das *Münchener Vorgehensmodell* dar. LINDEMANN empfiehlt dem erfahrenen Entwickler, das Vorgehen an die Entwicklungsaufgabe anzupassen und ggf. alternativ, iterativ oder rekursiv das *Münchener Vorgehensmodell* zu durchlaufen. [Lin05, S. 42ff]

LINDEMANN schlägt eine Reihe von Methoden der Produktentwicklung vor, die während der einzelnen Schritte angewendet werden können. Dazu muss für die jeweils gegebenen Randbedingungen (Zeit, Budget, etc.) die passende Methode ausgewählt und bei Bedarf angepasst werden. Zu diesem Zweck wurde das *Münchener Methodenmodell* entwickelt, das die Schritte zur Klärung des Einsatzes, zur Auswahl, zur Adaption und zur Anwendung der Methoden enthält [Lin05, S. 50].

Bewertung: Das *Münchener Vorgehensmodell* stellt ein generisches Vorgehen dar, welches individuell an die Entwicklungsaufgabe angepasst werden kann. Es orientiert sich dabei an dem Problemlösungszyklus aus dem *Systems Engineering*. Das *Münchener Vorgehensmodell* beschreibt ein allgemeines Vorgehen zur Problemlösung für alle Arten von Aufgaben und ist deshalb domänenübergreifend einsetzbar. Es ist jedoch zu allgemein gehalten, um als Leitfaden für Praktiker zu dienen. Das *Münchener Vorgehensmodell* ist einfach zu handhaben. Es verweist bei jedem Schritt auf anzuwendende Methoden, die auch ausführlich erläutert werden. Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem werden nicht berücksichtigt. Die weiteren Anforderungen der Entscheidungsunterstützung zur Auswahl des MID-Verfahrens und den Einsatz einer Wissensbasis werden nicht erfüllt, es ist daher nur bedingt für die MID-Entwicklung geeignet.

3.1.8 Systematik nach EQUAL

Im Rahmen des Verbundprojekts EQUAL⁸ entstand das *3-Ebenen-Vorgehensmodell* nach BENDER (Bild 3-9). Es wurde speziell für die Entwicklung von eingebetteten Systemen entworfen und berücksichtigt daher neben der Mechanik und Elektronik auch die Software [Ben05, S. 44].

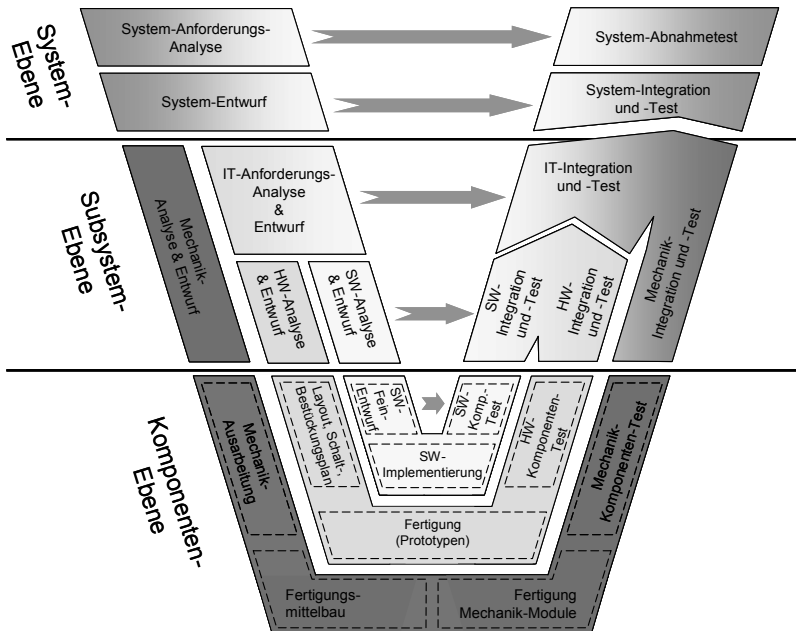


Bild 3-9: Das 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER [Ben05, S. 45]

Zur Beherrschung der Komplexität von multidisziplinären Entwicklungsprozessen ist das Modell in drei Ebenen unterteilt:

System-Ebene: Auf der obersten Ebene werden die gestellten Anforderungen einer System-Anforderungsanalyse unterzogen. Im folgenden System-Entwurf wird ein abstrakter Systemplan erstellt, der die Hauptfunktionen des Produkts und deren gegenseitige Abhängigkeiten berücksichtigt. Es entsteht eine logische Systemarchitektur, die anschließend in Subsysteme (Funktionsblöcke) partitioniert wird. Dabei dürfen zwischen den Subsystemen keine zu engen bzw. zahlreichen Kopplungen existieren. Nach der Partitionierung werden die Subsysteme den Disziplinen Mechanik und Informationstechnik zugeordnet.

⁸ Methoden zur Unterstützung der entwicklungsbegleitenden Qualitätssicherung von eingebetteter Software (EQUAL), gefördert vom BMBF im Rahmen der „Forschung für die Produktion von morgen“.

Subsystem-Ebene: Auf der zweiten Ebene wird wiederum eine Anforderungsanalyse der nun betrachteten Teilsysteme durchgeführt. Dabei werden die eng verzahnten Disziplinen Software und Elektronik (Hardware) noch als ein Subsystem IT betrachtet und erst später in die Subsysteme Software und Hardware aufgeteilt. Im Rahmen eines ersten Entwurfs für die Teilsysteme werden dann die auf System-Ebene erarbeiteten Funktionen verfeinert. Die betrachteten Subsysteme werden in einzelne Komponenten zerlegt, die jeweils einer Domäne zugeordnet werden können. Hierbei entsteht eine technische IT-Systemarchitektur.

Komponenten-Ebene: Die eigentliche Umsetzung des Produkts erfolgt auf der untersten Ebene. Hier werden die aus der modularen Gliederung resultierenden Komponenten arbeitsteilig entwickelt. Darüber hinaus erfolgen hier Fertigung und Tests erster Prototypen. Die Komponenten-Ebene stellt somit den Übergang zwischen den Entwicklungs- und den Prüftätigkeiten her. Im Anschluss an die Realisierung und das Testen der Komponenten werden diese sukzessive zu einem Gesamtsystem integriert und als Einheit erneut getestet. Dies erfolgt zunächst getrennt nach Domänen und anschließend interdisziplinär. Abgeschlossen wird der Entwicklungsprozess durch den System-Abnahmetest. Bei negativem Ausgang der Komponenten-, Subsystem- und Systemtests müssen entsprechende Korrekturen und damit auch Rücksprünge innerhalb des Modells vorgenommen werden. Das *3-Ebenen-Vorgehensmodell* berücksichtigt dies, indem es im Sinne einer iterativen Vorgehensweise weitere Entwicklungszyklen vorsieht [Ben05, S.43ff].

Bewertung: Das *3-Ebenen-Vorgehensmodell* orientiert sich am V-Modell der VDI-Richtlinie 2206, beschreibt allerdings die Domänen Mechanik, Elektronik und Software wesentlich detaillierter als die Richtlinie. Dadurch ist es als Leitfaden für die Mechatronik-Entwicklung prinzipiell gut geeignet. Weiterhin ist das *3-Ebenen-Vorgehensmodell* einfach und verständlich aufgebaut. Allerdings werden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem nicht behandelt und auch keine Unterstützung bei der Auswahl des MID-Verfahrens gegeben. Zwar wird das 3-Ebenen-Vorgehensmodell durch eine Wissensbasis unterstützt, diese fokussiert sich jedoch auf den Softwareentwurf. Trotzdem ist das Vorgehensmodell ein guter Ansatzpunkt für die Entwicklung mechanisch-elektronischer Baugruppen.

3.1.9 Systematik nach INERELA

Im Rahmen des Verbundprojekts INERELA⁹ ist ein Vorgehensmodell entstanden, das auf die Besonderheiten bei der Entwicklung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen ausgerichtet ist. Das Vorgehen gliedert sich in zehn Phasen, die einen Überblick über den gesamten Entwicklungsprozess geben. Jede Phase wird durch Prozessschritte weiter konkretisiert. Bild 3-10 zeigt die Phasen des Referenzprozesses sowie beispielhaft die Detaillierung der Phase „Produktkonzipierung“. Die einzelnen Phasen werden hier kurz vorgestellt.

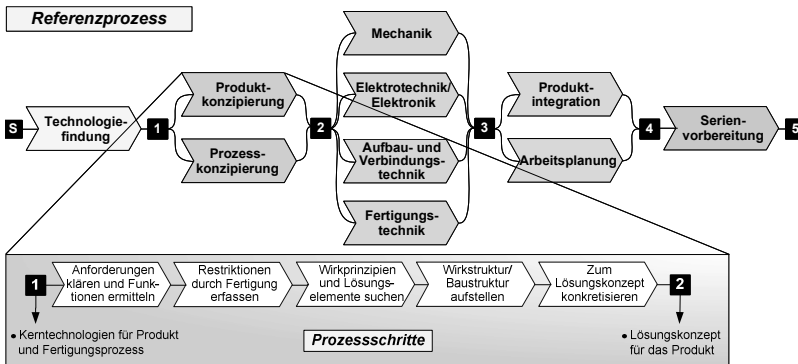


Bild 3-10: Referenzprozess zur Entwicklung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen mit Prozessschritten der Konzipierung [GF06]

Technologiefindung: Auf Basis der Technologiekompetenz sowie allgemeiner Technologietrends werden zu Beginn Kerntechnologien für das Produkt und dessen Fertigung identifiziert. Dies erfolgt durch die Problemerkennung, Zieldefinierung, Technologiefindung und Festlegung der Kerntechnologien.

Produktkonzipierung: Anhand der Kerntechnologien wird das Lösungskonzept des Produkts erarbeitet. Zuerst werden die Anforderungen geklärt und die Funktionen ermittelt. Anschließend werden die Restriktionen durch die Fertigung erfasst und unter deren Berücksichtigung Wirkprinzipien und Lösungselemente gesucht. Diese werden zur Wirk- und Baustruktur konkretisiert und anschließend bewertet. Ergebnis ist das Lösungskonzept.

Prozesskonzipierung: Diese Phase erfolgt parallel zur Produktkonzipierung. Auf Basis der Kerntechnologien werden zunächst Anforderungen an die Fertigung ermittelt und Restriktionen durch das Produkt erfasst. Danach erfolgt die Auswahl der Fertigungstechnologien. Zuletzt werden die Arbeitsvorgänge bestimmt und zum Lösungskonzept für das Produktionssystem verkettet.

⁹ Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen (INERELA), gefördert vom BMBF im Rahmen der „Forschung für die Produktion von morgen“.

Mechanik: In dieser Phase erfolgt die Festlegung der Gestalt der Bauteile und ihres Bauzusammenhangs. Zuerst werden die mechanischen Komponenten grob- und dann feingestaltet. Das abschließende Ausarbeiten der Baugruppe führt zum Komponentenentwurf des Produkts.

Elektrotechnik/Elektronik: In dieser Phase erfolgen die Auswahl der elektronischen Bauelemente sowie die Entwicklung des Schaltungslayouts. Dies erfolgt durch das Definieren von Funktionsblöcken, den Entwurf des Schaltungsträgers sowie das Platzieren und Verbinden der Bauelemente. Ergebnis dieser Schritte ist das Schaltungslayout als Teil des Komponentenentwurfs.

Aufbau- und Verbindungstechnik: Die verwendete Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) wird in dieser Phase festgelegt. Zuerst werden die Anforderungen und Einschränkungen hinsichtlich der Montage- und Kontaktierungsverfahren analysiert. Anschließend wird ein Konzept für die Aufbau- und Verbindungstechnik mit den erforderlichen Prüfverfahren erstellt.

Fertigungstechnik: Analog zur AVT wird der Fertigungsprozess erstellt. Als erstes erfolgt die Entwicklung der Prozessschritte, gefolgt von einer Verträglichkeits- und Machbarkeitsprüfung. Nach abschließender Ausarbeitung der Prozesskette werden die Prüfverfahren ausgewählt.

Produktintegration: In dieser Phase erfolgt die Zusammenführung der mechanischen und elektronischen Komponenten zur räumlich-elektronischen Baugruppe. Hierzu werden als erstes die Teilstrukturen zusammengeführt und Labormuster aufgebaut und getestet. Erkannte Inkompatibilitäten müssen eliminiert und das Produkt an das Fertigungsverfahren angepasst werden.

Arbeitsplanung: Parallel zur Produktintegration erfolgt die Arbeitsablauf- und Arbeitsmittelplanung. Schwerpunkt der Arbeitsablaufplanung ist die Gestaltung und Optimierung der Fertigungs- und Montageprozesse sowie der dazugehörigen Prüfpläne. In der Arbeitsmittelplanung werden die Betriebsmittel ausgewählt, die Werkzeuge konstruiert und das Materialflusssystem entworfen.

Serienvorbereitung: In der letzten Phase des Referenzprozesses werden seriennahe Prototypen von Produkt und Fertigungssystem aufgebaut und getestet. Anschließend wird eine Vorserienproduktion gestartet, die der letzten Erprobung und Verbesserung von Produkt, Werkzeugen, Verfahren und Vorrichtungen dient. Ergebnis dieser Phase sind das vollständig spezifizierte und validierte Produkt und das Fertigungssystem. [GF06, S.118ff]

Die INERELA-Systematik beinhaltet eine Wissensbasis, in der Simulationsmodelle von Systemkomponenten abgelegt sind. Die Entwickler können über Suchmechanismen darauf zugreifen und die Modelle in Entwicklungswerkzeuge übernehmen. Ebenfalls enthalten sind Bibliotheken mit Wirkprinzipien, Lösungsansätzen und Fertigungsverfahren für die Integration von Mechanik und

Elektronik. Sie wurde als Intranet-basiertes Informationssystem realisiert und besteht aus Produktdatenmodellen und dem Informationsmanager zur Verwaltung und Bereitstellung der Informationen. [GF06, S. 211ff]

Bewertung: Das im INERELA-Projekt erarbeitete Vorgehensmodell gibt Ingenieuren einen übersichtlichen und leicht verständlichen Leitfaden an die Hand. Die Beschreibung der Entwicklungstätigkeiten ist detailliert. Methoden und Richtlinien werden allerdings nicht empfohlen. Die Domänen Mechanik und Elektrotechnik werden gleichberechtigt in den Entwicklungsprozess eingebunden, die Softwaretechnik wird nicht betrachtet. Ein großer Vorteil des Modells liegt in der früh beginnenden parallelen Entwicklung von Produkt und Fertigungsprozess. Wechselwirkungen werden jedoch nicht angesprochen. Im INERELA-Projekt wurde eine Wissensbasis erarbeitet, um auf das erarbeitete Wissen schnell und einfach zugreifen zu können. Die INERELA-Systematik ist ein guter Ansatz für eine Entwicklungssystematik für MID-Teile.

3.2 Spezifikationstechniken für das Produkt und das Produktionssystem

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, müssen mechanisch-elektronische Baugruppen domänenübergreifend entwickelt und dabei ihre Fertigung berücksichtigt werden. Solche Produkte und deren Produktionssysteme sind daher domänenübergreifend verständlich und präzise zu beschreiben. Das erfordert geeignete Spezifikationstechniken. In diesem Kapitel werden zwei Spezifikationstechniken vorgestellt, die am Heinz Nixdorf Institut entwickelt wurden.

3.2.1 Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme nach FRANK

Die Spezifikationstechnik nach FRANK wurde speziell für die domänenübergreifende Spezifikation intelligenter mechatronischer Systeme entwickelt und ermöglicht eine intuitive und domänenübergreifende Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Sie entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus* der Universität Paderborn. Die Spezifikationstechnik beruht auf acht Partialmodellen: *Anforderungen, Anwendungsszenarien, Funktionen, Verhalten, Gestalt, Wirkstruktur, Zielsystem* und *Umfeld* (Bild 3-11). Jedes Partialmodell bildet unterschiedliche Sichten auf das Produkt ab. Beschrieben werden die Partialmodelle über ein Set semiformaler Spezifikationstechniken. Je nach Partialmodell sind das Tabellen, Graphen, Struktur- und Ablaufdiagramme sowie Gestaltmodelle [Fra06, S. 79ff].

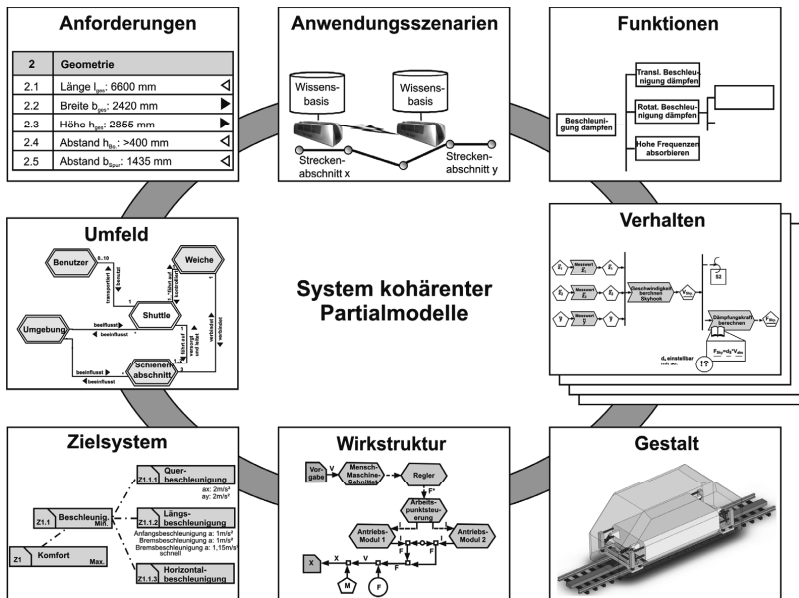


Bild 3-11: Vernetztes System von Partialmodellen zur Beschreibung eines selbstoptimierenden Systems nach FRANK [Fra06, S. 80]

Für die Beschreibung integrierter mechanisch-elektronischer Baugruppen sind nicht alle Partialmodelle von gleicher Relevanz: Die wesentlichen Partialmodelle sind Anforderungen, Umfeld, Funktionen, Wirkstruktur und Gestalt.

Partialmodell Anforderungen: Dieses Partialmodell repräsentiert die Sicht auf die Anforderungen an das Produkt und basiert auf der Anforderungsliste. Es wird zwischen Wunsch-, Ziel- und Festforderungen unterschieden. Jede Anforderung wird verbal beschrieben und falls möglich durch Attribute und deren Ausprägungen konkretisiert. [Fra06, S. 104]

Partialmodell Umfeld: Das Modell beschreibt das Umfeld des zu entwickelnden Systems und seine Einbettung darin. Relevante Einflussbereiche und Einflüsse (z.B. Außentemperatur, mechanische Belastungen) werden identifiziert und Wechselwirkungen zwischen den Einflüssen sowie die Möglichkeit des gemeinsamen Auftretens untersucht. [Fra06, S. 105]

Partialmodell Funktionen: Das Partialmodell Funktionen enthält eine hierarchische Gliederung der Gebrauchsfunktionen zur Definition der grundsätzlichen Funktionalität des Systems. Eine Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen. Bei den Funktionen handelt es sich um herkömmliche Funktionen oder um Funktionen zur Selbstoptimierung. [Fra06, S. 110]

Partialmodell Wirkstruktur: In der Wirkstruktur werden Systemelemente, deren Merkmale und Beziehungen untereinander abgebildet. Ziel ist die Darstellung der grundsätzlichen Struktur des Systems. Systemelemente repräsentieren die Lösungsmuster für die Produktfunktionen. Sie werden in Form von Flussbeziehungen (Energie-, Stoff- und Informationsfluss) miteinander verknüpft. [Fra06, S. 111f]

Partialmodell Gestalt: Dieses Partialmodell beinhaltet Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung sowie Art der Wirkflächen und der Wirkorte des Systems. Schon während der Konzipierung können erste grobe Angaben über die Gestalt des Systems gemacht werden. Im weiteren Verlauf der Entwicklung werden hieraus zunächst grobe, dann detaillierte Gestaltmodelle erstellt. Die Modellierung der Gestalt erfolgt über Flächen- und Volumenmodelle. [Fra06, S. 115f]

Bewertung: Die Spezifikationstechnik nach FRANK wurde für selbstoptimierende Systeme entwickelt, lässt sich aber auf jedes mechatronische System übertragen. Sie ist komplex, aber intuitiv verständlich. Fokus der Spezifikationstechnik ist die Phase „Konzipierung“. Eine Verwendung in späteren Phasen ist jedoch möglich. Die Besonderheiten von Produktionssystemen werden in dieser Spezifikationstechnik nicht berücksichtigt.

3.2.2 Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen nach MICHELS

Die Spezifikationstechnik nach MICHELS dient der integrativen Beschreibung mechatronischer Produkte und den zugehörigen Produktionssystemen auf Konzeptebene. Im Fokus stehen dabei die gegenseitigen Wechselwirkungen. MICHELS erweitert dazu die Spezifikationstechnik zur Beschreibung selbstoptimierender Systeme nach FRANK (vgl. Kap. 3.2.1) um Konstrukte und Modellierungsregeln, die sich auf das Produktionssystem beziehen. MICHELS Spezifikationstechnik beruht ebenfalls auf Partialmodellen, die unterschiedliche Sichten abbilden. Zur Abbildung der Produktkonzeption werden die Partialmodelle Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten, Zustandsfolge und Gestalt benutzt (siehe Bild 3-12). Die zugehörige Produktionssystemkonzeption wird durch die Partialmodelle Prozessfolge, Produktionsstruktur, Verhalten und Gestalt spezifiziert. Die so beschriebenen Konzeptionen werden durch die Partialmodelle Lösungsmuster, Werkstoff und Fertigungstechnologie ergänzt. Damit werden die Grundlagen für die Produkt- und Produktionssystementwicklung abgebildet [Mic06, S. 87ff].

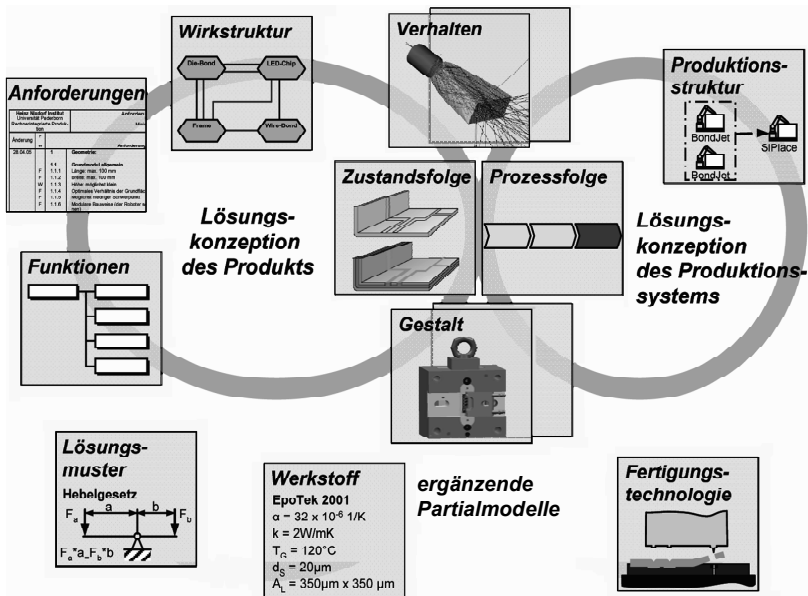


Bild 3-12: Partialmodelle zur integrativen Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen nach MICHELS [Mic06, S. 90]

Für die Produktionssystementwicklung sind die Partialmodelle Prozessfolge und Produktionsstruktur von besonderer Bedeutung. Sie werden daher näher erläutert. Das **Partialmodell Prozessfolge** beschreibt die logische Abfolge der Arbeitsvorgänge. Es gibt Arbeitsvorgänge zur Einzelteilmontage und zur Montage. Arbeitsvorgänge zur Einzelteilmontage führen den Zwischenzustand eines Bauteils in einen neuen Zustand. Montagevorgänge führen mehrere Bauteile und Baugruppen zu einer neuen Baugruppe zusammen. Arbeitsvorgänge werden von Fertigungsmitteln durchgeführt. Symbol für einen Arbeitsvorgang ist der Blockpfeil [Mic06, S. 111f]. Das **Partialmodell Produktionsstruktur** beschreibt die Fertigungsmittel sowie ihre Eigenschaften und Beziehungen. Fertigungsmittel sind die maschinellen Anlagen, Werkzeuge und Vorrichtungen zur Durchführung der Arbeitsvorgänge. Zwischen den Fertigungsmitteln gibt es Beziehungen in Form von Materialflüssen [Mic06, S. 113f].

Bewertung: Die Spezifikationstechnik nach MICHELS stellt eine Ergänzung der Spezifikationstechnik nach FRANK dar. Sie ist intuitiv verständlich und erleichtert Ingenieuren aus unterschiedlichen Disziplinen die Kommunikation. Die Spezifikationstechnik nach MICHELS wird schwerpunktmäßig in der Phase der Konzipierung verwendet, kann jedoch auch in späteren Phasen benutzt werden. Ihre besondere Stärke ist die ganzheitliche Abbildung von Produkt- und Produktionssystemkonzeption.

3.3 MID-spezifische Methoden und Werkzeuge

Für die Entwicklung von mechatronischen Systemen in der Technologie MID existieren spezifische Methoden und Werkzeuge. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt und erläutert.

3.3.1 Eigenschaftskarten der MID-Verfahren

Die einzelnen MID-Verfahren besitzen unterschiedliche Eigenschaften: Beispielsweise haben Laserstrukturierung und Zweikomponentenspritzguss eine hohe dreidimensionale Gestaltungsfreiheit, Heißprägen besitzt eine sehr kurze Prozesskette usw.

Die Eigenschaften der MID-Verfahren beschreibt PEITZ [Pei08] anhand von Eigenschaftskarten. Diese beinhalten eine Beschreibung der Prozesskette, eine Bewertung des Verfahrens anhand von acht Merkmalen sowie eine kurze Ausprägungsbeschreibung der Merkmale. Bild 3-13 zeigt beispielhaft die Eigenschaftskarte des MID-Verfahrens *Laserstrukturierung*. PEITZ hat insgesamt vier Eigenschaftskarten erstellt, für die Verfahren *Laserstrukturierung*, *Zweikomponentenspritzguss*, *Heißprägen* und *Folienhinterspritzen*.

Die Eigenschaftskarten helfen, den passenden Herstellprozess für die MID-Prinziplösung auszuwählen. Dazu wird zunächst das Merkmalsprofil des Produkts in Form eines Spinnendiagramms erstellt (siehe Kapitel 4.4.3) und anschließend mit dem Eigenschaftsprofil des MID-Verfahrens verglichen. Dies geschieht anhand der Überdeckung der Spinnendiagramme. Die Merkmalerfüllung jeder Verfahrenseigenschaft kann so überprüft werden. Besitzt das Produkt z.B. eine sehr dreidimensionale Leiterbahnführung, kann dieses Produktmerkmal direkt mit der Verfahrenseigenschaft „3D-Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen“ verglichen werden. Je größer die Überdeckung des Eigenschaftsprofils des MID-Verfahrens mit dem Merkmalsprofil des Produkts ist, desto besser ist das Verfahren geeignet.

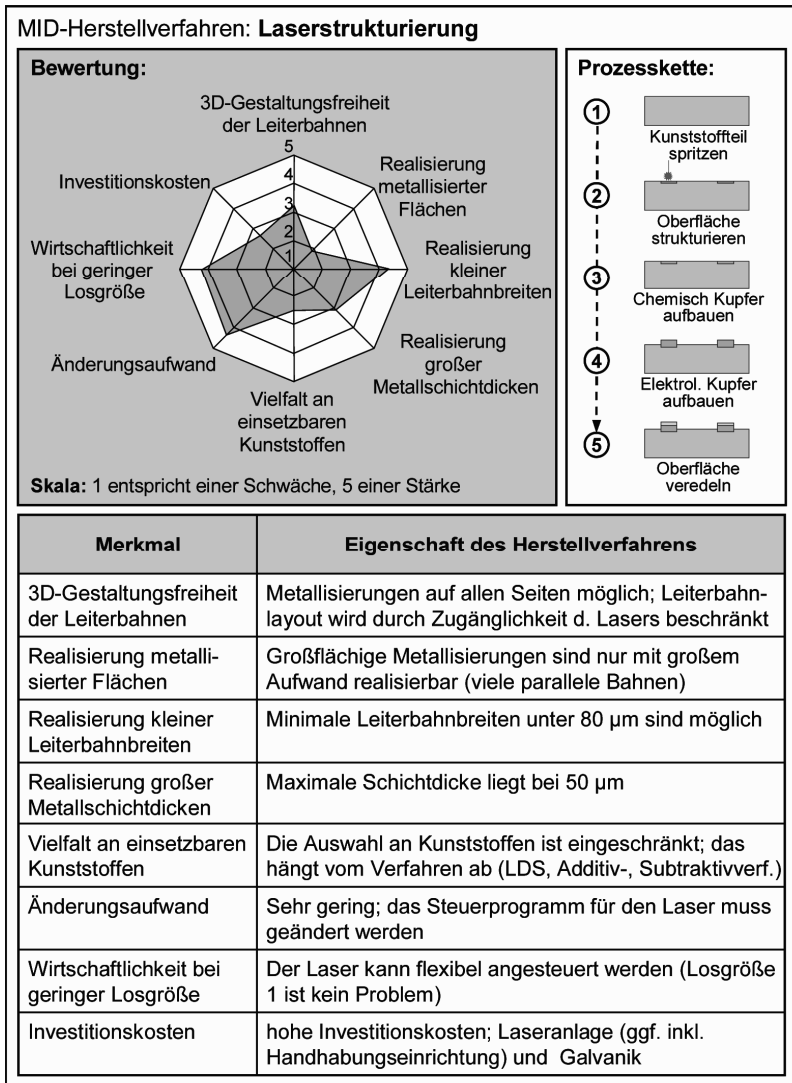


Bild 3-13: Eigenschaftskarte des MID-Verfahrens Laserstrukturierung nach PEITZ [Pei08, S. 117]

Bewertung: Die Eigenschaftskarten der MID-Verfahren nach PEITZ helfen den Entwicklern bei der Auswahl des richtigen MID-Verfahrens für ein bestimmtes Produkt. Dessen Merkmale können auf anschauliche Weise mit dem Eigenschaftsprofil der MID-Verfahren verglichen und so eine fundierte Entscheidung getroffen werden. Die Methode ist sehr einfach und auch für Einsteiger verständlich. Andere Anforderungen aus Kapitel 2.6 werden nicht erfüllt.

3.3.2 MID-Konstruktionskatalog

Konstruktionskataloge sind ein bewährtes Hilfsmittel, um Lösungen für Produktfunktionen zu finden. Beispiele aus dem Maschinenbau sind die Konstruktionskataloge von ROTH [Rot00]. Klassische Konstruktionskataloge helfen aber bei der Entwicklung von MID-Teilen nicht weiter. Die Technologie MID ermöglicht Lösungen, die in klassischen Katalogen nicht berücksichtigt sind. Für die Entwicklung von MID-Produkten hat PEITZ einen **MID-Konstruktionskatalog** entwickelt (Bild 3-14), mit dessen Hilfe Lösungen für elektrische und mechanische MID-Funktionen gefunden und erste Vorstellungen über die Gestalt des MID-Teils gemacht werden können [Pei08, S. 109].

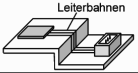
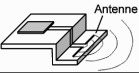
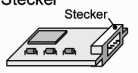



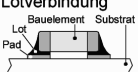


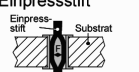
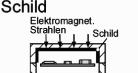


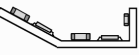

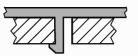
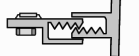






Funktion \ Lösung		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4
Elektronische MID-Funktionen	El. Energie transportieren	Leiterbahn 	Antenne 		
	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Stecker 	Kontaktfeder 	Direktsteckprinzip 	Klemme 
	El. Bauteile kontaktieren (AVT)	Lötverbindung 	Kleilverbindung 	Bondverbindung 	Einpressstift 
	Elektromagnetische Felder schirmen	Schild 			
	Vor hohen Strömen sichern	Sicherung 			
Mechanische MID-Funktionen	Bauteile tragen	Planar 	Partiell planar 	Dreidimensional 	
	Kraft übertragen	Schnappverbind. 	Sägezähne 	Zahnrad 	
	Vor Umwelteinflüssen schützen	Gehäuse 			
	Thermische Energie leiten	Metall. Fläche 	Kühlrippen 		
	Bauteile stabilisieren	Versteifungen 	Abstandhalter 		

Bild 3-14: MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ [Pei08, S. 109]

Der MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ gliedert sich in zwei Teile: Teil 1 liefert Lösungen für elektronische MID-Funktionen, Teil 2 für mechanische MID-Funktionen. In den Zeilen sind die MID-Funktionen aufgelistet. Ihnen werden in den Spalten mögliche MID-Lösungen zugeordnet. Für jede MID-Funktion werden alternative Lösungen vorgeschlagen. Piktogramme erleichtern dem Entwickler die Suche nach Lösungen.

Schon bei der Auswahl der Lösungen sind fertigungstechnische Restriktionen zu beachten. Die Eigenschaften jeder Lösung und fertigungstechnische Restriktionen werden anhand von Kurzbeschreibungen charakterisiert. In Bild 3-15 ist die Lösung *Leiterbahn* charakterisiert. [Pei08, S. 108f]

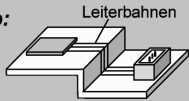
<p>Lösung: Leiterbahnen</p> <p>Funktion: Elektrische Energie transportieren</p>	<p>Prinzip:</p>  <p>Leiterbahnen</p>
<p>Beschreibung: Leiterbahnen dienen dem Transport von geladenen Teilchen. Die Technologie MID ermöglicht die dreidimensionale Leiterbahnführung. Die minimale Leiterbahnbreite und Schichtdicke werden durch den maximalen Stromfluss bestimmt. Es sind Mindestbreiten und -abstände zu berücksichtigen [Her82, S. 396]. Je nach MID-Herstellverfahren gibt es unterschiedliche Gestaltungsrichtlinien. Die einzelnen MID-Herstellverfahren haben grundsätzlich verschiedene Stärken und Schwächen hinsichtlich der geometrischen Freiheitsgrade [For04, S. 149ff].</p>	

Bild 3-15: Charakterisierung der Lösung Leiterbahn [Pei08, S. 110]

Bewertung: Der *MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ* ist ein einfaches und verständliches Werkzeug, das selbst Anfänger in der Technologie MID einsetzen können. Jede Lösung im Konstruktionskatalog wird umfassend und detailliert beschrieben. Da es sowohl Lösungen für mechanische als auch elektrische MID-Funktionen gibt, ist der Konstruktionskatalog domänenübergreifend ausgelegt. Weitere Anforderungen zur Entwicklungsunterstützung werden allerdings nicht erfüllt.

3.3.3 MIDIS-Datenbank

Wie in Kapitel 2.3.5 gezeigt liegt die wesentliche Herausforderung in der Komplexität von Entwicklung, Fertigung und Technologien bei MID-Teilen. Einen Ansatz zur Bewältigung dieser Komplexität bietet die Technologie-Datenbank MIDIS (MID-Informationssystem). In der Datenbank ist Technologie-Wissen über MID-Verfahren und Werkstoffe sowie MID-Anwendungen systematisch abgelegt. Kontaktdaten zu MID-Spezialisten und Firmen vervollständigen die Datenbank.

Grundlage der MIDIS-Datenbank ist ein relationales Datenmodell. Das Technologie-Wissen ist in Form von Tabellen abgelegt. Eine Eingabemaske ermöglicht den Zugriff auf diese Tabellen (Bild 3-16). Die Datenbank besteht zum jetzigen Zeitpunkt aus sechs Tabellen, wird aber stetig erweitert: Die Tabelle **Adressen** enthält Kontaktdaten von MID-Spezialisten. Die Tabelle **Firmen** enthält Informationen über Firmen aus dem MID-Umfeld, insbesondere der Name und die Branche der Firma sowie Kontaktdaten (Adresse, Homepage, Ansprechpartner, etc.). In der Tabelle **Applikationen** sind Informationen über mehr als 170 MID-Anwendungen gespeichert. Dazu zählen sowohl Serienanwendungen als auch Prototypen und Demonstratoren. Zu vielen Anwendungen sind Daten zu Geometrie, Herstellverfahren, Funktionen sowie Hersteller und Anwender hinterlegt. Die Tabelle **Patente** enthält Patentschriften zum Bereich MID. Hier kann sich der Benutzer über den genauen Inhalt der Patente, ihre Gültigkeit etc. informieren. In **Verfahren** sind verschiedene Technologien entlang der MID-Prozesskette (Strukturierung, Metallisierung, Bestücken, usw.) beschrieben. Ein Menüfeld erlaubt die Auswahl von Technologien, deren detaillierte Beschreibung angezeigt wird. **Werkstoffe** beschreibt die wichtigsten Werkstoffkennwerte und Angaben zum Hersteller.

Adressen **Applikationen** Verfahren
 Firmen Patente Werkstoffe

The screenshot shows the 'MIDIS - [Applikationen]' application window. At the top, there is a menu bar with 'Datei', 'Fenster', 'Sprache', and 'Hilfe'. Below the menu bar is a toolbar with icons for home, search, and other functions. The main content area is divided into several sections:

- Product Information:**
 - Produkt: Leuchtweiten-Steller
 - Hersteller: Matthias Oechler + Sohn GmbH
 - Anwender: Hella
- Physical Properties:**
 - Laenge (mm): 39
 - Masse (g): 5
 - Breite: 36
 - Hoehe: 17
 - Dimension: n x 2D
 - Stadium: Serie
 - Datum: Freitag, 27. Januar 1995
 - Kosten: [empty field]
 - Stueckzahl: [empty field]
- Usage and Function:**
 - Einsatz: im Kfz
 - Funktion: Regulierung der Leuchtweite von Scheinwerfern
 - mehr Vorteile: Einsparung eines Stanzgitters
- Advantages (Vorteile):**
 - Miniaturisierung
 - Gewichtsersparnis
 - Höhere Genauigkeit
 - Weniger Produktionsschritte
 - Weniger Teile u. Kosten
 - neue Funktion durch MID
 - bessere el. Eigenschaften

The window title bar shows 'MIDIS - [Applikationen]' and the status bar at the bottom left shows 'Status'.

Bild 3-16: Screenshot der MIDIS-Datenbank (Auswahl: Applikationen)

Neben dem Technologie-Wissen sind weitere Informationen in der MIDIS-Datenbank enthalten. So sind Veröffentlichungen zum Bereich MID wie das Buch „*3D-MID Technologie – Räumliche elektronische Baugruppen – Herstellverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*“ der Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. [For04] als pdf-Datei abgelegt. Geplant ist, Dissertationen aus dem MID-Umfeld sowie die Tagungsbände der MID-Kongresse auf diese Weise zugänglich zu machen.

Bewertung: Die MIDIS-Datenbank liefert dem Entwickler Informationen über MID-Verfahren, deren Kennwerte, Anwendungen und Ansprechpartner. Sie bietet aber keine direkte Unterstützung des Entwicklungsprozesses. Methoden und Richtlinien sind in der Datenbank nicht enthalten. Das in dieser Wissensbasis enthaltene Expertensystem ermöglicht die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens. Weitere Anforderungen werden kaum erfüllt.

3.3.4 MIDCAD

Das CAD-Werkzeug MIDCAD wird am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt. MIDCAD dient der integrativen 3D-Modellierung von MID-Teilen, d.h. sowohl des Schaltungsträgers als auch der elektronischen Bauteile und räumlichen Leiterbahnen. Das erstellte Modell dient auch der Auslegung des Produktionssystems: Mit den Geometriedaten des Schaltungsträgers können Spritzgussimulationen durchgeführt und Steuerinformationen für einen 3D-Bestückautomaten ausgeleitet werden [ZAF06, S. 375], [ZAF07, S. 140f].

MIDCAD basiert auf dem kommerziellen MCAD-System Pro/ENGINEER (Pro/E) und ist ein Plugin. Das heißt, als Entwicklungsumgebung wird Pro/ENGINEER benutzt und bietet alle darin enthaltenen geometrischen Modellierungsfunktionen. Die Schaltungsträgergestaltung kann daher komfortabel in MIDCAD erfolgen und benötigt keine Datenaustauschvorgänge [ZAF06, S. 375]. Zur Modellierung der dreidimensionalen Elektronik wurde Pro/ENGINEER um MID-spezifische Funktionen erweitert. Dazu zählen die 3D-Platzierung von elektronischen Bauelementen und das 3D-Entflechten von Leiterbahnen. Dafür steht ein eigens entwickelter Autorouter zur Verfügung. Für das Zweikomponentenspritzguss-Verfahren können aus dem erstellten Leiterbahnverlauf die Teilkomponenten automatisch erzeugt werden. Weiterhin enthält MIDCAD drei Bibliotheken. Die wichtigste Bibliothek ist die 3D-Bauelementebibliothek. Sie enthält die Geometrien der elektronischen Bauelemente sowie elektrische Informationen und Werkstoffkennwerte, z.B. für thermische Simulationen. Mit einem Modellgenerator können jederzeit neue Bauelemente hinzugefügt werden. In der MID-Feature-Bibliothek sind in Anlehnung an bestehende MCAD-Systeme MID-spezifische Formelemente wie

Durchkontaktierungen, Stiftleisten etc. enthalten. Die MID-Technologiebibliothek enthält Kennwerte zur MID-gerechten Konstruktion. [ZAF06, S. 376ff] In Bild 3-17 ist die Architektur von MIDCAD dargestellt.

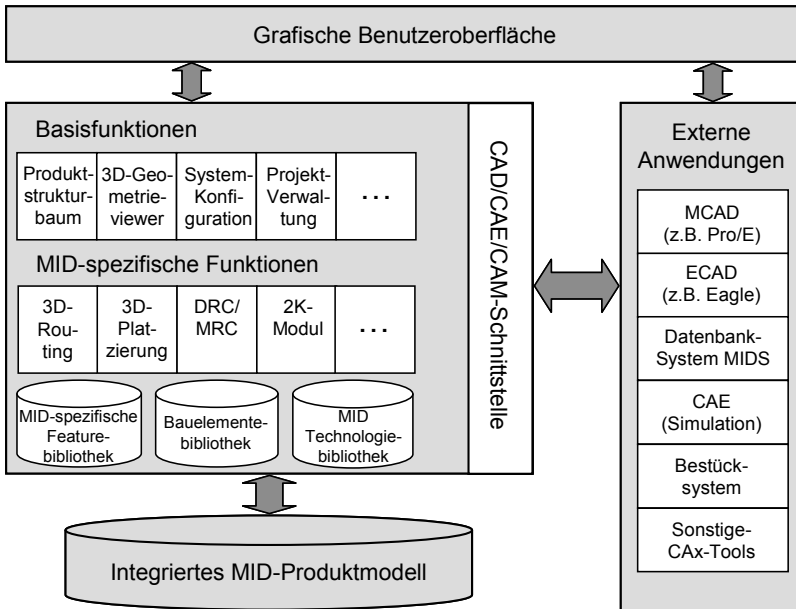


Bild 3-17: Architektur des integrierten MIDCAD-Systems [ZAF07, S. 139]

Für die Konstruktion eines MID-Teils mit MIDCAD existiert ein spezielles Vorgehen aus vier Schritten [ZAF06, S. 379f]:

- 1) **Modellierung des Schaltungsträgers:** Die Geometrie des räumlichen Schaltungsträgers wird mit Pro/ENGINEER erzeugt und dient als Ausgangsbasis für den weiteren Entwurf.
- 2) **3D-Bauelemente einlesen und platzieren:** Über Schnittstellen wird die in einem ECAD-System extern erzeugte Komponentenliste eingelesen. Diese spezifiziert die im Schaltplan enthaltenen Bauelemente. MIDCAD generiert daraus 3D-Modelle der Bauelemente, die vom Benutzer interaktiv platziert werden können.
- 3) **Verbindungen einlesen oder definieren:** Die ebenfalls extern in einem ECAD-System erzeugte Netzliste wird eingelesen. Sie definiert die logischen Verbindungen zwischen den Bauteilen.
- 4) **3D-Autorouting/Leiterbahnerzeugung:** Das 3D-Entflechten der Leiterbahnen erfolgt automatisch mit dem Autorouter oder manuell. Die Leiterbahngeometrien werden automatisch erzeugt.

Bewertung: MIDCAD dient der Gestaltmodellierung von MID-Teilen während des 3D-Elektronikentwurfs. Das Werkzeug beruht auf dem MCAD-System Pro/ENGINEER und nutzt dessen Funktionalität zur Modellierung des Schaltungsträgers. Diese Funktionalität wird durch MID-spezifische Funktionen wie beispielsweise einem Bauelementmodeller, einem 3D-Autorouter und einer MID-Feature-Bibliothek erweitert. Der Entwurf der elektrischen Schaltung geschieht aber weiterhin extern in speziellen ECAD-Systemen. Die in Kapitel 2.6 aufgestellten Anforderungen werden nur teilweise erfüllt, da MID-CAD nicht den gesamten Entwicklungsprozess unterstützt.

3.3.5 NEXTRA

Das Softwarewerkzeug NEXTRA der Firma MECADTRON GmbH dient der dreidimensionalen Modellierung von Elektronik. NEXTRA ist ein eigenständiges 3D-CAD-System und integriert die Funktionalität von 2D-Elektronik- und 3D-Mechanik-CAD-Systemen [KF05, S. 60]. Dabei ist es modular aufgebaut: Neben konventionellen Leiterplatten (PCB-Modul) und Flexboards (Flex-Modul) unterstützt es auch die Modellierung von MID-Teilen (MID-Modul).

Zunächst wird der Schaltungsträger modelliert. Die Geometrie des Schaltungsträgers kann in NEXTRA direkt erstellt werden oder aus bestehenden CAD-Systemen übernommen werden. NEXTRA besitzt dazu alle Standardfunktionen eines 3D-Mechanik-CAD-Systems. Eine extern erzeugte Geometrie wird über Standard-Datenformate (STEP, IGES, DXF) oder systemspezifische Schnittstellen (CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks und Unigraphics) eingelesen. Die Erstellung des Schaltungslayouts erfolgt auf Basis einer Netzliste. Diese muss in einem externen Softwarewerkzeug erstellt und nach NEXTRA importiert werden. Aus der Netzliste generiert NEXTRA dreidimensionale Modelle der Bauteile und deren logischen Verbindungen. Die Bauteile können vom Benutzer per Drag&Drop auf dem Schaltungsträger positioniert und bewegt werden. Die Bauteile richten sich dabei automatisch an der Schaltungsträgergeometrie aus. Anschließend werden die Leiterbahnen verlegt, entweder per Hand oder durch einen Autorouter. [KF05, S. 63f]

Die Arbeitsumgebung von NEXTRA ist in Bild 3-18 zu sehen. Im Beispiel ist ein MID-Gehäuse dargestellt, in das elektronische Bauteile integriert werden. Das Gehäuse wurde in CATIA erstellt und nach NEXTRA importiert, die Bauteile und der Netzplan stammen aus dem ECAD-System Altium Designer. Die logischen Verknüpfungen zwischen den Bauteilen sind als weiße Linien dargestellt. Nach dem manuellen Platzieren der Bauteile erstellt der Autorouter das Leiterbahnlayout. Über die Menüleiste können Schaltung und Schaltungsträger bearbeitet und weitere Funktionen aufgerufen werden.

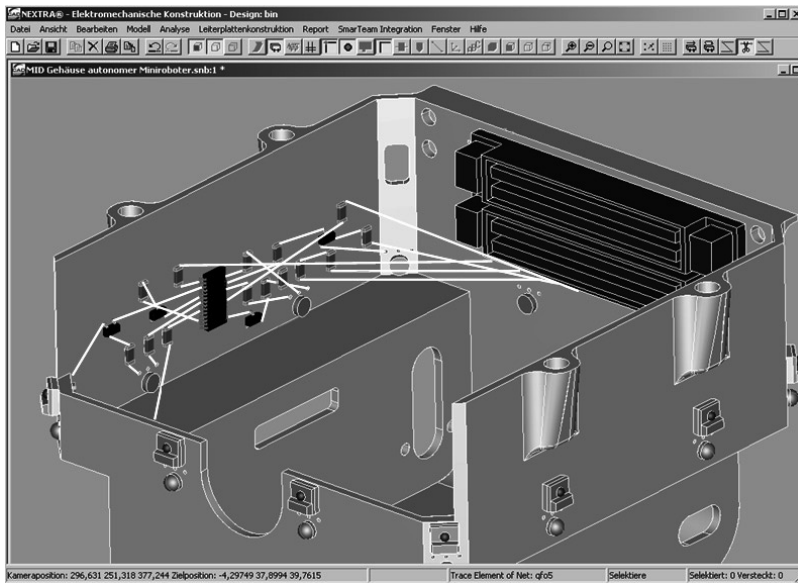


Bild 3-18: Screenshot von NEXTRA: Platzierung elektronischer Bauteile

Als weitere Funktion ermöglicht NEXTRA einen Design Rule Check. Dieser überprüft das Layout auf die Einhaltung von minimalen Leiterbahnabständen, Leiterbahnbreiten etc. Zu diesem Zweck sind Technologiekennwerte in einer Technologiedatenbank hinterlegt [KF05, S. 64].

Neben der Technologiedatenbank bietet NEXTRA eine Komponenten-Bibliothek, die sowohl die elektrischen Eigenschaften als auch die dreidimensionale Geometrie der elektronischen Bauteile enthält. Die 3D-Geometrie von elektrischen Standard-Komponenten kann darüber hinaus mit Hilfe eines Erstellungsassistenten erzeugt werden. Spezielle Komponenten können in NEXTRA modelliert oder aus externen CAD-Systemen bzw. Bibliotheken importiert werden. Abschließend lassen sich aus NEXTRA Fertigungsdaten ausleiten, mit denen z.B. der Laser zum Strukturieren direkt angesteuert werden kann. [KF05, S. 65f]

Bewertung: Genau wie MIDCAD dient NEXTRA der Modellierung von MID-Teilen in den späten Phasen des Entwurfs. NEXTRA ist ein eigenständiges Werkzeug. Der Kern von NEXTRA ist ein ECAD-System, dem ein 3D-Modellierer hinzugefügt wurde. Die Bedienung ist gewöhnungsbedürftig, aber schnell lernbar. Die aufgestellten Anforderungen an die Systematik erfüllt NEXTRA nur ansatzweise. Positiv ist jedoch die Technologiedatenbank mit Kennwerten und Design Rules, die dem Entwickler wichtige Hinweise für die Gestaltung liefert.

3.4 Handlungsbedarf

In diesem Kapitel werden die untersuchten Ansätze mit den Anforderungen aus Kapitel 2.6 verglichen. Bild 3-19 gibt einen Überblick über die Bewertungen. Aus diesen Bewertungen wird der Handlungsbedarf abgeleitet.

A1) Strukturierung des Entwicklungsprozesses: Alle untersuchten Systematiken erfüllen diese Anforderung und entsprechen damit der Definition aus Kapitel 2.1. Die Werkzeuge und Spezifikationstechniken erfüllen sie nicht.

A2) Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Produkt und Produktionssystem: Diese Anforderung wird von keinem Ansatz erfüllt. Die VDI-Richtlinie 2206 fordert zwar die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem, liefert aber keine Hinweise wie dieses geschehen soll. Die Spezifikationstechniken sind prinzipiell geeignet, Wechselwirkungen abzubilden, gehen aber nicht näher darauf ein.

A3) Unterstützung durch Methoden- und Richtlinienempfehlungen: Kaum einer der untersuchten Ansätze empfiehlt Methoden und Richtlinien. Einzig die VDI-Richtlinie 2221 und das Vorgehen nach LINDEMANN werden durch ausführliche Methodensammlungen unterstützt.

A4) Unterstützung bei der Auswahl von Herstellverfahren: Diese sehr spezielle Anforderung wird nur von den Eigenschaftskarten der MID-Verfahren und der MIDIS-Datenbank erfüllt. Erstere sind genau für diesen Zweck entwickelt worden, letztere wurde nachträglich mit dieser Fähigkeit ausgestattet. Alle anderen Ansätze geben keine Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens.

A5) Unterstützung durch eine Wissensdatenbank: Eine Reihe von Ansätzen bietet Unterstützung durch eine Datenbank, z.B. NEXTRA, MIDCAD und die MIDIS-Datenbank. Die anderen Ansätze fordern oder empfehlen den Einsatz solcher Datenbanken, geben aber keine Hinweise auf deren Aufbau oder Umsetzung. Die Systematik nach INERELA besitzt eine Wissensbasis, die auch ähnlichen Anforderungen unterliegt. Diese ist daher sehr gut geeignet.

A6) Verständlichkeit: Von den untersuchten Ansätzen und Werkzeugen sind die meisten einfach zu erlernen und zu bedienen. Die Vorgehen nach KALLENBACH, LINDEMANN und LÜCKEL erfüllen diese Anforderung nur unzureichend.

A7) Beherrschung der Komplexität: Die VDI-Richtlinien 2221 und 2422 sowie die Systematiken nach EQUAL und INERELA beschreiben detailliert die Tätigkeiten bei der Entwicklung. Andere Ansätze erfüllen diese Anforderung nur ansatzweise oder sind sehr generisch wie das Vorgehen nach LINDEMANN. Die Spezifikationstechniken erfüllen diese Anforderung ebenfalls, von den Werkzeugen nur der MID-Konstruktionskatalog.

A8) Gleichberechtigung der Domänen: Nahezu alle untersuchten Ansätze, Spezifikationstechniken und Methoden erfüllen diese Anforderung vollständig. Die VDI-Richtlinie 2221 und das Vorgehen nach LÜCKEL sowie die MID-Werkzeuge erfüllen sie überwiegend.

	Anforderungen							
	A1) Strukturierung des Entwicklungsprozesses	A2) Berücksichtigung von Wechselwirkungen	A3) Entwicklungsunterstützung d. Methoden u. Richtlinien	A4) Entscheidungsunterstützung bei Auswahl MID-Verfahren	A5) Rechnerunterstützung durch Wissensbasis	A6) Verständlichkeit	A7) Beherrschung der Komplexität	A8) Gleichberechtigung der Domänen
Bewertung der Ansätze hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen:								
	erfüllt	überwiegend erfüllt	ansatzweise erfüllt	nicht erfüllt				
Mechatronik-Systematiken								
VDI-Richtlinie 2221								
VDI-Richtlinie 2422								
VDI-Richtlinie 2206								
Entwicklung nach ISERMANN								
Entwicklung nach LÜCKEL								
Entwicklung nach KALLENBACH								
Entwicklung nach LINDEMANN								
Systematik nach EQUAL								
Systematik nach INERELA								
Spezifikationstechniken								
Spezifikationstechnik nach FRANK								
Spezifikationstechnik nach MICHELS								
MID-Methoden und Werkzeuge								
Eigenschaftskarten nach PEITZ								
MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ								
MIDIS-Datenbank								
MIDCAD								
NEXTRA								

Bild 3-19: Bewertung der Ansätze anhand der Anforderungen

Keiner der betrachteten Ansätze erfüllt alle Anforderungen. Die entscheidenden Schwächen liegen in der fehlenden Methodenunterstützung, der mangelnden Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des MID-Verfahrens und der Nicht-Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Zudem sind viele Ansätze zu allgemein gehalten, um als Leitfaden für den Praktiker zu dienen. Daraus ergibt sich der Handlungsbedarf, eine neue *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* zu erarbeiten.

4 Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID

Die Ausführungen in Kapitel 2 zeigen das hohe Innovationspotential der Technologie MID. Ihr Einsatz führt zu einer kompakten Bauweise, höherer Funktionalität sowie reduzierten Herstellkosten. Viele herkömmliche mechanisch-elektronische Baugruppen können durch MID verbessert werden [Pei08, S. 37]. Die Entwicklung von MID-Teilen ist nach wie vor eine Herausforderung: Es fehlt u. a. eine Systematik, die die Entwicklung zielgerichtet unterstützt.

In diesem Kapitel wird eine *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* vorgestellt. Zunächst wird in Kapitel 4.1 das Validierungsbeispiel Autonomer Miniaturroboter erläutert. Kapitel 4.2 gibt einen Überblick über die Systematik. Kapitel 4.3 erläutert das Generische Vorgehensmodell, das die Grundlage der Systematik darstellt. Kapitel 4.4 beschreibt das Spezifische Vorgehensmodell für das MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung LDS anhand der retrospektiven Entwicklung des MID-Gehäuses eines Miniaturroboters. Kapitel 4.5 enthält ein Konzept zur Unterstützung der Systematik durch eine Wissensbasis. Die Bewertung der Systematik anhand der Anforderungen aus Kapitel 2.5 erfolgt in Kapitel 4.6.

4.1 Validierungsbeispiel: Autonomer Miniaturroboter

Am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn wird in Zusammenarbeit mit der Industrie (Siemens Corporate Technology, Dr. Fritz Faulhaber GmbH) der Miniaturroboter „BeBot“ entwickelt. Der Miniaturroboter besteht aus einem Basisfahrzeug (Bild 4-1) und verschiedenen Aufbaumodulen. Er dient als Versuchsträger für Schwarmintelligenz und Multi-Agenten-Anwendungen der Informatik sowie neuen Fertigungstechnologien wie beispielsweise der Technologie MID und Aktortechnologien (Piezo-Antriebe und Formgedächtnislegierungen). Die Software-Anwendungen wie Bahnplanungs- und Bildverarbeitungsalgorithmen basieren auf einer leistungsfähigen Informationsverarbeitung. Diese erfolgt durch dezentrale Mikrocontroller, rekonfigurierbare Logikbausteine (FPGA¹⁰) und dem Linux-Betriebssystem. Somit stellt der Miniaturroboter auch eine Plattform für die Erforschung dynamisch rekonfigurierbarer Systeme dar. Der Einsatz dieser Plattform und angepasster Software-Anwendungen ermöglicht ein flexibles und robustes Fahrzeug für den Betrieb in unbekanntem Gelände.

¹⁰ Field Programmable Gate Array (etwa: Feldprogrammierbare Gatteranordnung). In FPGAs kann die interne Struktur spezifisch konfiguriert werden. [KGGK+06, S. 361]

Ein Anwendungsszenario besteht darin, dass etwa 50 Roboter auf einer Fläche von 30 m² verteilte, farbige Tischtennisbälle nach Farben sortiert einsammeln müssen. Die Aufgabe wird von den Miniaturrobotern im Verbund gelöst, wobei Entscheidungen autonom getroffen werden. Das Besondere ist, dass die Roboter verschiedene Rollen in Absprache miteinander einnehmen können. Realisiert werden diese Rollen durch ein automatisches Werkzeugwechselsystem: Ein Roboter kann entweder Schieber (für das Zusammenschieben großflächig verteilter Bälle), Greifer oder Transporter (Ladefläche für 4 Bälle) sein. Der Aufbau des Miniroboters ist deshalb modular. Das Basisfahrzeug mit den Grundfunktionen wie „Orientieren“, „Bewegen“ und „Kommunizieren“ ist dabei für alle Robotervarianten gleich.

Hauptplatine: Ein 300 MHz-Prozessor mit Linux-Betriebssystem, 96 MB Arbeitsspeicher und ein FPGA sorgen für Echtzeit-Bildverarbeitung.

Basisplatine: Ein 75 MHz-Prozessor übernimmt die Antriebssteuerung, die Sensorauswertung und das Energiemanagement.

Sensorik: Direkt auf dem Gehäuse angebracht erfasst sie 360° der Umgebung.

Antrieb: Zwei Elektro-Kleinstmotoren mit je 2,8 W Leistung und hohem Wirkungsgrad sorgen für eine hohe Beschleunigung.

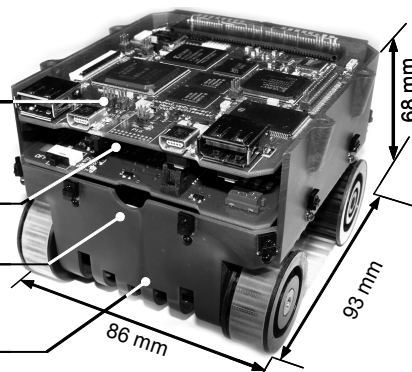


Bild 4-1: Basisfahrzeug des autonomen Miniaturroboters

Das Basisfahrzeug verfügt über einen leistungsstarken Riemen-Antrieb. Zwei Gleichstrom-Elektromotoren mit je 2,8 W treiben diesen an und ermöglichen schnelle Bewegungen und hohe Manövrierbarkeit auch in unebenem Gelände. Zur Hinderniserkennung sind zwölf Sensoren rund um den Miniaturroboter angebracht. Sie haben eine Reichweite von bis zu 12 cm und decken 360° der Umgebung ab. Ihre räumliche Positionierung ist eine Herausforderung und ein Grund für den Einsatz der Technologie MID. Die Informationsverarbeitung auf der Basisplatine verarbeitet die Sensorsignale und steuert den Antrieb. Die Route wird entweder vorgegeben (programmiert oder ferngesteuert) oder der Miniaturroboter erkundet zufällig die Umgebung und weicht Hindernissen aus (Braitenberg-Verhalten). Die Erweiterungsplatine enthält zusätzliche Hardware (Mobil-Prozessor, FPGA, Speicher, Kamera etc.) und Kommunikations-Schnittstellen wie USB, Bluetooth, ZigBee und WLAN. Damit ist der Miniaturroboter in der Lage, komplexe Verhaltensweisen aufzuweisen und mit anderen Miniaturrobotern ein Multi-Agenten-System zu bilden. Als Betriebssystem kommt Linux zum Einsatz.

Das Ziel bei der Entwicklung ist ein hoher Grad an Miniaturisierung bei gleichzeitiger Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Aufgaben und einfache Erweiterbarkeit. Im Fokus der Miniaturisierung steht das Gehäuse, bei dem die Technologie MID zum Einsatz kommt. Die Miniaturisierung wird erreicht, indem in das Gehäuse so viele Funktionen wie möglich integriert werden. Es besteht aus spritzgegossenem Kunststoff und wird selektiv metallisiert. Das Gehäuse dient dann nicht nur als Tragstruktur für alle Baugruppen, sondern integriert auch Leiterbahnen und elektronische Komponenten. Dadurch erfüllt das Gehäuse sowohl mechanische als auch elektrische Funktionen (Bild 4-2).

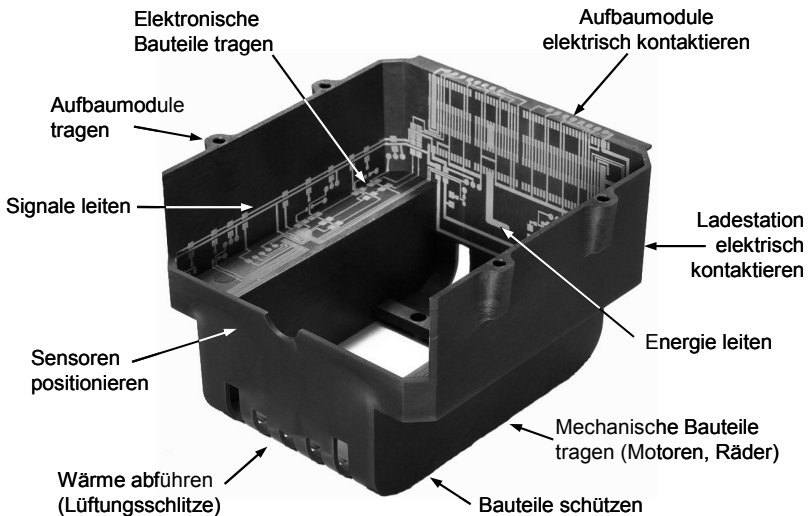


Bild 4-2: Funktionsintegration in das Gehäuse durch MID

Das Gehäuse wird im MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung hergestellt und besteht aus hochtemperaturfestem LCP (Liquid Crystalline Polymer). Es wird in einem zweiteiligen Werkzeug spritzgegossen und nach oben entformt. Das Gehäuse wird mit einem Laser strukturiert, durch die anschließende galvanische Metallisierung entstehen die Leiterbahnen. Sie überziehen beinahe alle Innenseiten des Gehäuses und bilden eine komplexe, dreidimensionale Schaltung. Anschließend werden die elektronischen Bauteile bestückt, hauptsächlich auf den „Radkästen“ über den Rädern und der Rückseite. Bestückt werden zwölf Infrarot-Sensoren, die außen auf das Gehäuse aufgebracht und innen verlötet werden. Dazu gehören zwölf Infrarot-LED samt Vorwiderstände und Steuertransistoren, die die Umgebung „beleuchten“. Zwei Mikrocontroller auf den Radkästen verarbeiten die Signale, zwei Platinenstecker tragen die Platinen. Brückenwiderstände dienen zur Entflechtung der Leiterbahnen. Insgesamt befinden sich über 100 Bauteile auf dem Gehäuse (Bild 4-3).

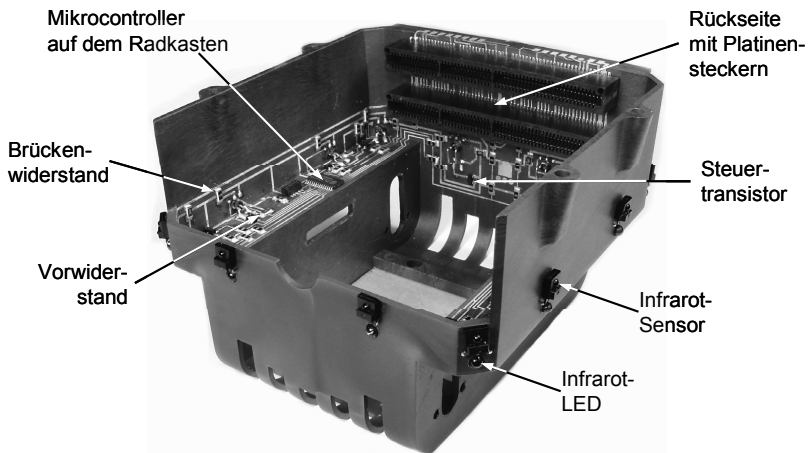


Bild 4-3: Dreidimensionale Schaltung auf dem Miniaturroboter-Gehäuse

4.2 Die Systematik im Überblick

Die Systematik zur Entwicklung von mechatronischen Systemen in der Technologie MID besteht im Kern aus drei Elementen (Bild 4-4):

- einem **Generischen Vorgehensmodell**, das die Phasen und Meilensteine des Entwicklungsprozesses definiert, die dazugehörigen Ergebnisse beschreibt und geeignete Entwicklungsmethoden empfiehlt,
- einem **Spezifischen Vorgehensmodell**, das für die Laserdirektstrukturierung ausgeprägt wird, detailliert die Entwicklungstätigkeiten beschreibt und die Wechselwirkungen zwischen dem Verfahren und dem Produkt aufzeigt sowie zu beachtende Richtlinien vorschlägt und
- einem **Konzept einer Wissensbasis**, in der alle gesammelten Informationen abgelegt sind und die den Zugriff auf diese Informationen erleichtert. Der Entwicklungsprozess wird dadurch rechnerbasiert unterstützt.

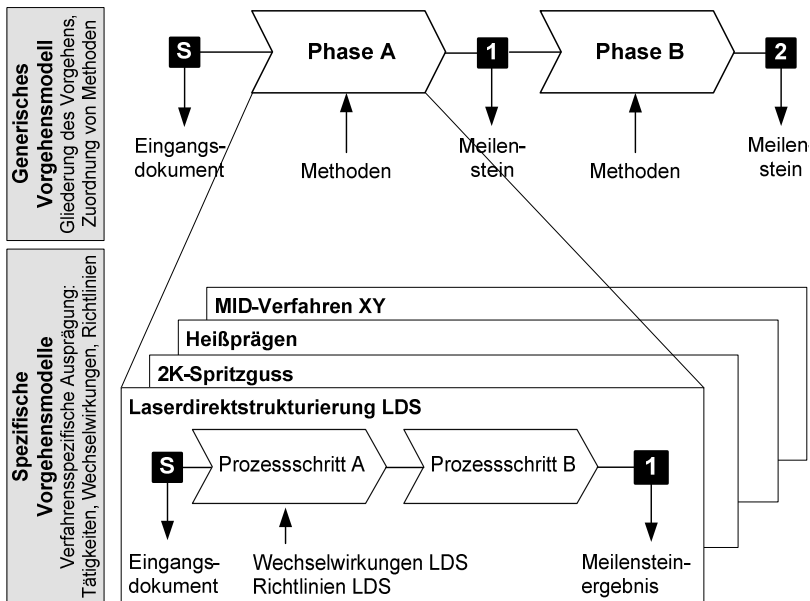


Bild 4-4: Aufbau der Systematik

Das **Generische Vorgehensmodell** bildet die Grundlage der Systematik. Es strukturiert den Ablauf der Entwicklung eines mechatronischen Systems in der Technologie MID und unterteilt diesen in einzelne Prozessphasen. Weiterhin werden die notwendigen Eingangsdokumente und Ergebnisse der jeweiligen Phase definiert. Das Generische Vorgehensmodell erläutert auf abstrakte Weise, welche Tätigkeiten zum Erreichen dieser Ergebnisse durchzuführen sind. Zur Unterstützung empfiehlt das Generische Vorgehensmodell Entwicklungsmethoden und Spezifikationstechniken, die sich in der Praxis bewährt haben. Das Generische Vorgehensmodell ist allgemein gehalten und auf verschiedene Projekte anwendbar. Es berücksichtigt nicht die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem, die für jedes Herstellungsverfahren spezifisch sind.

Die **Spezifischen Vorgehensmodelle** sind für bestimmte MID-Verfahren ausgeprägt. Diese Arbeit fokussiert das MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung LDS, das augenblicklich am weitesten verbreitete Verfahren. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen dem LDS-Verfahren und dem Produkt aufgezeigt und auf Schlüsselstellen bei der Entwicklung hingewiesen. Diese sind vor allem bei der Detailentwicklung relevant, müssen aber zum Teil schon bei der Konzipierung – sowohl des Produkts als auch des Produktionssystems – berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden bestehende Richtlinien aus den Bereichen Kunststoffkonstruktion, Elektronikentwurf und den LDS-Technologien (Spritzguss, Laserstrukturierung, Galvanik und Aufbau- und Verbindungstechnik) empfohlen, die die Entwickler zu Rate ziehen können.

Die Systematik sowie die in dieser Arbeit enthaltenen Informationen werden in einer **Wissensbasis** rechnerbasiert hinterlegt. Sie unterstützt den Entwicklungsprozess durch Bereitstellung dieser Informationen. Dazu werden die Informationen in fünf Kategorien strukturiert und untereinander verknüpft. Über Abfragemasken und eine Volltextsuche kann auf diese Informationen zugegriffen werden.

4.3 Das Generische Vorgehensmodell

Die *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* basiert auf dem Generischen Vorgehensmodell. Es dient als Leitfaden für die Projektplanung und -abwicklung bei der Entwicklung von MID-Bauteilen. Das Generische Vorgehensmodell umfasst dabei den Produktentwicklungsprozess von den Anforderungen bis zur fertig entwickelten Baugruppe samt dazugehörigem Fertigungsprozess. Es gliedert diesen Prozess in Phasen und Meilensteine. Bild 4-5 zeigt die sieben Phasen des Generischen Vorgehensmodells. Mit Ausnahme der Phase *Arbeitsplan erstellen* wird jede dieser Phasen im Spezifischen Vorgehensmodell durch Prozessschritte weiter konkretisiert.

Im Folgenden werden die Tätigkeiten und die zu erarbeitenden Resultate der einzelnen Phasen charakterisiert. Für die Durchführung der Tätigkeiten werden Entwicklungsmethoden empfohlen. Eine Kurzbeschreibung jeder Methode befindet sich im Anhang.

Ausgangspunkt der Entwicklung ist ein Entwicklungsauftrag einer mechanisch-elektronischen Baugruppe in der Technologie MID.

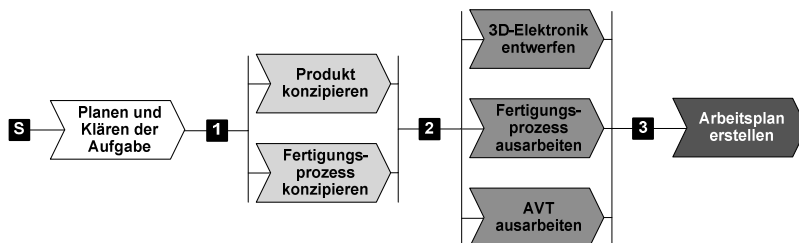


Bild 4-5: Generisches Vorgehensmodell

Planen und Klären der Aufgabe: Eingangsdokument dieser Phase ist ein konkreter Entwicklungsauftrag. Dieser wird analysiert und die Aufgabe oder das Problem möglichst lösungsneutral formuliert. Bestehen Vorgängerprodukte, ist eine *Schwachstellen-Analyse* zur Identifizierung von Optimierungspotentialen hilfreich. Danach wird das Umfeld des Systems analysiert. Störende Einflüsse wie Vibrationen, Temperatur, aggressive Substanzen, elektromagnetische Felder usw. werden mit der *Spezifikationstechnik nach FRANK* dokumen-

tiert. Im nächsten Schritt werden die Anforderungen ermittelt. Durch Kundenbefragungen (z.B. *Fokusgruppeninterview*) und Wettbewerbsanalysen sind neben technischen Anforderungen (Leistungsmerkmale, gesetzliche Vorgaben) auch wirtschaftliche Anforderungen zu erheben. Ergebnis ist eine vorläufige Anforderungsliste. Diese wird während der Entwicklung weiter verfeinert. **Methoden:** *Schwachstellen-Analyse, Spezifikationstechnik nach FRANK, Fokusgruppeninterview*

Meilenstein 1: Die Ergebnisse des Meilensteins 1 bestehen aus dem spezifizierten Entwicklungsauftrag, einem Umfeldmodell des Produkts und einer vorläufigen Anforderungsliste.

Produkt konzipieren: Eingangsdokumente sind der spezifizierte Entwicklungsauftrag und die vorläufige Anforderungsliste. Zunächst werden die Funktionen des Produkts bestimmt. Je nach Zielstellung können verschiedene Ansätze der *Funktionsmodellierung* zum Einsatz kommen. Zur Erfüllung der Funktionen werden Lösungsmuster¹¹ gesucht und kombiniert, bis prinzipielle Lösungsideen gefunden wurden. Dazu eignet sich vor allem der *MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ* in Verbindung mit dem Morphologischen Kasten. Die Ideen werden einer Bewertung nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien unterzogen (z.B. mittels einer *Nutzwertanalyse*) und die vorläufige Anforderungsliste weiter detailliert. Anschließend werden die Wirkstruktur und die prinzipielle Gestalt der Produktidee erarbeitet. Dabei ist die Fertigung in besonderem Maße zu berücksichtigen und die Produktidee ggf. an die Fertigungsrestriktionen (siehe *Restriktions-Checkliste Fertigung*) anzupassen. Ergebnis ist ein domänenübergreifendes Lösungskonzept, das die wesentliche physikalische und logische Wirkungsweise des zukünftigen Produktes sowie seine prinzipielle Gestalt beschreibt. Zur Spezifikation der Prinziplösung bietet sich die *Spezifikationstechnik nach FRANK* an. **Methoden:** *Funktionsmodellierung, MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ, Morphologischer Kasten, Restriktions-Checkliste Fertigung, Spezifikationstechnik nach FRANK*

Prozess konzipieren: Parallel zur Produktkonzipierung wird das Lösungskonzept für den Fertigungsprozess ermittelt. Dazu werden in einem ersten Schritt potentielle Fertigungstechnologien recherchiert. Hilfreich ist hier die *MIDIS-Datenbank*, in der Informationen zu den einzelnen MID-Verfahren abgelegt sind. Es werden die Restriktionen des Produktkonzeptes erfasst, die sich vor allem aus der Gestalt des Schaltungsträgers und der Bauteilplatzierung ergeben (siehe *Restriktions-Checkliste Produkt*). Aus den ermittelten Technologien wird das geeignete MID-Verfahren ausgewählt. Zur Auswahlunterstützung

¹¹ Lösungsmuster sind bewährte Lösungen zu häufig auftretenden Problemen. Analoge Begriffe sind Entwurfsmuster (Softwaretechnik) und Wirkprinzip (Elektrotechnik, Mechanik). [FGK+04, S. 54]

können hier die *Eigenschaftskarten der MID-Verfahren nach PEITZ* eingesetzt werden. Als Hauptarbeitsschritt wird die Prozesskette konzipiert. Die Arbeitsvorgänge werden definiert und die notwendigen Fertigungsmittel abgeleitet. Zur Spezifikation der Produktionssystemkonzeption eignet sich die *Spezifikationstechnik nach MICHELS*. Ergebnis dieser Phase ist das Lösungskonzept des Fertigungsprozesses. **Methoden:** *MIDIS-Datenbank, Restriktions-Checkliste Produkt, Eigenschaftskarten der MID-Verfahren nach PEITZ, Spezifikationstechnik nach MICHELS*

Meilenstein 2: Beim Meilenstein 2 liegen sowohl das Produkt- als auch das Produktionskonzept vor. Das Lösungskonzept des Produkts besteht aus der detaillierten Anforderungsliste, der Funktionshierarchie, der Wirkstruktur und der prinzipiellen Gestalt. Das Lösungskonzept des Produktionssystems umfasst die Arbeitsvorgänge samt den dazugehörigen Fertigungsmitteln.

3D-Elektronik entwerfen: Ausgehend vom Produktkonzept werden in dieser Phase der räumliche Schaltungsträger und die dreidimensionale elektronische Schaltung entworfen. Der Schaltungsträger wird in Anlehnung an PAHL/BEITZ erst grob-, dann feingestaltet. Das geschieht in enger Absprache mit der Schaltungsentwicklung. *Gestaltungsprinzipien* helfen, eine technisch einwandfreie Grobgestalt zu entwerfen, während durch *systematische Variation* die Feingestalt gebildet wird. In der anschließenden Ausarbeitung wird der Schaltungsträger hinsichtlich Form, Werkstoffe und Toleranzen optimiert. *Numerische Simulationen* z.B. zur Festigkeitsanalyse helfen bei der Optimierung der Gestalt. Im parallelen Schaltungsentwurf werden die elektrischen Funktionen aus der Funktionshierarchie weiter verfeinert, bis nur noch elektronische Grundfunktionen wie Takt geben, addieren etc. vorhanden sind (*Funktionsmodellierung*). Für diese Grundfunktionen werden dann elektronische Bauelemente ausgewählt, zum Schaltplan verknüpft und das Verhalten der Schaltung simuliert. Das geschieht ebenfalls mit *numerischen Simulationen*, den so genannten SPICE¹²-Werkzeugen. Anschließend wird das dreidimensionale Schaltungslayout erstellt und auf Einhaltung der technologischen Entwurfparameter wie Leiterbahnbreite, -abstand usw. (so genannte Design Rules) überprüft. Von der dreidimensionalen Elektronik sind Prototypen zu erstellen und auf Funktionalität und Einhaltung der Anforderungen zu prüfen. Als letzter Schritt werden von allen Komponenten Fertigungsunterlagen erstellt. Ergebnis der Phase ist der Gesamtentwurf des Produkts. **Methoden:** *Gestaltungsprinzipien, Variation der Gestalt, Numerische Simulation, Funktionsmodellierung*

¹² SPICE: Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (etwa: Simulationsprogramm mit Fokus auf integrierte Schaltungen) ist eine Software zur Simulation elektrischer Schaltungen.

Fertigungsprozess ausarbeiten: Die Lösungskonzepte für das Produkt und den Fertigungsprozess dienen als Eingangsgrößen für die Phase „Fertigungsprozess ausarbeiten“. Ziel ist ein ausgearbeiteter Fertigungsprozess samt Prüfverfahren. Zunächst wird die Verträglichkeit des bestehenden Fertigungskonzepts mit dem detaillierten Produkt verglichen. Im Vordergrund steht die Frage, ob das gewählte MID-Verfahren für die Fertigung des Produkts geeignet ist. Die Fertigungsprozesskette wird anschließend ausgearbeitet. Dazu werden die benötigten Anlagen und Handhabungssysteme samt ihrer Prozessparameter festgelegt. Dies kann auf Grundlage des *nach MICHELS spezifizierten* Fertigungskonzepts geschehen. Danach werden Prüfverfahren zur Qualitätssicherung ausgewählt. Die parallel ausgearbeitete AVT ist abschließend in den Herstellprozess zu integrieren. Ergebnis ist der ausgearbeitete Herstellprozess inklusive der Aufbau- und Verbindungstechnik. **Methoden:** *Spezifikationstechnik nach MICHELS*

Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten: Analog zum Fertigungsprozess des Schaltungsträgers wird die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) ausgearbeitet. Eingangsgrößen sind hier ebenfalls die Lösungskonzepte für das Produkt und den Fertigungsprozess. Als erster Schritt werden die Verträglichkeit und Machbarkeit geprüft. Dazu ist zu klären, ob Standardprozesse (z.B. Reflow-Löten) eingesetzt werden können oder ob aufgrund von Restriktionen durch das Produkt wie Temperaturgrenzen auf Spezialverfahren (z.B. selektives Laserlöten) zurückgegriffen werden muss. Anschließend wird das Konzept des Herstellprozesses für den Bereich AVT weiter konkretisiert, d.h. Anlagen und Werkstoffe sind auszuwählen und Prozessparameter festzulegen. Dabei sind auch Handhabungsaspekte und Prüfverfahren in den Prozess mit einzubeziehen. Dies geschieht auf Basis des Fertigungskonzepts, das in der *Spezifikationstechnik nach MICHELS* dokumentiert ist. Diese Spezifikationstechnik kann hier weiter verwendet werden. Ergebnis ist der ausgearbeitete Fertigungsprozess für die AVT. **Methoden:** *Spezifikationstechnik nach MICHELS*

Meilenstein 3: Als Entwicklungsergebnisse liegen der Gesamtentwurf des MID-Produkts und der ausgearbeitete Fertigungsprozess inklusive der Aufbau- und Verbindungstechnik und geeigneter Prüfverfahren vor.

Arbeitsplan erstellen: Die Arbeitsplanung basiert auf dem Gesamtentwurf des Produkts und dem ausgearbeiteten Fertigungsprozess. Zunächst wird die Fertigung mit dem Produkt abgeglichen, d.h. die geforderten Qualitätsmaße werden mit den Fertigungsprozessen abgestimmt. Die eigentliche Arbeitsplanung lässt sich in die Arbeitsablauf- und die Arbeitsmittelplanung gliedern. Schwerpunkt der Arbeitsablaufplanung ist die Gestaltung und Optimierung der Fertigungs-, Montage- und Verbindungsprozesse. Dazu werden Arbeits- und Montagepläne (gemäß REFA mittels *Vorranggraphen*) sowie Maschinensteuerprogramme erstellt. Die Arbeitsmittelplanung umfasst die Auslegung und Gestaltung der

Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen. Bei der Betriebsmittelauswahl sind die geforderten Stückzahlen, Qualitätsmaße und die verfügbaren Kapazitäten (*Kapazitätsplanung*) zu berücksichtigen. Auch ein Materialfluss- bzw. Logistiksystem wird festgelegt. Ergebnis sind die Arbeitsvorgangsfolgen, NC-Steuerinformationen, die Betriebsmittel und die Werkzeuge. **Methoden:** *Vorranggraphen, Kapazitätsplanung*

Innerhalb der Phasen werden z.T. mehrere Methoden angewendet. Dabei handelt es sich sowohl um etablierte Methoden als auch MID-spezifische Methoden wie den *MID-Konstruktionskatalog* und den *Eigenschaftskarten der MID-Verfahren* (beide nach PEITZ) sowie der MID-Wissensbasis *MIDIS*. In Bild 4-6 sind die Methoden den jeweiligen Phasen zugeordnet.

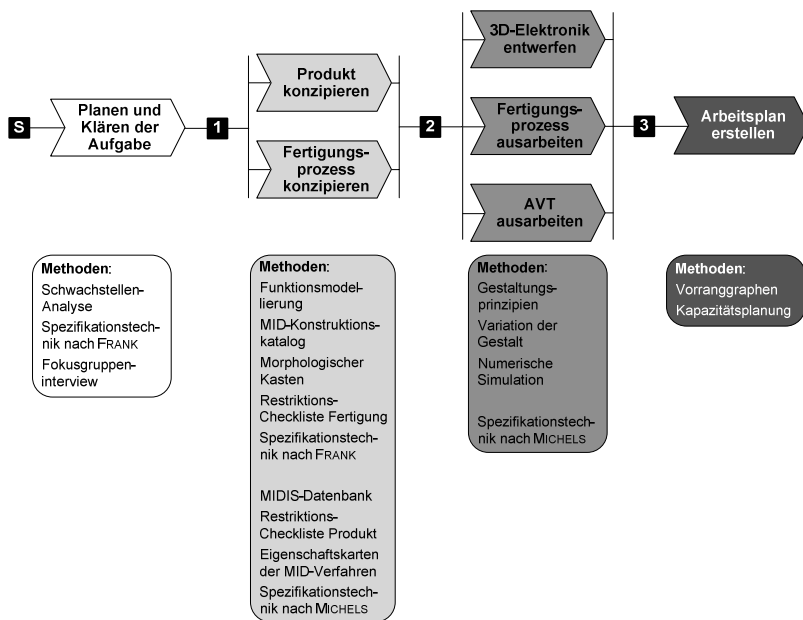


Bild 4-6: Generisches Vorgehensmodell mit Produktentwicklungsmethoden

4.4 Das Spezifische Vorgehensmodell für die Laserdirektstrukturierung

Das Spezifische Vorgehensmodell beschreibt detailliert die Entwicklung von MID-Teilen in der Laserdirektstrukturierung am Beispiel des Miniaturroboters und zeigt die zu beachtenden Wechselwirkungen auf. Darüber hinaus werden Richtlinien für die Entwicklung empfohlen.

4.4.1 Planen und Klären der Aufgabe

Die Phase *Planen und Klären der Aufgabe* dient der Vorbereitung der Entwicklung. Sie unterteilt sich in die Prozessschritte „Aufgabe klären“, „Umfeld analysieren“ und „Anforderungen analysieren“ (Bild 4-7). Ausgangspunkt der Entwicklung ist ein Entwicklungsauftrag.

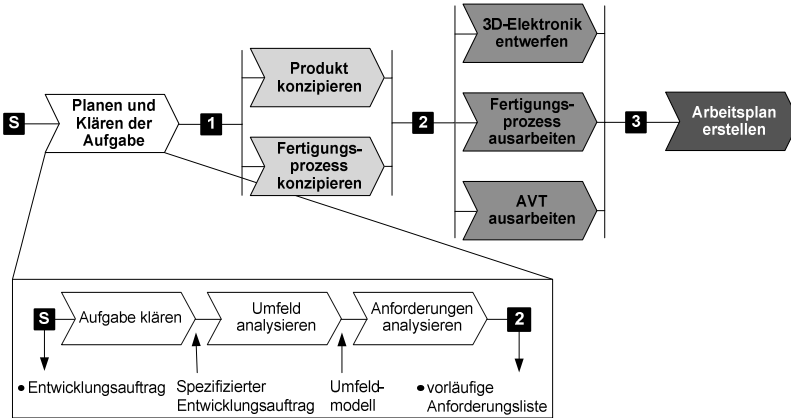


Bild 4-7: Prozessschritte der Phase „Planen und Klären der Aufgabe“

4.4.1.1 Aufgabe klären

Eingang: Entwicklungsauftrag

Methode: Schwachstellen-Analyse

Der Entwicklungsauftrag wird analysiert und in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber präzisiert. Dazu werden der Zweck des Produkts, seine Einsatzfelder und die Entwicklungsziele so neutral wie möglich formuliert, um sich von vorhandenen Lösungsideen zu befreien. Existieren bereits Vorgänger- oder Konkurrenzprodukte, sind deren Stärken und Schwächen zu analysieren bzw. bekannte Probleme zu beschreiben. Eine unterstützende Methode ist die *Schwachstellen-Analyse*. Für die Analyse hat PEITZ die Suchfelder Gestalt, Funktionen, Produktionssystem und Herstellkosten identifiziert [Pei08, S. 93ff]: Durch die hohe Gestaltungsfreiheit der Technologie MID können Baugruppen leichter an ihre Umgebung angepasst oder Nachbarbaugruppen weniger eingeschränkt (Suchfeld Gestalt), durch Reduzierung der Teilezahl und Schnittstellen die Funktionalität erhöht (Suchfeld Funktionen) und durch die Integralbauweise die Prozesskette verkürzt und Herstellkosten reduziert werden (Suchfelder Produktionssystem und Herstellkosten). Je höher die Schwächen der zu verbessernden Baugruppe sind, desto sinnvoller ist der Einsatz der Technologie MID.

Der Entwicklungsauftrag für das Miniaturroboter-Gehäuse lautet:

Für den Miniaturroboter ist ein Gehäuse zu entwickeln. Es trägt alle Bauteile des Miniaturroboters und schützt diese vor äußeren Einflüssen. Das Gehäuse soll eine sehr hohe Funktionsdichte aufweisen. Auf kleinem Bauraum soll das Maximum an elektronischen und mechanischen Funktionen integriert werden. Dazu wird die Technologie MID eingesetzt.

Eine solche verbale Beschreibung ist sehr unpräzise, jedoch kurz und anschaulich. Sie vermittelt dem Entwickler daher auf einfache Weise die vor ihm liegende Aufgabe: Es ist ein MID-Teil zu entwickeln mit dem Ziel, das Miniaturisierungspotential voll auszuschöpfen.

Ergebnis: spezifizierter Entwicklungsauftrag

4.4.1.2 Umfeld analysieren

Eingang: spezifizierter Entwicklungsauftrag

Methode: Spezifikationstechnik nach FRANK

Richtlinie: VDI 4005

Um Einflüsse auf das System zu ermitteln, wird das Umfeld analysiert, in dem das System später eingesetzt wird. Ein Umfeldmodell kann mit Hilfe der *Spezifikationstechnik nach FRANK* aufgestellt werden. Wichtig sind vor allem störende Einflüsse. Diese sind in der *VDI-Richtlinie 4005* „*Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse*“ definiert und gliedern sich in mechanische, thermische, chemisch-biologische und elektromagnetische Einflüsse. Beispiele dafür sind Vibrationen, Temperatur, Schweiß, Luftfeuchtigkeit und Radiowellen. Auch geometrische Randbedingungen, Verbindungen und Schnittstellen zu anderen Baugruppen können so erfasst werden. Aus dem Umfeldmodell lassen sich erste Anforderungen ermitteln.

Auf das Gehäuse wirken verschiedene Einflüsse ein. Beim Untergrund sind es Störeinflüsse wie Unebenheiten, die zu Vibrationen führen; aber auch der Roboter wirkt über sein Gewicht auf den Untergrund. Das Gehäuse muss dieses Gewicht tragen können (Festigkeit). Aus der Umgebung beeinflusst Licht sowohl im sichtbaren wie im infraroten Bereich die Sensoren. Auch Hausstaub kann eine Störquelle darstellen. Radiowellen beeinflussen das Gehäuse auf zwei Arten: Einerseits können sie eventuelle Elektronik auf dem Gehäuse stören, andererseits beeinträchtigt diese Elektronik die Kommunikation der Roboter untereinander, da die Miniaturroboter drahtlos kommunizieren. Schnittstellen besitzt das Gehäuse zum Aufbaumodulwechsler und zur Ladestation. Diese Einflüsse sind gewollt, sollten aber dennoch spezifiziert werden. Bild 4-8 zeigt das nach FRANK spezifizierte Umfeldmodell.

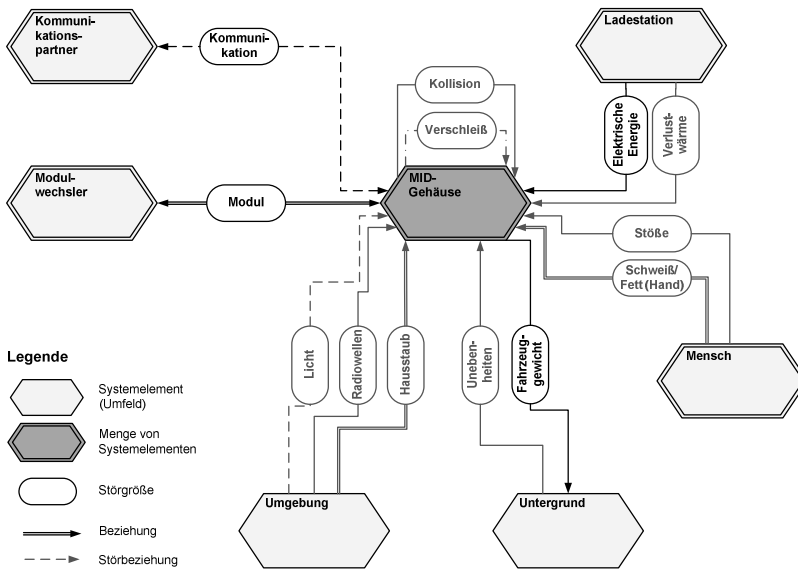


Bild 4-8: Umfeldmodell des Miniaturroboters

Ergebnis: Umfeldmodell

4.4.1.3 Anforderungen analysieren

Eingang: spezifizierter Entwicklungsauftrag, Umfeldmodell

Methode: Fokusgruppeninterview

Richtlinie: FD X50-179

In dieser Phase werden die wesentlichen Anforderungen an das Produkt ermittelt. Dazu zählen technische Anforderungen, die sich aus den Entwicklungsziele, gesetzlichen Vorgaben (z.B. RoHS¹³) und Leistungsdaten von Konkurrenzprodukten ergeben. So zeigt die *Schwachstellen-Analyse* (siehe *Aufgabe klären*), dass z.B. der Konkurrenz-Roboter Khepera II mit Zusatzmodulen erweitert werden kann, die Basis-Hardware (Prozessor, Speicher, Akku) aber nicht austauschbar ist. Für die aktuelle Forschung ist diese Hardware nicht mehr ausreichend. Der Miniaturroboter soll daher leistungsstärkere, austauschbare Hardware besitzen und gleichzeitig ähnlich miniaturisiert sein. Die Technologie MID unterstützt diese Anforderung durch ihre Integralbauweise. Später ist daher festzulegen, welche Bauteile in der Technologie MID ausgeführt werden.

¹³ Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). EU-Richtlinie zur Vermeidung von Giftstoffen in Elektronik

Des Weiteren sind Kundenwünsche zu ermitteln, z.B. durch Methoden der Kundenbefragung wie dem *Fokusgruppeninterview*, sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen wie Absatzzahlen und erzielbare Verkaufspreise. Einen Leitfaden dafür bietet die Richtlinie *FD X50-179* „Identifizierung von Kundenanforderungen“. Daraus wird eine „vorläufige“ Anforderungsliste erstellt. Sie darf nicht zu detailliert ausfallen, da sonst der Lösungsraum auf vorfixierte Lösungen eingeschränkt wird. Tabelle 4-1 zeigt die wichtigsten Anforderungen an den Miniaturroboter.

Tabelle 4-1: Vorläufige Anforderungsliste

Heinz Nixdorf Institut Universität Paderborn		Entwicklung eines Miniaturroboters		Seite: 1
WF/Z	Anforderungen			Verantw.
	1	Geometrie		
Z	1.1	Miniaturisierungspotential ausschöpfen (max. 10x10x8 cm)		
F	1.2	Modularer Aufbau		
W	1.3	Formschön: ansprechendes Design		
	2	Energie		
Z	2.1	Möglichst niedriger Energieverbrauch (< 3W)		
F	2.2	Aufladen im Betrieb möglich		
F	2.3	Kompatibel zu externer Ladestation		
	3	Signal		
F	3.1	Standardisierte Schnittstellen		
	4	Gebrauch		
W	4.1	Einsatz auf beliebigen Flächen innerhalb von Gebäuden		
Z	4.2	Hohe Zuverlässigkeit, niedrige Ausfallrate		
Z	4.3	Robustheit: Resistent gegen Staub, Spritzwasser, Stöße etc.		
	5	Instandhaltung		
Z	5.1	Möglichst wartungsfrei		
	6	Fertigung		
F	6.1	Produkt ist für (Klein-)Serie auszulegen		

Die Anforderungen besitzen unterschiedliche Erfüllungsgrade. Die Konstruktionslehre des Maschinenbaus [PB07], [Rot00] unterscheidet zwischen Zielforderungen (Z), Festforderungen (F) und Wunschforderungen (W):

- **Zielforderungen** definieren Wertebereiche, die vom Produkt erfüllt werden müssen. Darüber hinaus definieren sie Ziele. Die Anforderung 1.1 *Miniaturisierungspotential ausschöpfen* beschreibt sowohl einen

oberen Grenzwert als auch ein Minimalziel. Die Baugröße darf maximal $10 \times 10 \times 8 \text{ cm}^3$ betragen (oberer Grenzwert), gleichzeitig ist ein möglichst geringer Bauraum anzustreben (Minimalziel).

- **Festforderungen** müssen ebenfalls vom Produkt erfüllt werden. Dabei definieren sie aber keine Wertebereiche, es handelt sich viel mehr um eine „Ja oder Nein“-Erfüllung. Bei der Anforderung 1.2 *Modularer Aufbau* handelt es sich um eine solche Forderung, die entweder erfüllt wird oder nicht.
- **Wunschforderungen** müssen nicht vom Produkt erfüllt werden, sind aber anzustreben (z.B. ansprechendes Design), solange sie keine Fest- oder Zielforderungen verletzen (z.B. maximale Herstellkosten).

Ergebnis: vorläufige Anforderungsliste

Phasenergebnisse: spezifizierter Entwicklungsauftrag, Umfeldmodell, vorläufige Anforderungsliste

4.4.2 Produkt konzipieren

Auf Basis der vorläufigen Anforderungsliste beginnt in dieser Phase die Produktentwicklung. Sie läuft parallel zur Konzipierung des Fertigungsprozesses und muss integrativ erarbeitet werden. Bei der Produktentwicklung gibt es große Übereinstimmungen mit dem klassischen Vorgehen nach PAHL/BEITZ [PB07]. Die Phase unterteilt sich in die Prozessschritte „Funktionen ermitteln“, „Lösungsideen generieren“, „Wirk- und Baustruktur aufstellen“ und „Restriktionen durch Fertigung erfassen“ (Bild 4-9). Ergebnis dieser Phase ist das Lösungskonzept für das Produkt.

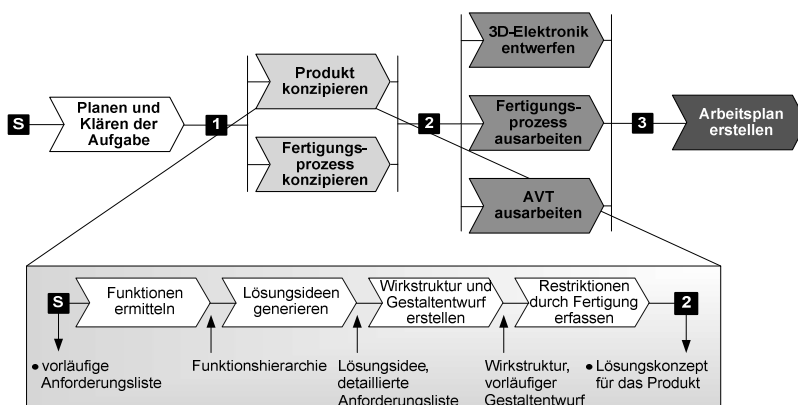


Bild 4-9: Prozessschritte der Phase „Produkt konzipieren“

4.4.2.1 Funktionen ermitteln

Eingang: spezifizierter Entwicklungsauftrag, vorläufige Anforderungsliste

Methode: Funktionsmodellierung

Richtlinie: VDI 2803

Aus der Produktbeschreibung im Entwicklungsauftrag wird die Gesamtfunktion des Produktes abgeleitet. Diese ist in der Regel zu komplex, um sofort eine technische Lösung dafür zu finden. Sie wird daher weiter in Teilfunktionen untergliedert. Es entsteht eine Funktionshierarchie. Diese Art von *Funktionsmodellierung* fördert das Verständnis für das zu entwickelnde System. Ziel ist, die Funktionshierarchie so weit zu detaillieren, bis für jede Teilfunktion ein Lösungsmuster oder Lösungselement gefunden werden kann. So würde die Funktion „Roboter antreiben“ nicht weiter untergliedert werden, da hier z.B. ein Elektromotor eine mögliche Lösung darstellt. Orientierung bei der Funktionsermittlung gibt die *VDI-Richtlinie 2803* „*Funktionsanalyse*“.

Sind alle Funktionen ermittelt, werden die MID-Funktionen unter ihnen identifiziert; die prinzipiellen MID-Funktionen sind in Kapitel 2.3.1 aufgelistet. Nicht alle dieser potentiellen MID-Funktionen müssen tatsächlich in MID realisiert werden. Es werden jedoch mögliche Synergieeffekte beim Einsatz der Technologie MID erkannt. Bild 4-10 zeigt einen Ausschnitt der Funktionshierarchie des Miniaturroboters mit den potentiellen MID-Funktionen.

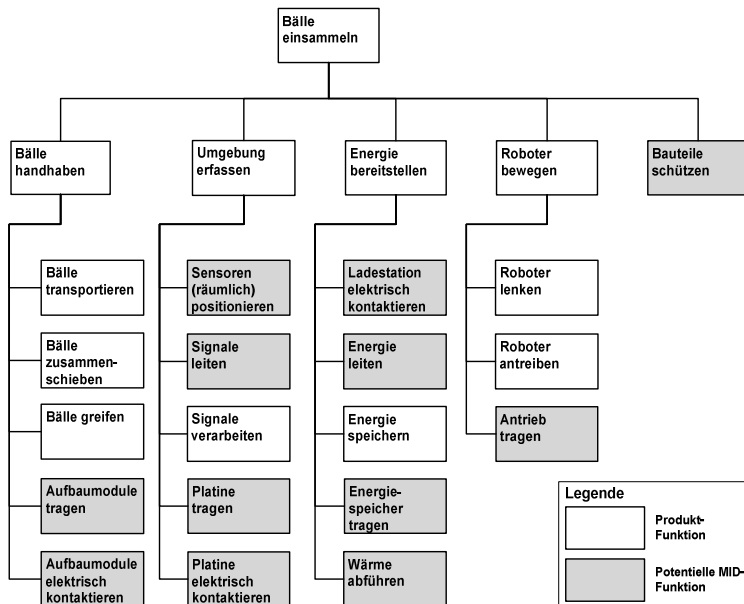


Bild 4-10: Funktionshierarchie des Roboters mit potentiellen MID-Funktionen

Eine wesentliche Funktion ist das räumliche Positionieren der Sensoren. Deren Signale müssen zur Informationsverarbeitung weitergeleitet werden. Alle im Miniaturroboter enthaltenen Bauteile (Aufbaumodule, Platinen, Energiespeicher und Antrieb) müssen getragen und elektrisch kontaktiert werden, falls es sich um elektrische/elektronische Bauteile handelt. Aus der Zielforderung 4.3 *Robustheit: Resistent gegen Staub, Spritzwasser, Stöße* aus der Anforderungsliste ergibt sich die Funktion *Bauteile schützen*. Auch die roboterinterne Störgröße Wärme muss abgeführt werden. Bei diesen Funktionen handelt es sich um potentielle MID-Funktionen. Gemäß der Anforderung 1.1 *Miniatursierungspotential ausschöpfen* werden diese in ein MID-Teil integriert, das demnach folgende Funktionen erfüllt:

- Bauteile schützen,
- Aufbaumodule tragen,
- Aufbaumodule elektrisch kontaktieren,
- Sensoren (räumlich) positionieren,
- Signale leiten,
- Platine tragen,
- Platine elektrisch kontaktieren,
- Ladestation elektrisch kontaktieren,
- Energie leiten,
- Energiespeicher tragen,
- Antrieb tragen und
- Wärme abführen.

Ergebnis: Funktionshierarchie

4.4.2.2 Lösungsideen generieren

Eingang: Funktionshierarchie, vorläufige Anforderungsliste

Methoden: MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ, Morphologischer Kasten

Richtlinien: VDI 2806, VDI 2222 Blatt 2

In diesem Schritt werden Lösungen für das Problem bzw. Ideen für das Produkt gesucht. Hilfestellung dafür bietet die *VDI-Richtlinie 2806 „Kreativitätspotenziale und Ideenfindung“*. Die Ideenfindung kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen; intuitives oder diskursives Denken [PB07, S. 127ff].

- **Intuitives Denken:** Durch Ereignisse, Assoziationen, Analogiebildung etc. entstehen im Unterbewussten neue Ideen. Die neue Idee äußert sich als plötzlicher Einfall, als „Geistesblitz“. [GEK01, S. 123]
- **Diskursives Denken:** Hier handelt es sich um ein bewusstes, schrittweises Vorgehen. Dazu wird das Gesamtproblem in überschaubare Teilprobleme geteilt und diese einzeln gelöst. [GEK01, S. 123f]

Im Sinne eines funktionsorientierten Entwurfs [Esc93, S. 8] empfiehlt sich ein diskursives Vorgehen mit dem *Morphologischen Kasten*. Mit der Bestimmung der Produktfunktionen ist dazu schon der erste Schritt getan. Für die Erfüllung aller Teilfunktionen werden Wirkprinzipien und Lösungselemente gesucht [GEK01, S. 226]. Konstruktionskataloge sind dafür ein geeignetes Hilfsmittel.

Für die Entwicklung von MID-Produkten eignet sich der *MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ* (siehe Kapitel 3.3.2) besonders gut. Mit seiner Hilfe können schnell Lösungen für elektrische und mechanische MID-Funktionen gefunden sowie erste Gestalt-Vorstellungen für das MID-Teil gewonnen werden. Für jede MID-Funktion werden alternative Lösungen vorgeschlagen. Piktogramme erleichtern dem Entwickler die Suche nach Lösungen. [Pei08, S. 108f] Die Anwendung von Konstruktionskatalogen wird in der *VDI-Richtlinie 2222, Blatt 2 „Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen“* beschrieben.

Die Lösungen der Teilfunktionen werden zu Lösungsideen des Produkts kombiniert. Dies erfolgt über die Gestalt des zu entwickelnden Produkts. Hilfreich sind hier die Piktogramme aus dem MID-Konstruktionskatalog. Für jede Lösungsidee wird eine Skizze angefertigt, die im Prozessschritt *Wirkstruktur und Gestaltentwurf erstellen* detailliert wird. Zudem wird eine prägnante Beschreibung (Ideensteckbrief) erstellt. Die Lösungsideen werden anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien aus der vorläufigen Anforderungsliste bewertet.

Die Idee für das MID-Gehäuse des Miniaturroboters sieht folgendermaßen aus: Das Gehäuse dient als Tragstruktur für den Antrieb, den Energiespeicher, die Platinen und die Aufbaumodule (Funktion: *Bauteile tragen*); gleichzeitig schützt es diese Bauteile gegen Einflüsse aus der Umwelt (Funktion: *Bauteile schützen*). Um das Gehäuse herum sind Infrarot-Sensoren angebracht (Funktion: *Sensoren räumlich tragen*). Leiterbahnen überziehen innen und außen das Gehäuse (Funktionen: *Energie leiten, Signale leiten, Bauteile kontaktieren*).

Steht die Produktidee fest, wird die vorläufige Anforderungsliste detailliert. Diese war bewusst grob gehalten worden, um die Kreativität bei der Lösungsfindung nicht einzuschränken. Die detaillierte Anforderungsliste definiert die späteren Produkteigenschaften anhand von Kennwerten, damit bei der Gestaltung gezielt auf die Erfüllung dieser Anforderungen hingearbeitet werden kann.

Ergebnis: ausgewählte Lösungsidee, detaillierte Anforderungsliste

4.4.2.3 Wirkstruktur und Gestaltentwurf erstellen

Eingang: ausgewählte Lösungsidee

Methode: Spezifikationstechnik nach FRANK

Richtlinien: VDI 2014 Blatt 2, DIN IEC 62430

Die in der Prinziplösung ausgewählten Lösungen für die Teilfunktionen (z.B. Infrarotsensor für die Funktion *Umgebung erfassen*) werden über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse zur Wirkstruktur verknüpft. Die Wirkstruktur beschreibt erstmalig die prinzipielle Funktionsweise des Produkts: Die funktionsbestimmenden Systemelemente sowie deren Schnittstellen werden festgelegt. Dadurch können die Konsistenz der Systemelemente und störungsfreie Flüsse sichergestellt werden. In der *Spezifikationstechnik nach FRANK* ist die Erstellung der Wirkstruktur ausführlich beschrieben [Fra06, S. 111ff]. Bild 4-11 zeigt die Wirkstruktur des Miniaturroboter-Gehäuses.

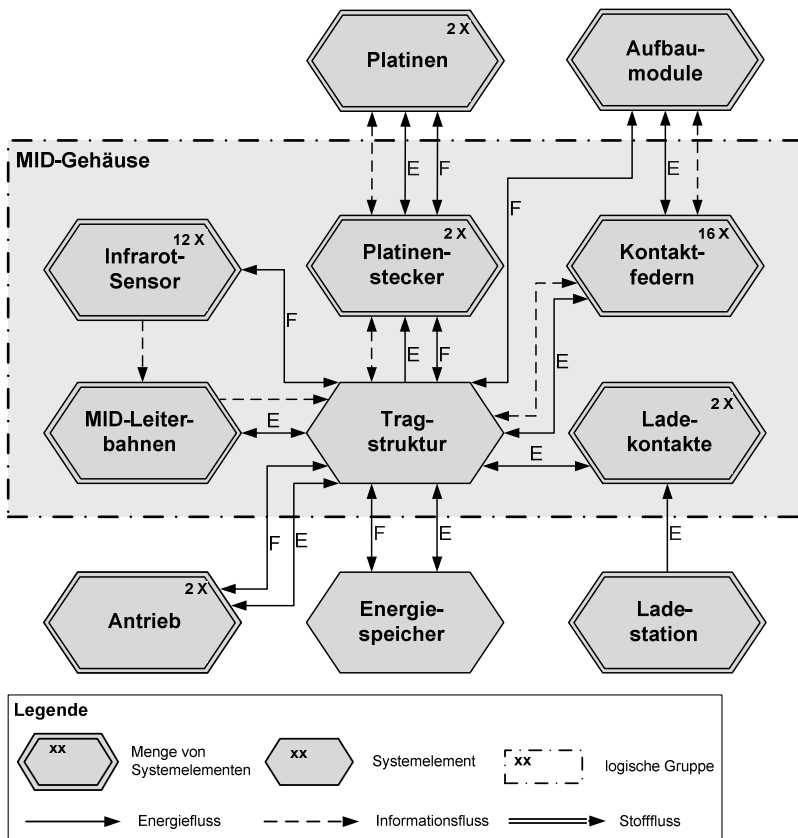


Bild 4-11: Wirkstruktur des MID-Gehäuses

Wichtigstes Element ist die Tragstruktur (Gehäuse). Alle weiteren Elemente sind daran befestigt. Es leitet Energie von der externen Ladestation zum Energiespeicher und zum Antrieb sowie Signale zwischen den Sensoren und den Platinen. Auch zu den Aufbauomodulen werden Energie und Signale geleitet.

Zur Beschreibung der Prinzipiöpfung gehört auch die Gestalt des MID-Teils. Sie ist notwendig, weil das zu verwendende MID-Verfahren maßgeblich von der Gestalt abhängt (siehe *Fertigungsprozess konzipieren*). Aus den Skizzen der Prinzipiöpfung (siehe *Lösungsideen generieren*) werden erste Gestaltentwürfe erstellt. Grundlagen zur Gestaltung von Kunststoffteilen stehen in der *VDI-Richtlinie 2014, Blatt 2 „Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund; Konzeption und Gestaltung“*. Die Entwürfe sollen die grundsätzliche Geometrie und Dimensionen des zu entwickelnden Produkts festlegen. Dabei müssen auch Geometrie und Anordnung eventueller Nachbarbaugruppen berücksichtigt werden. Aus der Wirkstruktur werden die Hauptelektronik-Komponenten und ihre Verbindungen miteinander entnommen; sie werden in diesen Gestaltentwürfen grob positioniert und der prinzipielle Leiterbahnverlauf konzipiert. Dabei werden vor allem die zur Entflechtung der Leiterbahnen benötigten Flächen bestimmt. Anregungen zur Elektronikgestaltung sind in der *DIN IEC 62430 „Umweltbewusstes Gestalten von elektronischen Produkten“* zu finden. Ergebnis ist ein vorläufiger Gestaltentwurf des Schaltungsträgers mit der prinzipiellen Anordnung der Elektronik und den Nachbarbaugruppen (Bild 4-12).

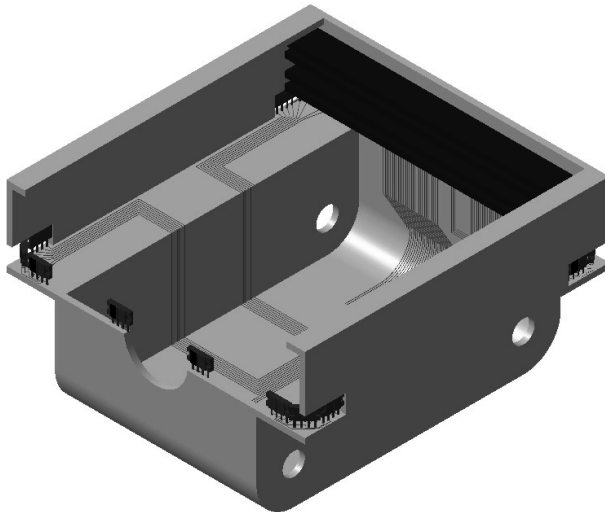


Bild 4-12: Gestaltentwurf des MID-Gehäuses (CAD-Modell)

Ergebnis: Wirkstruktur, Gestaltentwurf mit prinzipiellem Leiterbahnverlauf

4.4.2.4 Restriktionen durch Fertigung erfassen

Eingang: Wirkstruktur, Gestaltentwurf, Fertigungskonzept

Methode: Restriktions-Checkliste Fertigung

Auf Basis des parallel erarbeiteten Fertigungskonzepts wird die Verträglichkeit zwischen dem Produkt und der Fertigung überprüft. Dazu werden Restriktionen für die Produktgestaltung durch die Fertigungstechnologien bestimmt: Für das Verfahren Laserdirektstrukturierung stammen diese aus den Disziplinen Spritzguss, Strukturierung, Metallisierung (chemisch), Bestückung und Verbindungstechnik. Die Tabelle 4-2 zählt die zu beachtenden Restriktionen auf (*Restriktions-Checkliste Fertigung*).

Tabelle 4-2: Restriktionen an das Produkt durch die Fertigung

Fertigungsbereich	Resultierende Restriktion
Spritzguss	Entformbarkeit gewährleisten
	Unterschiedliche Materialdicken vermeiden
Laserstrukturierung	Zugänglichkeit des Lasers gewährleisten
	Maximal verarbeitbare Bauteilabmessungen beachten
	Flächige Metallisierungen vermeiden
	Aufspannpositionen reduzieren
Metallisierung	Säurefestigkeit des Werkstoffs beachten
	Anschlüsse für elektrische Metallisierung vorsehen
	Höhere Metallabscheidung an Ecken/Kanten beachten
Montage/ Bestückung	Zugänglichkeit für den Bestücker gewährleisten
	Bauteilplatzierung auf ebenen Flächen sicherstellen
	Chipmontage in Vertiefungen bevorzugen
Verbindungs- technik	Temperaturfestigkeit des Werkstoffs beachten
	Homogene Temperaturverteilung beachten

Die fett markierten Restriktionen können zu Ausschlusskriterien werden und sind besonders sorgfältig zu beachten. Herrscht Unverträglichkeit zwischen der Prinziplösung des Produkts und dem Fertigungskonzept, ist der Gestaltentwurf zu überarbeiten bzw. ein geeigneter Werkstoff zu wählen. Alternativ kann das Fertigungskonzept angepasst werden (siehe *Fertigungsprozess konzipieren*). Diese Abstimmung und Anpassung von Produkt- und Fertigungskonzept wird solange fortgesetzt, bis keine Schwächen im Produktkonzept enthalten sind.

Ergebnis: überarbeiteter Gestaltentwurf

Phasenergebnis: Lösungskonzept für das Produkt

4.4.3 Fertigungsprozess konzipieren

In dieser Phase wird das Lösungskonzept für den Fertigungsprozess erstellt. Zuerst werden die Restriktionen durch das Produkt an den Fertigungsprozess ermittelt. Danach werden die Fertigungstechnologien ausgewählt und daraus die Prozesskette konzipiert (Bild 4-13). Ergebnis dieser Phase ist das Lösungskonzept für den Fertigungsprozess.

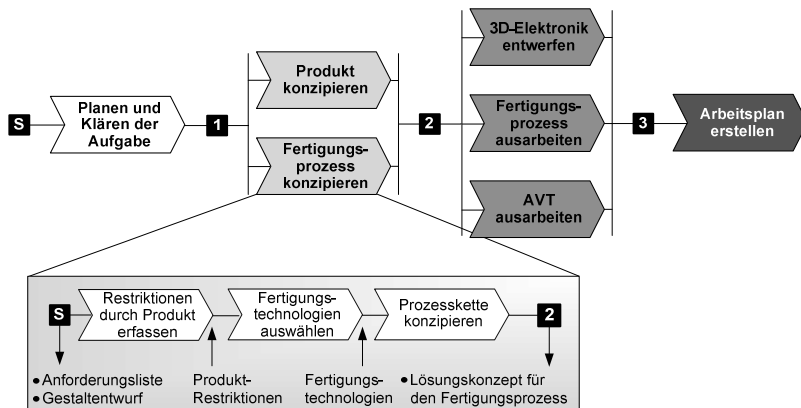


Bild 4-13: Prozessschritte der Phase „Fertigungsprozess konzipieren“

Zwischen Produkt und Produktionssystem herrschen zahlreiche Abhängigkeiten. Die Phasen *Produkt konzipieren* und *Fertigungsprozess konzipieren* bilden daher grundsätzlich einen iterativen Zyklus, der mehrfach durchlaufen wird.

4.4.3.1 Restriktionen durch Produkt erfassen

Eingang: detaillierte Anforderungsliste, Gestaltentwurf

Methode: Restriktions-Checkliste Produkt

Durch seine Eigenschaften erzeugt das Produkt Anforderungen an die Fertigung. Entscheidend dafür sind bestimmte Merkmale des Gestaltentwurfs und bestimmte Anforderungen aus der Anforderungsliste: Beispielsweise können sehr dreidimensional verlaufende Leiterbahnen nicht mit allen MID-Verfahren hergestellt werden. Insgesamt charakterisieren acht Merkmale eine MID-Prinziplösung [Pei07, S. 114]. In Tabelle 4-3 sind diese Merkmale in der linken Spalte aufgelistet. Jedes Merkmal besitzt verschiedene Ausprägungen, das Merkmal „Leiterbahnführung“ beispielsweise die Ausprägungen „Metallisierung in einer Ebene“, „räumliche Metallisierung auf einer Seite“ und „Metallisierung auf allen Seiten“. Jede Ausprägung stellt unterschiedliche Anforderungen an das MID-Verfahren. Diese werden in der rechten Spalte mit einer Skala von 1 (geringe Anforderung) bis 5 (hohe Anforderung) bewertet.

Tabelle 4-3: Restriktions-Merkmale des Produktkonzepts [Pei08, S. 115]

Merkmal	Eigenschaften der Prinziplösung (Ausprägung)	Anforderung (Bewertung)
Leiterbahn- führung	• Metallisierung in einer Ebene; gut zugänglich	1
	• räumliche Metallisierung; liegt auf einer Seite	3
	• Metallisierung auf allen Seiten	5
Flächige Metallisie- rung	• keine Flächen, nur Leiterbahnen	1
	• kleinere Flächen (ca. 1-3 cm ²)	3
	• große Flächen (ab 10 cm ²)	5
Kleinste Leiterbahn- breite	• 350 µm	1
	• 150 µm	3
	• 80 µm	5
Maximale Strom- stärke	• geringe Ströme (unter 2 Ampere)	1
	• mittlere Ströme (4-6 Ampere)	3
	• sehr hohe Ströme (über 8 Ampere)	5
Kunststoff	• der Kunststoff ist frei wählbar	1
	• Auswahl eingeschränkt (z.B. wegen Lötbarkeit)	3
	• Kunststoff ist fest vorgegeben	5
Varianten	• keine	1
	• Teile des Leiterbahnlayouts sind unterschiedlich	3
	• das gesamte Leiterbahnlayout ist unterschiedlich	5
Losgröße	• über 100.000 Stück	1
	• 10.000 bis 100.000 Stück	3
	• weniger als 5.000 Stück	5
Kosten	• geringer Kostendruck; andere Merkmale wichtiger	1
	• mittlerer Kostendruck	3
	• hoher Kostendruck; jeder Cent zählt	5

Skala:

1 = geringe Anforderung (jedes MID-Herstellverfahren erfüllt die Anforderung)

5 = hohe Anforderung (die Auswahl an MID-Herstellverfahren wird dadurch eingeschränkt)

Die Merkmale stellen die Restriktionen des Produkts an die Fertigung dar (*Restriktions-Checkliste Produkt*): Das MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung muss diese Anforderungen erfüllen. Sind die Anforderungen des Produkts bei einigen Merkmalen höher als die Anforderungserfüllung durch das MID-Verfahren, so gibt es zwei Möglichkeiten: Zum einen kann auf ein anderes MID-Verfahren mit einer höheren Anforderungserfüllung gewechselt werden (z.B. 2K-Spritzguss, wenn die Leiterbahnführung zu dreidimensional für die Laserdirektstrukturierung ist), anderenfalls ist das Produktkonzept zu überarbeitet. Oft müssen Kompromisse gemacht und solange Fertigungs- und Produktkonzept überarbeitet werden, bis eine Übereinstimmung erreicht ist. Hier zeigt sich das enge Wechselspiel zwischen Produkt- und Prozesskonzipierung.

In der Tabelle 4-3 ist zugleich das Merkmalsprofil des Miniaturroboter-Gehäuses fett dargestellt: Metallisierung auf allen Seiten, feine Leiterbahnen-Breite, geringe Ströme, Einschränkung auf bestimmte Kunststoffe (hochtemperaturfest), keine Varianten, geringe Losgröße, geringer Kostendruck.

Das Merkmal „Losgröße“ ist nicht nur für die Überprüfung und Bestimmung des geeigneten MID-Verfahrens wichtig: Von der geplanten Stückzahl hängen auch die Wahl des Werkzeugmaterials (Stahl statt Aluminium), der Grad der Automatisierung (manuelles oder automatisches Bestücken/Verlöten) sowie der Einsatz von Handhabungssystemen ab.

Ergebnis: Restriktionen durch das Produkt

4.4.3.2 Fertigungstechnologien auswählen

Eingang: Restriktionen durch das Produkt

Methode: Eigenschaftskarten der MID-Verfahren

In diesem Prozessschritt werden die Technologien für die Fertigung des Schaltungsträgers sowie für die Montage und Verbindung der elektronischen Bauteile ausgewählt. Zunächst wird überprüft, ob die Laserdirektstrukturierung für die Fertigung des Schaltungsträgers am besten geeignet ist.

Um das geeignetste MID-Verfahren zu bestimmen, werden die Eigenschaftsprofile der MID-Verfahren (*Eigenschaftskarten der MID-Verfahren nach PEITZ*, siehe Kapitel 3.3.1) mit dem Merkmalsprofil des Produkts verglichen. Dies geschieht anhand der Überdeckung der Spinnendiagramme: Das Verfahren, welches das Merkmalsprofil des Produktes am besten erfüllt, wird ausgewählt [Pei08, S. 117f]. Diese Funktion wird auch von der Wissensbasis unterstützt. Für das Miniaturroboter-Gehäuse zeigt sich, dass das LDS-Verfahren tatsächlich am besten geeignet ist. Das liegt an den Produktmerkmalen räumliche Leiterbahnführung, feine Leiterbahnbreiten und geringe Losgröße. Kein anderes MID-Verfahren kann diese Anforderungen kombiniert erfüllen.

Das Miniaturroboter-Gehäuse integriert auch elektronische Bauteile. Für deren Montage und Verbindung werden ebenfalls Technologien ausgewählt. Die Anforderung „für (Klein-)Serie auslegen“ (siehe *Anforderungen analysieren*) erfordert für die Elektronikbestückung einen möglichst hohen Automatisierungsgrad; aus Kostengründen sollen Standardverfahren eingesetzt werden. Im Miniaturroboter-Gehäuse wird daher die Lotpaste über eine eingelegte Stahlschablone mit einer Rakel aufgetragen (Schablonendruck), die Bauteile werden mit einem Bestückautomaten und bei unerreichbaren Stellen manuell gesetzt und in einem Reflow-Ofen mit dem MID-Schaltungsträger verlötet.

Ergebnis: ausgewählte Fertigungstechnologien

4.4.3.3 Prozesskette konzipieren

Eingang: ausgewählte Fertigungstechnologien

Methode: Spezifikationstechnik nach MICHELS

Richtlinien: DIN 1530, DIN 60825, VDI 2421, DIN 61188, VDI 2251

Als letzter Schritt werden die Arbeitsvorgänge und deren Prozessfolge für die Fertigung, Montage und Prüfung des MID-Teils bestimmt. Ein großer Teil der Arbeitsvorgänge steht bereits mit dem MID-Verfahren fest: Für die Laserdirektstrukturierung sind das Spritzgießen des Kunststoffteils, das Strukturieren der Oberfläche mittels Laser und das chemische Metallisieren des Kunststoffteils in eben dieser Reihenfolge. Für die Montage und Verbindung der elektronischen Bauteile erfolgt erst der Lotpastenauftrag, anschließend das Bestücken mit elektronischen Bauteilen und zuletzt deren Verlötlung. Zwischendurch sind Qualitätsprüfungen vorzusehen. Es ist zu definieren, was geprüft werden soll, z.B. die elektrische Leitfähigkeit nach der Metallisierung des Schaltungsträgers. Bei der Konzipierung der oben genannten Prozessschritte helfen folgende Richtlinien: *DIN 1530 „Press-, Spritzgieß- und Druckgießwerkzeuge“*, *DIN 60825 „Sicherheit von Lasereinrichtungen“*, *VDI 2421 „Kunststoffoberflächenbehandlung in der Feinwerktechnik; Metallisieren“*, *DIN 61188 „Leiterplatten und Flachbaugruppen - Teil 5-1: Betrachtungen zur Montage“* und *VDI 2251 „Feinwerkelemente - Lötverbindungen“*.

Aus den Arbeitsvorgängen des MID-Verfahrens leiten sich die notwendigen Fertigungsmittel ab, d.h. Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen. Im Regelfall werden für jeden Arbeitsvorgang ein oder mehrere Fertigungsmittel benötigt. Für das Beispiel Laserdirektstrukturierung umfasst dies die Spritzgussmaschine (inkl. Werkzeug), die Laseranlage (inkl. einer Aufspanvorrichtung) und die Galvanikanlage (mehrstufig: Kupferbad, Nickelbad, Goldbad, Spülbad). Für die Montage- und Verbindungstechnik werden eine Rakelmaschine (zum Auftragen der Lotpaste), ein Bestückautomat und ein Lötöfen benötigt.

Zur Beschreibung des Lösungskonzepts des Fertigungsprozesses werden die Partialmodelle der *Spezifikationstechnik nach MICHELS* verwendet. Das **Partialmodell Prozessfolge** beschreibt die logische Abfolge aller Arbeitsvorgänge zur Fertigung des MID-Produkts. Das **Partialmodell Produktionsstruktur** beschreibt die erforderlichen Fertigungsmittel sowie deren Eigenschaften und Beziehungen. Bei den Beziehungen handelt es sich um logische Beziehungen (Abfolge der Arbeitsvorgänge, Zugehörigkeit von Fertigungsmitteln zum Arbeitsvorgang) und Materialflüsse (durch das Produktionssystem). [Mic06, S. 95] Bild 4-14 zeigt das Lösungskonzept für den Fertigungsprozess des MID-Gehäuses. Dabei sind nur die wertschöpfenden Arbeitsvorgänge abgebildet. Handhabungs-, Transport- und Prüfvorgänge sind nicht dargestellt.

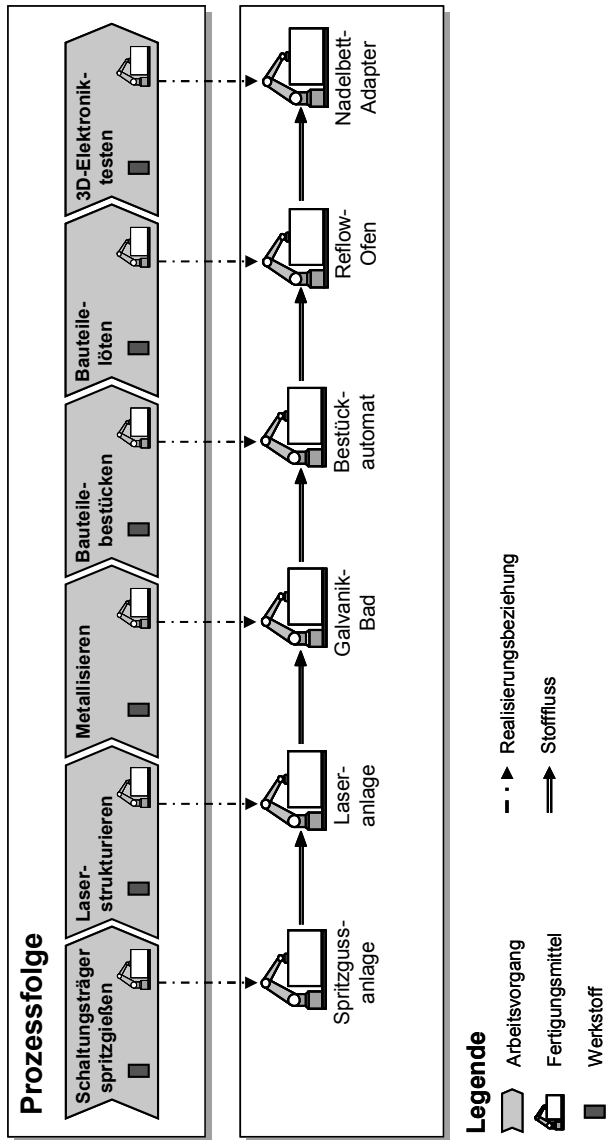


Bild 4-14: Lösungskonzept für den Fertigungsprozess des MID-Gehäuses

Ergebnis: Lösungskonzept für den Fertigungsprozess

4.4.4 3D-Elektronik entwerfen

Das Lösungskonzept des dreidimensionalen Schaltungsträgers wird in dieser Phase konkretisiert. Die Konkretisierung umfasst sowohl die Gestalt des Schaltungsträgers als auch den Entwurf der darauf befindlichen elektronischen Schaltung. Da diese Tätigkeiten Spezialisten aus unterschiedlichen Domänen erfordern, sind sie als parallele Prozesse dargestellt – einen mechanisch dominierten für den Schaltungsträger und einen elektrisch dominierten für die Schaltung. Dennoch sind beide Prozesse integrativ und in enger Absprache miteinander durchzuführen, da als Ergebnis ein gemeinsames Bauteil entsteht (Bild 4-15). Der Schaltungsträgerentwurf basiert dabei auf dem Vorgehen nach PAHL/BEITZ [PB07], der Schaltungsentwurf auf GAJSKI [Gaj97] und ROSE [Ros92]. Dazu wird der Schaltungsträger zunächst grob-, dann feingestaltet und anschließend ausgearbeitet. Der Schaltungsentwurf besteht aus den Schritten, „Schaltung entwerfen“, „Schaltplan erstellen“ und „Layout erstellen“. Dabei müssen stets Wechselwirkungen mit den Fertigungsprozessen berücksichtigt werden. Die daraus resultierenden Restriktionen werden zu Beginn jeder Phase genannt und am Beispiel des Miniaturroboter-Gehäuses erläutert.

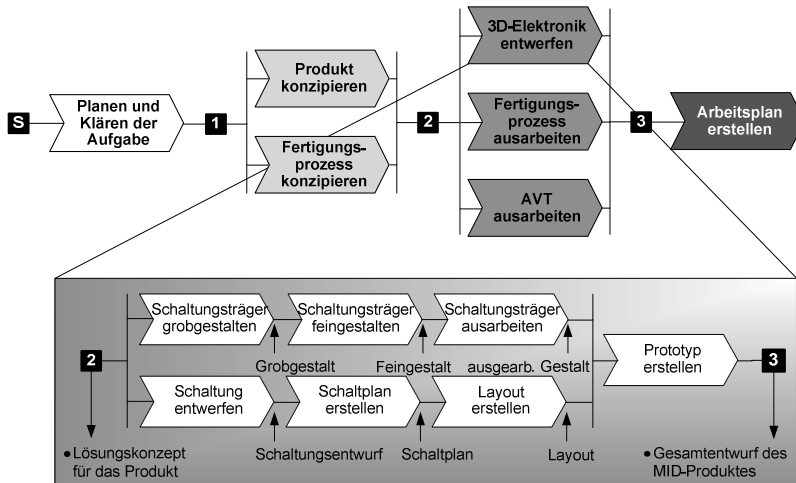


Bild 4-15: Prozessschritte der Phase „3D-Elektronik entwerfen“

4.4.4.1 Schaltungsträger grobgestalten

Eingang: Lösungskonzept für das Produkt, Schaltungsentwurf

Methode: Gestaltungsprinzipien

Richtlinien: VDI 2424, VDI 2012

Restriktionen: Entformbarkeit, Temperatur- und Säurebeständigkeit, Zugänglichkeit des Lasers, maximale Bauteilabmessungen

Als erster Schritt zur Schaltungsträgergestaltung werden aus der Anforderungsliste die gestaltbestimmenden Anforderungen erarbeitet. Dazu gehören abmessungs- und anordnungsbestimmende Anforderungen, z.B. Größe und Lage anderer Bauteile, aber auch maximale Arbeitsbereiche der Fertigungsanlagen. So können z.B. Reflow-Öfen nur Baugruppen mit einer maximalen Höhe von 3 cm verlöten. Auch Ergonomie- und Sicherheitsaspekte sind zu berücksichtigen. Die Technologie MID unterstützt die Erfüllung ergonomischer Anforderungen durch ihre hohe Gestaltungsfreiheit. Nachdem die gestaltbestimmenden Anforderungen ermittelt wurden, wird der Werkstoff festgelegt. Dieser beeinflusst aufgrund seiner Eigenschaften sowohl das Produkt (in Form von Wandstärken, Entformungsschrägen, Schwindung sowie Materialpreis) als auch den Fertigungsprozess (durch Verarbeitungstemperatur und -druck, Temperatur- und Säurebeständigkeit und zusätzliche Prozesse wie z.B. eine vorhergehende Trocknung bei LCP). Bevor mit der Gestaltung des Schaltungsträgers begonnen werden kann, werden die Haupt- und Nebenfunktionsträger bestimmt. Hauptfunktionsträger erfüllen die wesentlichen Funktionen des Bauteils, z.B. Bauteile tragen, verbinden oder schützen. Nebenfunktionen sind beispielsweise Dicht-, Stütz- und Kühlfunktionen.

Danach beginnt die Gestaltung des Schaltungsträgers: Ausgehend vom Gestaltentwurf aus der Prinziplösung des Produkts werden zuerst die Hauptfunktionsträger grob gestaltet. Dazu werden für jeden Funktionsträger gestalterische Lösungen gesucht, die anschließend zur Gesamtgestalt des Schaltungsträgers zusammengeführt werden. Zu beachten sind besonders die Bereiche, in denen Leiterbahnen verlaufen und elektronische Bauteile platziert werden sollen. Diese hängen auch von der „Gestalt“ der Elektronik ab. Zwar wurde in der Prinziplösung der prinzipielle Leiterbahnverlauf bestimmt, letztlich entscheidet aber das dreidimensionale Layout. Die Anforderungen an diese Bereiche wie z.B. Schnittstellen, Anzahl von Leitungen etc. sind daher mit der parallel erfolgenden Schaltungsentwicklung abzusprechen (siehe *Schaltung entwerfen*). Richtlinien zum Gestalten bieten die *VDI-Richtlinien 2424 „Industrial Design“* und *2012 „Gestalten von Werkstücken aus GFK“*. Von der Grobgestalt werden unter Umständen mehrere Entwürfe gemacht. Nach Absprache mit der Fertigung wird einer dieser Entwürfe zur Weitergestaltung ausgewählt.

Für die Grobgestaltung des Miniaturroboter-Gehäuses wird die Gestalt aus der Prinziplösung beibehalten, die gestaltbestimmenden Anforderungen ergeben sich aus den Nachbarbaugruppen: Um den Schwerpunkt tief zu halten und damit das dynamische Verhalten des Miniaturroboters zu verbessern, werden die Motoren und der Akku unten im Gehäuse positioniert. Dazu muss die untere Wanne 90 x 55 x 30 mm³ groß sein. Das gesamte Gehäuse darf die Maße 160 x 160 mm nicht überschreiten, da dies der maximale Arbeitsbereich der Laseranlagen zur Laserstrukturierung ist (Restriktion *maximale Bauteilabmessung*). Als Werkstoff wird LCP gewählt, da es LDS-geeignet und temperaturbeständig bis 340°C ist (Restriktion *Temperatur- und Säurebeständigkeit*) [Wei05, S. 42]. Die Hauptfunktionsträger des MID-Gehäuses werden entsprechend ihren Anforderungen gestaltet: Die Motoren werden an das Gehäuse geschraubt, daher müssen die Wände senkrecht sein (Radsturz) und dürfen später nicht mit Entformungsschrägen versehen werden (Restriktion *Entformbarkeit*). Die Sensoren werden auf den Radkästen positioniert und dafür Aussparungen vorgesehen. Die Platinen werden über Steckerleisten an der ebenfalls senkrechten Rückwand angebracht. Alle Wände werden so gestaltet, dass sie die innen liegenden Bauteile vor Stößen schützen. Insgesamt ist die Gehäusekonstruktion sehr offen gehalten, um eine gute Entformbarkeit und Zugänglichkeit des Lasers zu gewährleisten (Restriktionen *Entformbarkeit, Zugänglichkeit des Lasers*). Bild 4-16 zeigt die Grobgestalt des MID-Gehäuses. Nebenfunktionen (Kontaktierung der Aufbaumodule, Wärmeabfuhr) sind nicht ausgearbeitet.

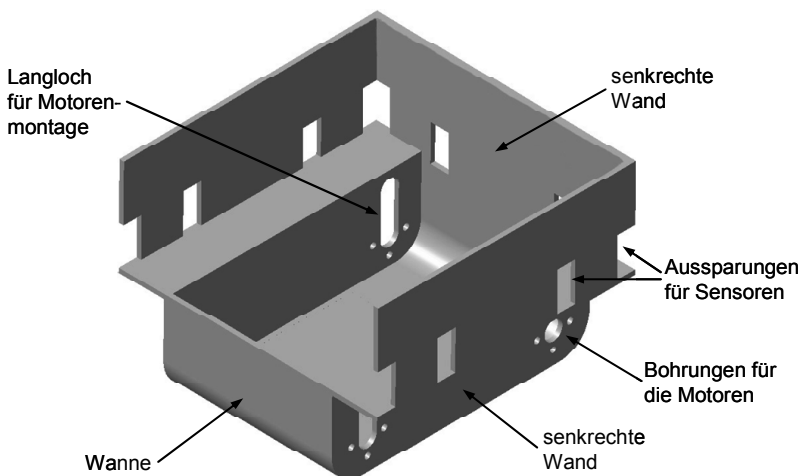


Bild 4-16: Grobgestalt des Schaltungsträgers (MID-Gehäuse)

Ergebnis: Grobgestalt des Schaltungsträgers

4.4.4.2 Schaltungsträger feingestalten

Eingang: Grobgestalt des Schaltungsträgers, Schaltplan

Methode: Variation der Gestalt

Richtlinien: VDI 2013

Restriktionen: Materialdicke (Festigkeit), Chipmontage, Bohrungen meiden

In diesem Schritt werden für die verbliebenen Nebenfunktionen Lösungen gesucht. Als Nebenfunktionsträger kommen z.B. Norm- oder Katalogteile zum Einsatz. Einige Nebenfunktionsträger können direkt in das Gehäuse integriert werden, z.B. metallisierte Flächen zur Wärmeabfuhr. Anregungen zur Gestaltung von Nebenfunktionsträgern bieten Konstruktionskataloge für Kunststoffteile und der MID-Konstruktionskatalog nach PEITZ.

Anschließend werden die Hauptfunktionsträger unter Berücksichtigung der Nebenfunktionslösungen feingestaltet. Feingestalten heißt, alle notwendigen Einzelheiten endgültig festzulegen [PB07, S. 309]. Alle Funktionsträger werden dazu in ein Gestaltmodell integriert und dieses im Detail gestaltet. Zuerst werden die Wandstärken festgelegt. Zusammen mit den Abmessungen der Nachbarbauteile ergeben sich daraus die exakten Abmessungen des gesamten Schaltungsträgers. Anschließend werden die Kontaktflächen zu Nachbarbaugruppen sowie die Form und Größe der zu bestückenden Flächen gestaltet. Dazu müssen aus dem parallel erstellten Schaltplan Informationen berücksichtigt werden (siehe *Schaltplan erstellen*). Im Schaltplan sind alle elektronischen Bauelemente festgelegt (außer Brückenwiderstände, die keine elektrische Funktion haben). Größe und Menge der Bauelemente wirken sich auf die zu bestückenden Flächen aus; ihre grobe Positionierung auf dem Schaltungsträger liefert gleichzeitig die Grundlage für das spätere Layout.

Abschließend werden auch die Nebenfunktionsträger feingestaltet. Die Methode *Variation der Gestalt* hilft, möglichst optimale Teilgestaltungen zu erhalten. Unterstützung bietet auch die *VDI-Richtlinie 2013 „Dimensionierung von Bauteilen aus GFK“*. Der Schaltungsträger wird solange detailliert, bis ein konsistentes Gestaltmodell entstanden ist, das allen definierten Anforderungen genügt. Dies ist die Feingestalt des Schaltungsträgers.

Die Nebenfunktionen beim Miniaturroboter-Gehäuse sind „Aufbaumodul elektrisch kontaktieren“, „Aufbaumodul tragen“ und „Wärme abführen“. Für die erste Nebenfunktion wird eine Fläche am oberen Rand des Gehäuses vorgesehen. Auf dieser werden Kontaktflächen metallisiert und die Aufbaumodule über Federkontakte elektrisch kontaktiert. Magnete halten die Aufbaumodule auf dem Gehäuse (Funktion „Aufbaumodul tragen“). Zur Wärmeabfuhr werden oben und unten Lüftungsschlitze ins Gehäuse integriert (Bild 4-17). Diese er-

möglichen ein Entweichen der warmen Luft durch Eigenkonvektion („Kamin-effekt“) und sollten ausreichen, um die Elektronik zu kühlen. Die Wanddicke des Gehäuses wird auf 1,5 mm festgelegt (Restriktion *Materialdicke*). Die Festigkeit des Gehäuses hält damit den möglichen auftretenden Belastungen stand. Die Sensoren werden, anders als im Produktkonzept, von außen auf das Gehäuse aufgebracht. Da es sich um THT-Bauteile handelt, werden die Beinchen durch Bohrungen im Gehäuse gesteckt und innen verlötet. Dies widerspricht der Restriktion *Bohrungen meiden*, da Bohrungen insbesondere in räumlichen Schaltungsträgern mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden sind und die Prozesskette verlängern. Allerdings existierten keine geeigneten alternativen Sensoren, daher musste auf THT-Bauteile zurückgegriffen werden. Da keine ungehäusten Chips auf das Miniaturroboter-Gehäuse bestückt werden (siehe Schritt *Schaltplan erstellen*), müssen keine Versenkungen in das Gehäuse modelliert werden (Restriktion *Chipmontage*). Auch die Breite der „Radkästen“ wird an die Ergebnisse der Schaltungserstellung angepasst: Durch die dort platzierten Mikrocontroller müssen diese mindestens 15 mm breit sein.

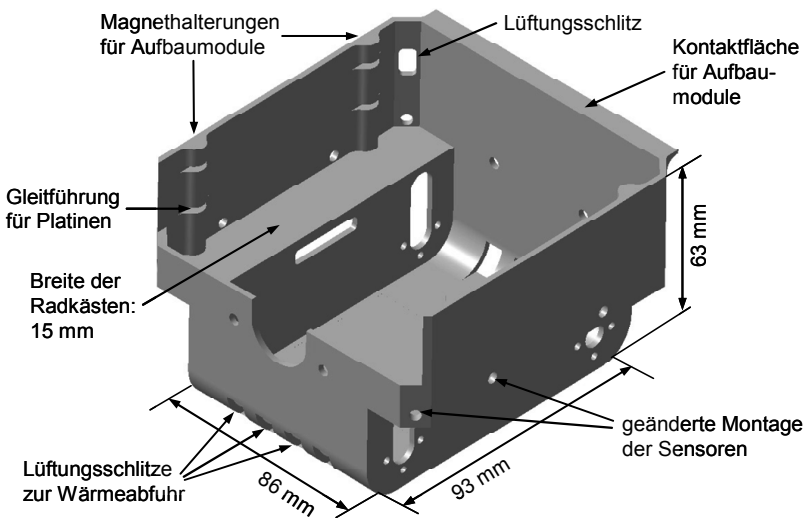


Bild 4-17: Feingestalt des Schaltungsträgers

Ergebnis: Feingestalt des Schaltungsträgers

4.4.4.3 Schaltungsträger ausarbeiten

Eingang: Feingestalt des Schaltungsträgers, Layout

Methode: Numerische Simulation (Spritzgussimulation)

Richtlinien: DIN 16901

Restriktionen: Entformungsschrägen, Kantenradien, Angussart und -position, Auswerferstellen

Im letzten Schritt wird die Feingestalt des Schaltungsträgers ausgearbeitet. Zunächst wird der Schaltungsträger an das parallel erstellte Layout angepasst: Die Größe und Position der Bauteile wird ebenso kontrolliert wie der exakte Verlauf der Leiterbahnen. Zu klein geratende Flächen und Hindernisse für Leiterbahnen und Bauteile werden angepasst. Bohrungen z.B. für THT-Bauteile und Verbindungselemente wie Schnapphaken, Flansche und Zentrierhilfen werden hinzugefügt. Anschließend wird der Schaltungsträger hinsichtlich Form, Oberfläche und Toleranzen optimiert. Einzuhaltende Toleranzen sind in der *DIN 16901* „Kunststoff-Formteile; Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße“ definiert. Fokus ist dabei eine fertigungsgerechte Gestaltung: Wanddickenübergänge müssen sanft verlaufen, Kanten mit Radien versehen werden usw. In Rücksprache mit dem Werkzeugfertiger sind Entformungsschrägen zu gestalten und die Art und Position des Angusses zu beachten. Die Auswerferstifte des Werkzeugs hinterlassen Abdrücke auf der Oberfläche, die sich nicht im Layoutbereich befinden dürfen. *Spritzgussimulationen* unterstützen das fertigungsgerechte Gestalten. Das Bauteil wird abschließend auf Fehler kontrolliert und diese beseitigt.

Beim Miniaturobster-Gehäuse werden aus Gründen der besseren Entformbarkeit die Magnethalterungen für die Aufbaumodule nach außen verlegt. Alle senkrechten Flächen (außer der Rückseite und der Wannenseiten, die senkrecht sein müssen) werden mit 1° Entformungsschrägen versehen (Restriktion *Entformungsschrägen*). Nachdem die genaue Position der Sensoren kontrolliert wurde, werden Bohrungen für die Sensorbeinchen modelliert. Die Lüftungsschlitze wurden vergrößert, um eine bessere Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Wanddickenübergänge und Kanten werden mit einem Radius von 0,2 mm verrundet (Restriktion *Kantenradien*). Das gilt insbesondere im Bereich der Leiterbahnen, da es sonst zu Problemen bei der Metallisierung kommen kann. In Absprache mit dem Werkzeugmacher werden die Abdruckstellen der Auswerferstifte (Restriktion *Auswerferstellen*) sowie die Position des Angusses modelliert (Restriktion *Angussposition*). Der Anguss hat keine Auswirkungen auf das elektrische Layout, jedoch liegen die Auswerferstellen im Layoutbereich. Das muss bei der Erstellung des Layouts berücksichtigt werden. Bild 4-18 zeigt die finale Gestalt des MID-Schaltungsträgers.

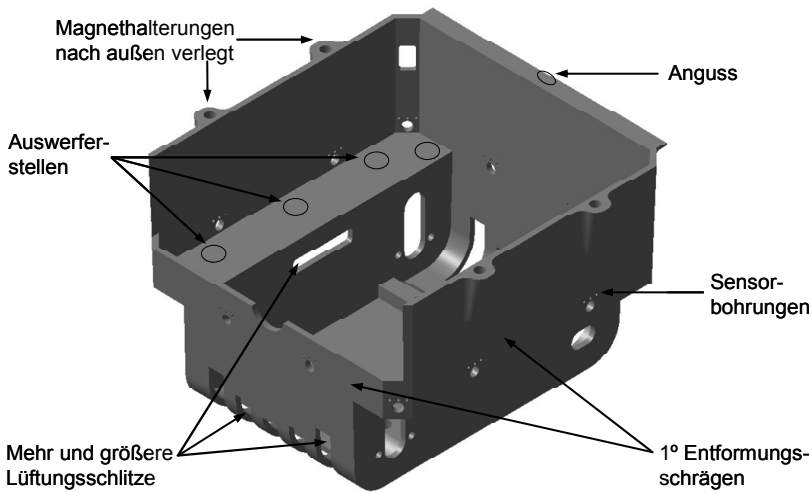


Bild 4-18: Ausgearbeiteter Schaltungsträger

Ergebnis: Ausgearbeiteter Schaltungsträger

4.4.4.4 Schaltung entwerfen

Eingang: Lösungskonzept für das Produkt

Methode: Funktionsmodellierung

Richtlinie: DIN EN 61082

Der Schaltungsentwurf (auch Funktionaler Entwurf) beginnt mit der Strukturierung der zu entwickelnden Schaltung. Es ist zweckmäßig, eine größere Schaltung in (funktionale) Blöcke aufzuteilen. Übliche Funktionsblöcke sind *Steuerelektronik* zur Datenverarbeitung und Kommunikation, *Signalanpassung* für Sensoren, Anzeigen und Bedienelemente, *Leistungselektronik* zur Aktorsteuerung und *Energieversorgung* [VDI2224, S. 26]. Die Strukturierung basiert auf der Wirkstruktur. Die elektronischen Systemelemente werden analysiert und den Funktionsblöcken zugeordnet. Innerhalb der Funktionsblöcke werden die Systemelemente solange durch *Funktionsmodellierung* verfeinert, bis die einzelnen Elemente durch bekannte Grundfunktionen (z.B. Takt geben), Standard Schaltkreise (z.B. Addierer) und Bauelemente (z.B. Transistor) ersetzt werden können. Die in der Schaltungstechnik übliche Notation ist das Blockschaltbild, wie sie in der *DIN EN 61082 „Dokumente der Elektrotechnik“* definiert ist. Wirkstruktur und Blockschaltbild sind aber äquivalent.

Bereits beim Schaltungsentwurf muss die spätere Prüfung des Produkts in der Serienfertigung berücksichtigt werden [Hän06, S. 19]. Daher werden schon jetzt Prüfpunkte festgelegt. Prüfpunkte sind Kontakte für Prüfeinrichtungen,

häufig Kontaktflächen oder -stifte. Sie werden später im Layout erzeugt. An dieser Stelle ist lediglich festzulegen, welche Signale geprüft werden sollen.

Für die MID-Schaltung werden die Systemelemente aus der Wirkstruktur durch elektronische Funktionselemente ersetzt, z.B. durch Infrarot-LEDs. Weitere Bauteile wie MOS-Transistoren zum Schalten der LEDs und Mikrocontroller (μC) zur Signalvorverarbeitung werden ergänzt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Signalflüsse gelegt: So senden die Sensoren analoge Signale über einen Analog-Digital-Wandler (ADC) an den Mikrocontroller, die weitere Kommunikation erfolgt digital über einen I²C-Bus. Zudem werden Spannungsversorgung und Masse der Funktionselemente festgelegt. Die Anzahl der angeschlossenen Elemente (z.B. sechs Sensoren pro Mikrocontroller) und die Art der Schnittstellen geben Hinweise bei der späteren Auswahl der Bauteile. Der Schaltungsentwurf für das MID-Gehäuse ist in Bild 4-19 dargestellt.

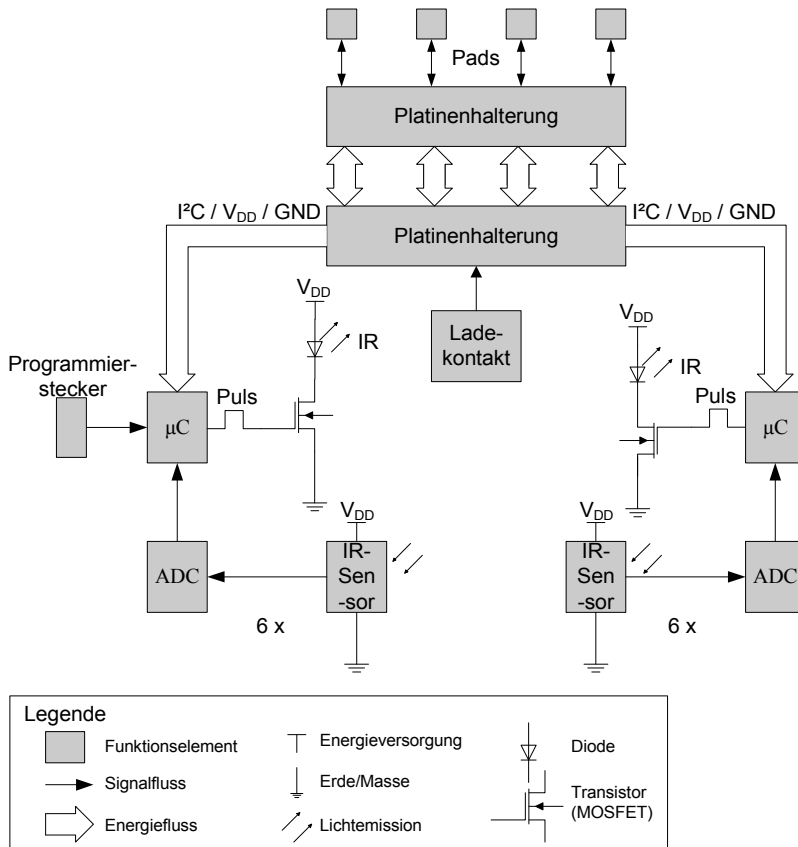


Bild 4-19: Schaltungsentwurf für das MID-Gehäuse

Ergebnis: Schaltungsentwurf inkl. Prüfpunkte

4.4.4.5 Schaltplan erstellen

Eingang: Schaltungsentwurf, Feingestalt des Schaltungsträgers

Methoden: Numerische Simulation (z.B. SPICE)

Richtlinien: DIN 60617, 2002/95/EG (RoHS)

Restriktionen: THT-Bauteile meiden, UltraFinePitch-Bauteile meiden, Temperaturfestigkeit der Bauteile

Hauptarbeit in diesem Schritt ist die Eingabe des Schaltungsentwurfs in ein entsprechendes ECAD-Programm. Ergebnis ist der Schaltplan. Die Notation folgt dabei der *DIN 60617 „Graphische Symbole für Schaltpläne“*. Zur Erstellung des Schaltplans werden zunächst Bauelemente zur Realisierung der Funktionselemente gesucht. Erfahrungswissen, Lösungselementbibliotheken und Herstellerkataloge unterstützen die Auswahl der Bauelemente. In Datenblättern der Hersteller sind häufig Musterbeschaltungen enthalten. Sie geben an, welche zusätzlichen Bauteile für den Betrieb eines Bauelements benötigt werden und vervollständigen die Schaltung. Am Ende dieses Schrittes steht die Festlegung sämtlicher in der Schaltung enthaltenen Bauteile, möglichst mit Bauteilwerten. Dabei sind folgende Angaben minimal erforderlich [Ros92, S. 77]:

- bei passiven Bauteilen (Widerstände, Spulen etc.) die Bauform,
- bei aktiven Bauteilen (Dioden, Transistoren etc.) die Bauform und die Montageart (liegend, stehend, mit oder ohne Kühlkörper),
- bei integrierten Schaltungen die genaue Gehäuseform und
- bei elektromechanischen Bauteilen die genaue Typenbezeichnung.

Gemäß der *EG-Richtlinie 2002/95/EG „Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)“* müssen die ausgewählten Bauteile frei von giftigen Substanzen sein. Außerdem müssen bleifreie Lote eingesetzt werden. Da bleifreie Lote in der Regel einen höheren Schmelzpunkt aufweisen, also heißer verlötet werden, müssen auch die Bauteile eine entsprechende Temperaturfestigkeit besitzen.

Die ausgewählten Bauelemente werden dann im Schaltplan platziert, möglichst unter Eingabe der zugehörigen Parameter wie Widerstandswert, Kapazität, etc. Die Ein- und Ausgänge der Bauelemente werden anschließend miteinander verknüpft und den Verbindungen eindeutige Signalnamen zugeordnet. Platzierung und Verknüpfung der Bauelemente sind rein logischer Natur; sie haben keinen direkten Bezug zum Layout auf dem Schaltungsträger. Dennoch ist die Feingestalt des Schaltungsträgers bei der Schaltplanerstellung zu berücksichtigen: Die festgelegten Bauelemente müssen in Größe und Typ zur Gestalt des Schaltungsträgers passen (siehe *Schaltungsträger feingestalten*). Aus dem zur

Verfügung stehenden Platzangebot lassen sich Informationen zu Bauteiltyp, -größe und Bauform ableiten. Anschließend werden die definierten Prüfpunkte (siehe *Schaltung entwerfen*) eingefügt. Zuletzt wird die Richtigkeit des Schaltplans mit einem Design Rule Check (DRC) überprüft: Der Rechner kontrolliert, ob alle Verknüpfungen richtig gezogen wurden (Ausgang auf Eingang, digital auf digital usw.) und gibt entsprechende Fehlermeldungen. Diese werden korrigiert und der DRC wiederholt, bis keine Fehler mehr ausgegeben werden.

Das Verhalten der Schaltung kann durch *Simulation* überprüft werden. Dabei kommen so genannte SPICE-Werkzeuge zum Einsatz. Stimmt das Verhalten der Schaltung (z.B. Laufzeit, Leitungsabschluss, etc.) nicht mit der Spezifikation aus der Anforderungsliste überein, muss die Schaltung überarbeitet werden. Der letzte Schritt besteht in der Erzeugung der Netz- und Bauteilliste. Die Netzliste enthält die Bezeichnung aller Bauteile mit deren Bauteilart, Gehäuseform und Wert sowie die Verbindungen zwischen den Bauteilen. Sie ist das Bindeglied zwischen dem Schaltplanprogramm und dem Layouteditor. Die Bauteilliste enthält alle in der Schaltung verwendeten Bauteile.

Beim Beispiel des Miniaturroboters werden für die wesentlichen Funktionselemente geeignete Bauteile gesucht. Bis auf die Sensoren und LEDs handelt es sich um SMD-Bauteile (Restriktion *THT-Bauteile meiden*). Aufgrund des geringen Platzes auf den Radkästen wurde beim Mikrocontroller eine Fine-Pitch-Bauform gewählt. Noch kleinere Bauteile sind aufgrund der begrenzten Strukturierungsfeinheit nicht möglich (Restriktion *UltraFinePitch-Bauteile meiden*). Alle ausgewählten Bauteile sind RoHS-konform und entsprechend temperaturfest (Restriktion *Temperaturfestigkeit der Bauteile*). Die Bauteile werden dann im Schaltplan platziert und verknüpft (Bild 4-20). Der Schaltplan ist bereits ähnlich strukturiert wie die Anordnung später auf dem Gehäuse sein wird. Dies dient aber lediglich der leichteren Orientierung auf dem Schaltplan. Rechts sind die Platinenstecker platziert, von dort aus laufen die Verbindungen zu den beiden Mikrocontrollern. An jeden Controller sind sechs Sensoren angeschlossen sowie sechs Infrarot-LEDs, die über Transistoren einzeln angesteuert werden können (oben und unten). Die hier definierten Verbindungen müssen später im Layout entflochten werden.

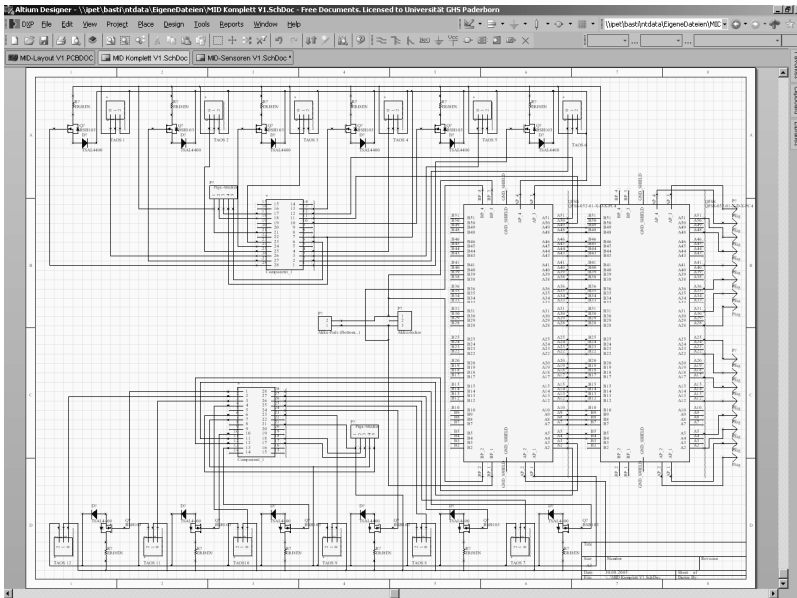


Bild 4-20: Schaltplan des Miniaturroboter-Gehäuses

Ergebnis: Schaltplan mit zugehöriger Netz- und Bauteilliste

4.4.4.6 Layout erstellen

Eingang: Schaltplan mit Netzliste, ausgearbeiteter Schaltungsträger

Methoden: Numerische Simulation

Richtlinien: VDI 2428

Restriktionen: Bauteilplatzierung auf ebenen Flächen, Zugänglichkeit des Bestückers, Metallicken, Leiterbahnabstände, Anschlüsse für elektrische Metallisierung

Im ersten Schritt der Layouterstellung wird die Form des Schaltungsträgers festgelegt. Im Regelfall unterstützen gängige Software-Werkzeuge nur das Layout einer planaren Leiterplatte. Ein dreidimensionales MID-Teil muss daher für das Layout „planarisiert“ werden. Dabei ist zu beachten, dass sphärische Schaltungsträger verzerren und aufgetrennte Kanten und Wände die Leiterbahnen im planarisierten Layout unterbrechen. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist ein zweidimensionales Abbild des MID-Schaltungsträgers, in dem alle nicht bestückbaren Flächen (Wände, Bohrungen, Verstärkungen, Auswerfermarken und Angüsse) als Sperrfläche gekennzeichnet sind. So können alle verbleibenden Flächen frei für Bauteile und Leiterbahnen benutzt werden.

Die elektronischen Bauteile werden danach auf dem Schaltungsträger platziert. ROSE [Ros92] empfiehlt ein Vorgehen von „außen nach innen“: Zuerst die Platzierung der fixen Elemente (Bedienelemente, Stecker, Schalter, Anzeigen, etc.), anschließend die Platzierung der Funktionsblöcke (siehe *Schaltung entwerfen*) und zuletzt die Optimierung innerhalb jedes einzelnen Blocks auf kürzeste Verbindungen und gleichmäßige Bauteilverteilung [Ros92, S. 106].

Anschließend werden die Leiterbahnen verlegt. Bei MID-Teilen ist dabei folgendes zu beachten:

- Nur die Oberfläche trägt Leiterbahnen. Leiterbahn-Kreuzungen müssen durch Brückenwiderstände (0 Ohm-, Widerstände“) gebrückt werden.
- In der Regel ist die Metallschichtdicke geringer als bei Platinen. Der daraus resultierende höhere Leitungswiderstand ist bei der Festlegung der Leiterbahnbreiten zu berücksichtigen.
- Elektrische Metallisierung ermöglicht höhere Schichtdicken; dafür müssen Anschlussflächen im Leiterbahnlayout erstellt werden.

Ebenso werden in diesem Schritt die Prüfpunkte gesetzt. Hinweise für ein prüfgerechtes Layout gibt die *VDI-Richtlinie 2428 „Gerätetechnik; Prüfgerichtetes gestalten“*. Mit den Experten der AVT ist abzusprechen, welche Testmethode gewählt und in welchem Raster gearbeitet wird. Abschließend wird das Layout einem weiteren Design Rule Check unterzogen. Die Schaltung wird auf nicht verlegte Verbindungen, offene Anschlüsse und Mindestabstände zwischen Leiterbahnen überprüft. Die Elektromagnetische Verträglichkeit des Layouts kann *simuliert* werden; die Ergebnisse sind aber aufgrund der fehlenden Dreidimensionalität kritisch zu hinterfragen.

Um das Layout des Miniaturroboter-Gehäuses erstellen zu können, muss dieses „planarisiert“ werden (siehe oben): Ähnlich der Schale einer Orange werden die Seitenwände des Gehäuses aufgeklappt. Sie bilden damit den Umriss der „Platine“, den Mechanical Layer. Mechanische Restriktionen wie Lüftungsschlitze und Bohrungen werden als Sperrflächen modelliert (Bild 4-21).

Anschließend werden die Bauteile gesetzt: Die Infrarot-LEDs und -Sensoren werden um das Gehäuse herum angeordnet, die Mikrocontroller jeweils auf eine Radkastenseite und die Platinenstecker auf die Rückseite. Dies sind die Bauteile, deren Positionen das Layout maßgeblich bestimmen. Da das Miniaturroboter-Gehäuse nur aus orthogonalen Flächen besteht, kann die Restriktion *Bauteilplatzierung auf ebenen Flächen* ignoriert werden. Anschließend werden die weiteren Bauteile (Vorwiderstände für die LEDs, Transistoren zum Schalten der LEDs und Programmierstecker für die Mikrocontroller) platziert und verdrahtet. Die meisten Bauteile können automatisiert bestückt werden (Restriktion *Zugänglichkeit des Bestückers*), nicht jedoch die THT-Bauteile.

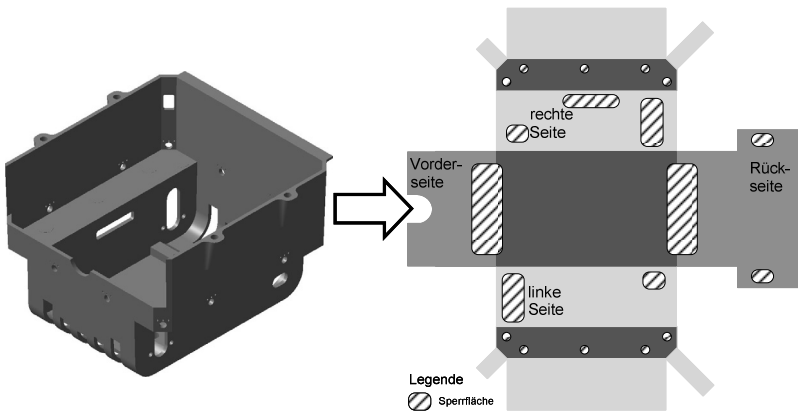


Bild 4-21: Planarisierung des dreidimensionalen Schaltungsträgers

Aufgrund der geringeren Metallschichtdicke werden alle Leiterbahnen breiter ausgeführt (Restriktion *Metalldicke*). Die Leiterbahnabstände entsprechen mit $200\ \mu\text{m}$ den Empfehlungen für laserdirektstrukturierte MID-Teile (Restriktion *Leiterbahnabstände*). Die Kontaktflächen für die Kontaktierung der Aufbau-module werden durch Bauteile simuliert, die nicht bestückt werden. Anschluss-flächen für eine elektrische Metallisierung werden nicht benötigt (Restriktion *Anschlussflächen für elektrische Metallisierung*).

Bild 4-22 zeigt ein Leiterbahnbild-Ausschnitt des Miniaturroboter-Gehäuses. Zu sehen ist die Rückseite des Gehäuses (im Bild rechts) sowie die rechte Roboterseite (jeweils die Innenseiten). Dargestellt sind alle Kontaktflächen und Leiterbahnen sowie die Kurzbezeichnungen der Bauteile. Sie dienen zur leichteren Orientierung des Schaltungsentwicklers. So steht die Abkürzung RB3 für Brückenwiderstand 3 (R = Resistor, B = Brücke).

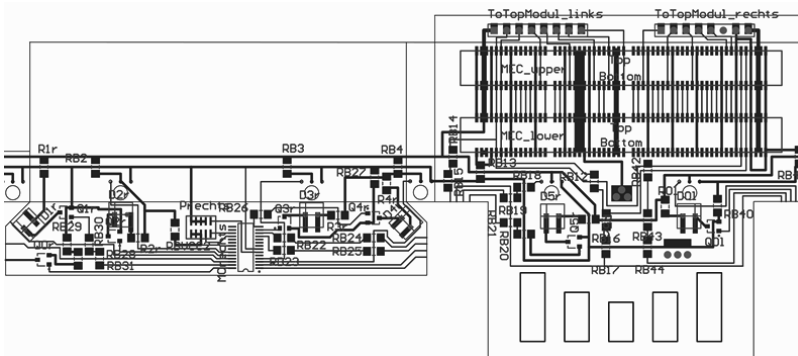


Bild 4-22: Layout des Miniaturroboter-Gehäuses

Ergebnis: Schaltungslayout

4.4.4.7 Prototyp erstellen

Eingang: Ausgearbeiteter Schaltungsträger, Schaltungslayout

Methoden: Rapid Prototyping

Richtlinien: VDI 3404

Bevor ein Prototyp der dreidimensionalen Elektronik gebaut werden kann, werden die Teilentwürfe des Schaltungsträgers und der Schaltung in ein gemeinsames Produktmodell integriert. Hierfür bieten sich – in Ermangelung verfügbarer MID-Modellierungswerkzeuge – 3D-CAD-Werkzeuge der Mechanik an (Bild 4-23). Die Geometriemodelle von Schaltungsträger und Schaltung kommen dem endgültigen Produkt damit am nächsten. Die Modellierung der Elektronik ist zwar sehr aufwändig, aber nur so lassen sich die Konsistenz beider Modelle sicherstellen sowie Fehler entdecken. Typische Fehler sind:

- Die Layoutposition eines THT-Bauteils stimmt nicht mit den Bohrungen im Schaltungsträger überein und
- Leiterbahnen, die über aufgetrennte Kanten verlaufen (siehe Planarisierung des Schaltungsträgers), treffen nicht aufeinander.

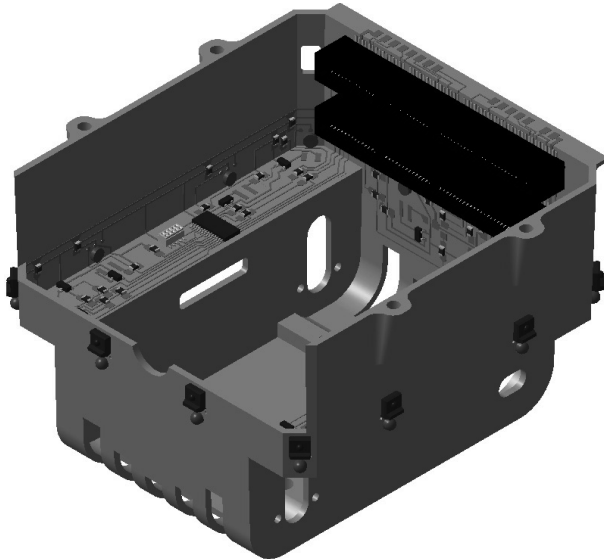


Bild 4-23: 3D-Modell der MID-Schaltung

Da es für die Technologie MID noch kein serienreifes Rapid Prototyping-Verfahren gibt [VHJ+07, S. 1964ff], können keine MID-nahen, dreidimensionale Prototypen gebaut werden, nur Labormuster. Mit Stereolithographie-Prototypen des Schaltungsträgers und Testplatinen des 2D-Layouts können

aber zumindest Montageuntersuchungen und Funktionstests durchgeführt werden. Eine Integration der Schaltung auf Platinen oder FlexFolie ins Gehäuse lässt u. U. unerwünschte Wechselwirkungen wie z.B. Erwärmung, magnetische Streufelder oder Schwingungen erkennen. Darauf basierend kann der Entwurf der dreidimensionalen Schaltung optimiert werden. Einen Überblick über bestehende Rapid Prototyping-Verfahren gibt die *VDI-Richtlinie 3404 „Generative Fertigungsverfahren – Rapid Technologien“*. Bild 4-24 zeigt zwei Prototypen des Miniaturrobotergehäuses: Links ein Stereolithographie-Gehäuse für Montageuntersuchungen, rechts sind Platinen der Sensorschaltung auf das Gehäuse aufgeklebt; damit wurden Funktionstests durchgeführt.

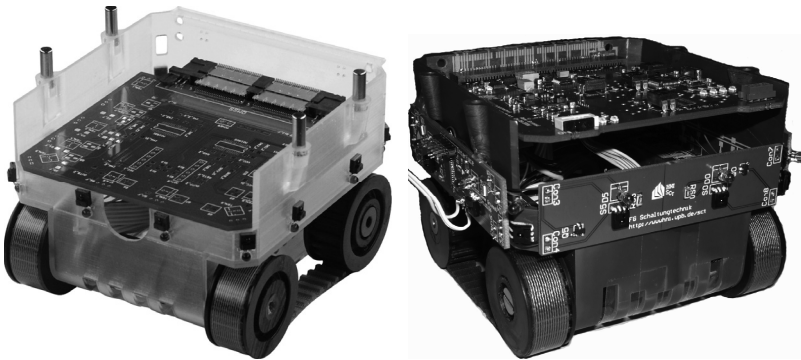


Bild 4-24: Prototypen des MID-Gehäuses: links ein Stereolithographie-Prototyp, rechts eine funktionierende Schaltung auf Platinenbasis

Ist der Entwurf abgeschlossen, werden von allen Teilen Fertigungsunterlagen erstellt (technische Zeichnungen, Schaltplan, Layout, Bauteillisten etc.).

Ergebnis: Prototypen der dreidimensionalen Elektronik

Phasenergebnis: Gesamtentwurf des MID-Produkts

4.4.5 Fertigungsprozess ausarbeiten

In der vorangegangenen Phase „Fertigungsprozess konzipieren“ entstand das Konzept für den Fertigungsprozess. Dieses dient zusammen mit den Daten aus dem Produktentwurf (Feingestalt des Schaltungsträgers, Schaltplan) als Eingangsgröße für die folgende Ausarbeitung. Ziel sind ausgearbeitete Fertigungsprozesse und Prüfverfahren. Dazu wird die Verträglichkeit zwischen Produkt und Fertigungsprozess geprüft und anschließend das Fertigungskonzept des Schaltungsträgers weiter ausgearbeitet. Den Abschluss bildet die Auswahl der Prüfverfahren zur Qualitätssicherung. Sie werden in den erarbeiteten Fertigungsprozess integriert (Bild 4-25).

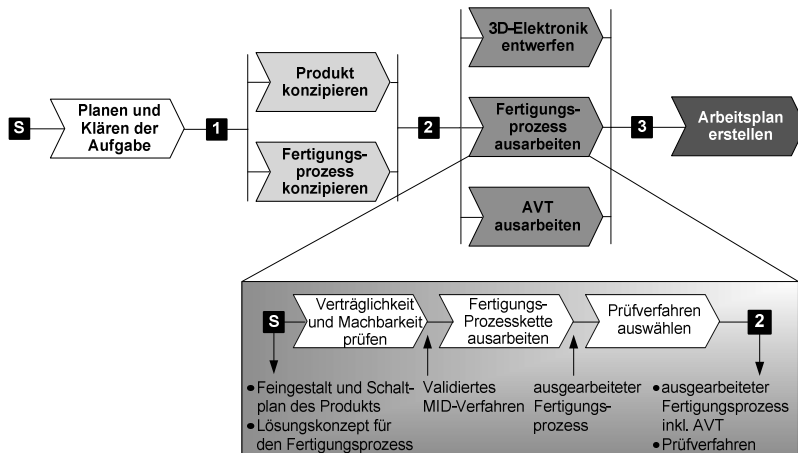


Bild 4-25: Prozessschritte der Phase „Fertigungsprozess ausarbeiten“

4.4.5.1 Verträglichkeit und Machbarkeit prüfen

Eingang: Lösungskonzept für den Fertigungsprozess, Feingestalt und Schaltplan des Produkts

Im Laufe der Produktausarbeitung (siehe *3D-Elektronik entwerfen*) werden die Eigenschaften des Produkts immer konkreter. Daher wird vor der Ausarbeitung der Fertigungsprozesskette die Verträglichkeit zwischen dem Produkt und den im Fertigungskonzept ausgewählten MID-Verfahren noch einmal überprüft. Typische Fragestellungen sind:

- Ist das gewählte MID-Verfahren (hier: Laserdirektstrukturierung) immer noch für die Schaltungsträgerfertigung geeignet (z.B. bezüglich Dreidimensionalität und Leiterbahnenbreite)?
- Ist die Entformbarkeit des Werkzeugs gewährleistet? Sind die minimalen Strukturgrößen eingehalten worden?
- Ist die Zugänglichkeit des Lasers gewährleistet?
- Ist der gewählte Werkstoff säurebeständig?
- Ist der gewählte Werkstoff temperaturbeständig?
- Sind die geforderten Metallisierungs-Schichtdicken galvanisierbar?

Existieren keine Hindernisse für die Fertigung des MID-Schaltungsträgers, ist das ausgewählte MID-Fertigungsverfahren einsetzbar.

Ergebnis: Validiertes MID-Verfahren

4.4.5.2 Fertigungsprozesskette ausarbeiten

Eingang: Lösungskonzept für den Fertigungsprozess, Validiertes MID-Verfahren

Methode: Spezifikationstechnik nach MICHELS

Richtlinien: DIN 16750, DIN 60825, VDI 2421 Blatt 2

Auf Grundlage des Lösungskonzepts für den Fertigungsprozess und des validierten MID-Verfahrens wird in diesem Schritt die Prozesskette der MID-Schaltungsträgerfertigung ausgearbeitet. Diese umfasst bei der Laserdirektstrukturierung die Hauptschritte Schaltungsträger spritzgießen, laserstrukturieren und metallisieren. Dazu kommen Zwischenschritte wie Reinigen (z.B. zum Entfernen von Ablationsresten nach der Laserstrukturierung) und Trocknen (vor dem Spritzguss und nach der Metallisierung). Für die einzelnen Prozessschritte werden geeignete Anlagen ausgewählt. Dabei müssen die Anforderungen an diese Anlagen (z.B. benötigter Spritzgussdruck, Arbeitsraum und Auflösung des Lasers sowie Badgröße und Metallart der Galvanik) berücksichtigt werden. Anschließend werden die Parameter der ausgewählten festgelegt, z.B. Druck und Temperatur beim Spritzguss. Dabei kommen teilweise dieselben Richtlinien wie schon bei der Prozesskonzipierung zum Einsatz (*DIN 16750, DIN 60825, VDI 2421 Blatt 2*). Handhabungs- und Materialflusssysteme zwischen den einzelnen Prozessschritten sind ebenfalls zu bestimmen. Der Einsatz eines Handhabungssystems hängt hauptsächlich von der Stückzahl des MID-Teils ab, aber auch die Entnahme des Spritzgussteils aus dem Werkzeug und eine mehrachsige Handhabung bei der Laserstrukturierung können notwendig sein. Die Detaillierung des Fertigungsprozesses wird solange fortgesetzt, bis jeder Fertigungsschritt vollständig spezifiziert ist. Als Spezifikationstechnik kann die *Spezifikationstechnik nach MICHELS* genutzt werden, obwohl sie ursprünglich nur für die Fertigungssystemkonzipierung entwickelt wurde.

Das Miniaturroboter-Gehäuse wird in einem zweiteiligen Werkzeug aus dem Kunststoff Vectra 820i (einem LCP) bei 320 °C und 1900 bar Druck spritzgegossen. Anschließend wird das Gehäuse mit einem Nd:YAG-Infrarot-Laser (Wellenlänge 1064 nm, 60 kHz Pulsfrequenz, 15W mittlere Leistung) strukturiert, wobei drei Aufspannpositionen nötig sind, um alle Seiten zu strukturieren. In einer dreistufigen Galvanikanlage (inkl. Spülgänge) werden ca. 10 µm Kupfer, 5 µm Nickel und ca. 0,1 µm Gold abgeschieden. Der gesamte Prozess benötigt rund 3 Stunden (1,5 h für Kupfer, 1 h für Nickel und 10 min für Gold sowie 20 min für Spül- und Aktivierungsbäder). Dieser Fertigungsprozess ist in Bild 4-26 in der *Spezifikationstechnik nach MICHELS* abgebildet.

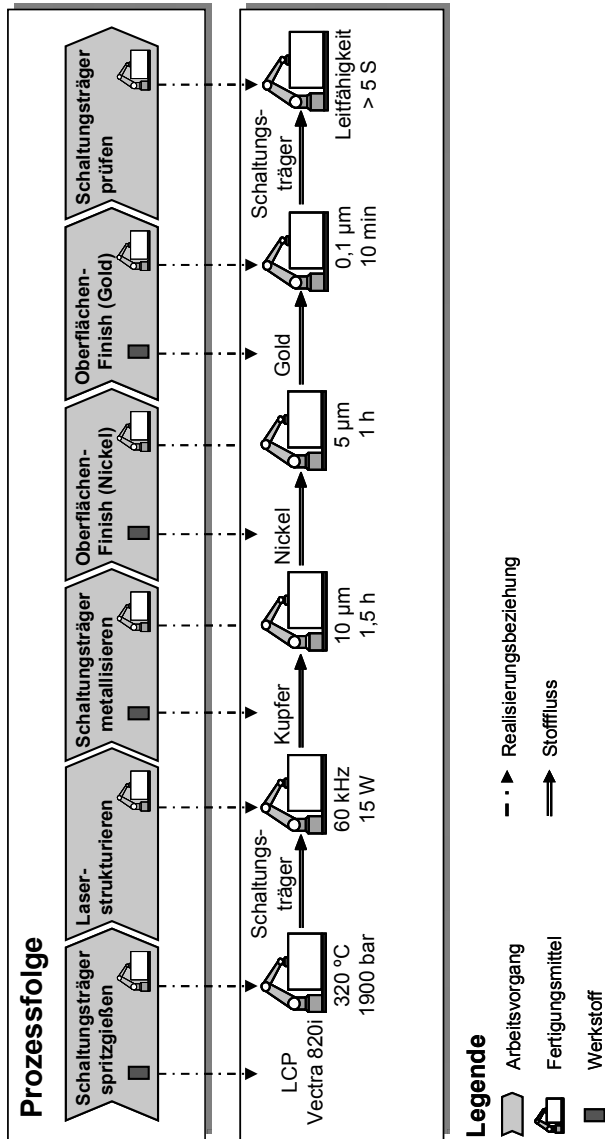


Bild 4-26: Ausgearbeiteter Fertigungsprozess des MID-Gehäuses

Ergebnis: Ausgearbeiteter Fertigungsprozess

4.4.5.3 Prüfverfahren auswählen

Eingang: detaillierte Anforderungsliste, ausgearbeiteter Fertigungsprozess

Richtlinien: VDI 2247

Um die vom Kunden geforderte Qualität sicherzustellen, bestimmt der Fertigungsexperte zusammen mit den Mechanik- und Elektronik-Entwicklern die erforderlichen Prüfungen und Prüfungsverfahren. Grundsätzlich gelten die Vorgaben der *VDI-Richtlinie 2247 „Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung“*. Im Vordergrund stehen bei MID-Teilen folgende Prüfkriterien:

- Maßhaltigkeit der Teile vor und nach dem Verarbeiten,
- optische Sauberkeit der Metallstrukturen (trennscharfe Strukturen),
- Isolationswiderstand des Kunststoffes (wegen der Wasseraufnahme während der galvanischen Metallisierung),
- das Vorhandensein von Kurzschlüssen durch Übermetallisierungen,
- elektrische Leitfähigkeit der Leiterbahnen,
- Haftfestigkeit der Leiterbahnen und
- schneller Temperaturwechsel z.B. $-40^{\circ}\text{C}/+125^{\circ}\text{C}$

Zusätzlich wird die Einbindung der Prüfprozesse in den Fertigungsablauf betrachtet. Je nach Auswahl der eingesetzten Prüfanlagen kann gegebenenfalls eine Optimierung des Produktes hinsichtlich der Prüfbarkeit erfolgen. Als letzter Schritt wird der parallel ausgearbeitete AVT-Prozess integriert.

Ergebnis: ausgewählte Prüfverfahren

Phasenergebnis: Ausgearbeiteter Fertigungsprozess inkl. AVT und Prüfverfahren

4.4.6 Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten

Analog zur Phase „Fertigungsprozess ausarbeiten“ wird in dieser Phase die Aufbau- und Verbindungstechnik auf Basis des Lösungskonzepts für den Fertigungsprozess ausgearbeitet. Dies erfolgt parallel zum Entwurf der 3D-Elektronik und in engem Wechselspiel. Zunächst ist zu klären, ob mit zunehmender Konkretisierung des Produkts die Verträglichkeit zum Fertigungsprozess weiterhin gegeben ist (Schritt „Verträglichkeit prüfen“). Anschließend werden die AVT-Prozesskette ausgearbeitet und Prüfverfahren ausgewählt. Bild 4-27 zeigt die Prozessschritte der Phase *Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten*. Ergebnis ist der ausgearbeitete Fertigungsprozess der AVT.

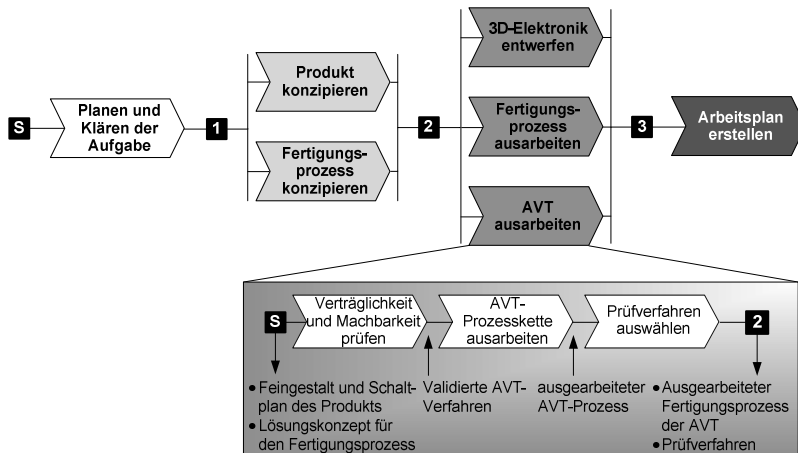


Bild 4-27: Prozessschritte der Phase „AVT-Prozesskette ausarbeiten“

4.4.6.1 Verträglichkeit und Machbarkeit prüfen

Eingang: Lösungskonzept für den Fertigungsprozess, Feingestalt und Schaltplan des Produkts

Wie bei der Ausarbeitung des Fertigungsprozesses wird vor der Ausarbeitung der AVT-Prozesskette die Verträglichkeit zwischen dem detaillierten Produkt (siehe *3D-Elektronik entwerfen*) und den im Fertigungskonzept ausgewählten AVT-Technologien noch einmal überprüft. Beispielsweise wirken große, massive Bauelemente während des Lötens als Wärmesenken und beeinträchtigen die Lötbarkeit. Die Produktdaten werden analysiert und mit dem Lösungskonzept für den Fertigungsprozess verglichen. Es ist zu klären, inwieweit sich die Materialauswahl und Gestalt des Schaltungsträgers und der verwendeten Bauelemente mit den ausgewählten AVT-Technologien vertragen. Dabei werden folgende Produkteigenschaften besonders beachtet:

- **Lotauftrags- und Bestückflächen:** Die Art des Medienauftrags und der Bauteil-Bestückung hängt im Wesentlichen von der Zugänglichkeit der Flächen ab (Bauteilgestalt). Ist das ausgewählte Verfahren (hier: Schablonendruck) nicht mehr geeignet, können andere Verfahren eingesetzt werden, beispielsweise Dispensen oder Pin-Transfer.
- **Freiheitsgrade:** Durch die Dreidimensionalität des MID-Teils sind evtl. zusätzliche Freiheitsgrade zu berücksichtigen, z.B. durch senkrechte Wände. Diesem kann durch ein Handhabungssystem oder mehrmaligem Durchlaufen des Prozesses begegnet werden. Dabei dürfen jedoch bereits verlötete Bauteile nicht wieder aufschmelzen. In diesem Fall stellen Lote mit unterschiedlichem Schmelzpunkt oder Spezi-

alverfahren wie dem Dampfphasen-Kondensationslöten eine Lösung dar. An diesem Beispiel zeigt sich die starke Vernetzung von Produkt und Produktionssystem.

- **Art der Elektronik-Bauteile:** Sowohl die Bauteilgröße als auch die Art und Rasterung der „Beinchen“ (THT, SMT, BGA, FinePitch etc.) stellen Anforderungen an die AVT, insbesondere an einzuhaltende Toleranzen und die Prozessführung.
- **Art der Lotmaterialien:** Falls aufgrund der RoHS-Richtlinie bleifreie Lote zum Einsatz kommen (müssen), ist die Eignung von Schaltungsträgermaterial, Elektronik-Bauteil und Prozess zu prüfen.

Die resultierenden Anforderungen und Restriktionen an die AVT sind in Rücksprache mit den Mechanik- und Elektronikentwicklern sowie den Fertigungsspezialisten zu klären. Ist die Verträglichkeit gegeben, können die ausgewählten Verfahren ausgearbeitet werden.

Ergebnis: Validierte Fertigungsverfahren der AVT

4.4.6.2 AVT-Prozesskette ausarbeiten

Eingang: Validierte Fertigungsverfahren der AVT, Lösungskonzept für den Fertigungsprozess

Methode: Spezifikationstechnik nach MICHELS

Richtlinien: VDI 3712, VDI 2251 Blatt 3

Die Arbeitsvorgänge aus dem Partialmodell **Prozessfolge** werden konkretisiert, indem basierend auf dem Fertigungskonzept die Arbeitsschritte festgelegt und um Zwischenschritte wie z.B. Reinigen ergänzt werden. Beim Reflow-Verfahren sind das der Lotpastenauftrag, Bestückung und Reflow-Verlötung. Es wird außerdem ein Handhabungssystem festgelegt, das an die Fertigungsumstände (z.B. bestehende Produktlinien und geplante Stückzahlen) angepasst ist. Richtlinien für diese Prozessschritte sind die *VDI 3712 „Leiterplattenbestückung“* und die *VDI 2251 „Feinwerkelemente – Lötverbindungen“*.

Auch das Partialmodell **Produktionsstruktur** wird konkretisiert. Im Unternehmen vorhandene Anlagen werden analysiert und ausgesucht. Die Auswahl der Anlagen wird durch Anforderungen des Produkts wie z.B. der Größe der Baugruppe und der Temperaturempfindlichkeit der Bauteile eingeschränkt. So erlauben Dampfphasenöfen eine wesentliche höhere Genauigkeit und Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung. Für die einzelnen Anlagen werden die Prozessparameter wie Bestücksequenzen oder Temperaturführung beim Löten

festgelegt. Kriterien sind beispielsweise die Art und Masse der Bauteile sowie der Schmelzpunkt des Lotes.

Das Miniaturroboter-Gehäuse ist aus Sicht der AVT eine Herausforderung: viele zu bestückende Flächen mit schlechter Zugänglichkeit aufgrund der Dreidimensionalität sowie verschiedene Bauteil-Arten (THT und SMT) bringen die AVT-Standardverfahren an ihre Grenzen. Manuelle Bestückung kommt aufgrund der Anzahl der Bauteile (über 100, teilweise im FinePitch-Raster) bei hoher Gehäuse-Stückzahl nicht in Frage. Die Lösung ist ein Kompromiss: Die Hauptflächen mit den manuell „schwierigen“ SMT-Bauteilen werden mit einem mehrstufigen, automatisierten Prozess gefertigt; in einer manuellen Nachbearbeitung werden die automatisierungstechnisch aufwändigen THT-Bauteile verlötet. Zum Einsatz kommen dabei sowohl bleifreie Lote als auch ein Dampfphasen-Kondensationslötöfen. Die Prozessführung des Lötöfens (Temperaturführung und die Dampfhöhe, Bild 4-28) erlaubt es, das Gehäuse zweimal zu löten, ohne dass bereits verlötete Bauteile wieder aufschmelzen. Damit ist eine Kleinserien-taugliche, halbautomatische Fertigung möglich. Der AVT-Prozess wird analog zur Phase *Fertigungsprozess ausarbeiten* wieder in der Notation nach MICHELS spezifiziert.

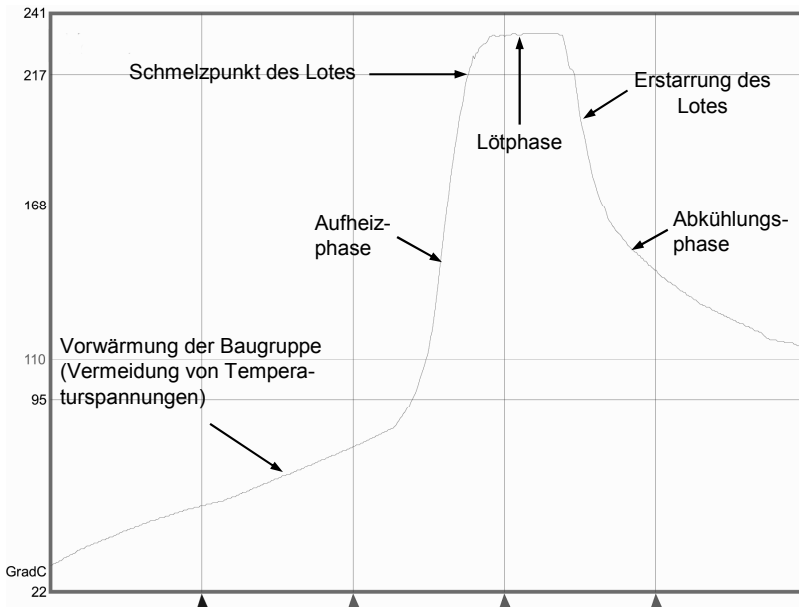


Bild 4-28: Temperaturführung beim Löten des MID-Gehäuses

Ergebnis: Ausgearbeiteter AVT-Prozess

4.4.6.3 Prüfverfahren auswählen

Eingang: Detaillierte Anforderungsliste, ausgearbeiteter AVT-Prozess

Richtlinien: VDI 2247, VDI 2628, VDI 3715

Analog zum Prozessschritt aus der Phase *Fertigungsprozess ausarbeiten* werden auch für die Aufbau- und Verbindungstechnik die erforderlichen Prüfungen und Prüfungsverfahren bestimmt. Dies führt der Fertigungsexperte wieder zusammen mit den Mechanik- und Elektronik-Entwicklern durch. Wichtige Aspekte bei der Prüfung von bestückten MID-Teilen sind fehlende oder ver-rutschte Bauelemente (Tombstone-Effekt¹⁴), saubere Lötverbindungen und ein Funktionstest der Baugruppe. Damit wird überprüft, ob die elektronischen Bauteile die hohen Löttemperaturen unbeschädigt überstanden haben. Neben der allgemeinen Richtlinie *VDI 2247 „Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung“* existieren zur Prüfung von elektronischen Schaltungen die Richtlinien *VDI 2628 „Automatisierte Sichtprüfung“* und *VDI 3715 „Prüftechnik für Leiterplattenbaugruppen in SMD-Technik“*.

Ergebnis: Ausgewählte Prüfverfahren

Phasenergebnis: Ausgearbeiteter AVT-Prozess inkl. Prüfverfahren

4.5 Konzeption einer Wissensbasis

Wie die vorhergehenden Kapitel gezeigt haben, ist für die Entwicklung von mechatronischen Systemen in der Technologie MID ein hohes Maß an Wissen über Tätigkeiten, Fertigungsverfahren, Wechselwirkungen, Methoden und Richtlinien erforderlich. Um dieses Wissen allen Entwicklern zugänglich zu machen, wird eine Wissensbasis benötigt. Das Konzept einer solchen Wissensbasis ist Gegenstand des folgenden Kapitels. Eine Umsetzung des Konzepts in einem realen Wissensbasis-Prototyp ist nicht Teil dieser Arbeit.

4.5.1 Das Anwendungsszenario der MID-Wissensbasis

Im folgenden Anwendungsszenario wird erläutert, wie die Anwender die MID-Wissensbasis benutzen sollen. Daraus lassen sich die Anforderungen, der Aufbau und die Inhalte der Wissensbasis ableiten.

Wenn der Benutzer die Wissensbasis startet, gelangt er zum Hauptfenster. Von dort aus hat er Zugriff auf die vier Wissens-Kategorien (*Prozessinformationen*,

¹⁴ Der Tombstone-Effekt ist das Aufkippen von kleinen zweipoligen SMD-Bauteilen während des Reflow-Lötens. Die Lotpasten schmelzen unterschiedlich auf und die Oberflächenspannung des Lotes zieht das Bauteil senkrecht. [Mai86, S. 13]

Fachinformationen, Produktinformationen und Personendaten) oder er kann eine Schlagwortsuche in allen Kategorien starten (inkl. der Kategorie *Erfahrungswissen*, auf die sonst nicht direkt zugegriffen werden kann).

Wählt der Benutzer z.B. die Kategorie *Prozesswissen*, erscheint eine Auswahl über die in der Wissensbasis enthaltenen Vorgehensmodelle (das Generische sowie die Spezifischen Vorgehensmodelle). Ein Link verweist auf die Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des MID-Verfahrens. Innerhalb der graphisch angezeigten Vorgehensmodelle sind die jeweiligen Phasen und Verweise durch Anklicken auswählbar. Gleiches gilt für die Inhalte der anderen Kategorien, die alphabetisch sortiert aufgelistet sind. Die hinterlegten Informationen werden am unteren Bildschirmrand angezeigt oder öffnen sich in separaten Fenstern (Methodenbeschreibungen und Richtliniendokumente).

Die in den Fenstern angezeigten Inhalte (graphisch oder textuell) werden stets neu aus der Wissensbasis generiert, d.h. aus der Kategorie, in der sich der Benutzer befindet, wird der Hauptinhalt aufgebaut, während die Verknüpfungen zu anderen Inhalten in den Text integriert (Schlagworte) oder als Verweis unten platziert werden. Dieser inhaltsabhängige Seitenaufbau geschieht automatisch. Schließt der Benutzer ein Fenster, gelangt er automatisch zum Hauptfenster zurück. Schließt er das Hauptfenster, beendet er das Programm.

Der Benutzer hat die Möglichkeit, die Inhalte zu editieren. Dabei kann neues Wissen direkt als Prozess-, Fach-, Produktinformation bzw. Personendaten oder als Erfahrungsinformationen eingegeben werden. Erfahrungsinformationen werden immer als Verknüpfung zu den jeweiligen Inhalten angezeigt.

4.5.2 Anforderungen an die MID-Wissensbasis

Die Wissensbasis soll die in Kapitel 2.6 aufgestellten Anforderungen an die Systematik so gut wie möglich unterstützen. Daher ergeben sich folgende Anforderungen an die Wissensbasis. Sie soll:

- **Informationen speichern**, d.h. die Vorgehensmodelle und Tätigkeitsbeschreibungen sowie die Methoden und Richtlinien beinhalten,
- **Abhängigkeiten und Verknüpfungen abbilden**, d.h. die Methoden und Richtlinien mit den Prozessschritten verlinken und die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem angeben,
- **Erweiterbar sein**, d.h. sowohl in der Informationsstruktur als auch den Inhalten (z.B. Erfahrungswissen) veränderbar sein,
- **Abfragen erlauben**, d.h. den selektiven Zugriff auf die gespeicherten Inhalte ermöglichen

- **die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens unterstützen** und
- **intuitiv sein**, d.h. einfach zu bedienen und domänenübergreifend verständlich sein.

Anhand dieser Anforderungen wird eine zukünftig erstellte Wissensbasis zu bewerten sein.

4.5.3 Inhalte der MID-Wissensbasis

Die Inhalte werden in fünf Bereiche strukturiert, in denen die Informationen der Wissensbasis abgelegt sind. Diese Bereiche sind Prozessinformationen, Fachinformationen, Erfahrungsinformationen, Produktinformationen und Personaldaten. Der Bereich *Prozessinformationen* stellt die Abläufe während der Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID dar. *Fachinformationen* sind fundierte Informationen, die sich in Theorie und Praxis bewährt haben. Beispiele dafür sind Methoden und Richtlinien oder Prozessfenster bei der Fertigung. *Erfahrungsinformationen* sollen insbesondere Problem- und Lösungsspezifikationen sein, die die Ingenieure während der Entwicklung sammeln und in die Wissensbasis einstellen. Unter *Produktinformationen* sind Daten zu den MID-Produkten abgelegt, die im jeweiligen Unternehmen entwickelt wurden. Sie helfen, Anforderungen und Einsatzfälle ehemaliger Entwicklungen für neue Produkte nachhaltig zu dokumentieren. Im Bereich *Personendaten* sind die Kontaktdaten der Personen zu finden, die an der Entwicklung von MID-Teilen beteiligt sind. Die Informationen innerhalb der Bereiche werden im Folgenden näher beschrieben.

Prozessinformationen ergeben sich sowohl aus dem Generischen Vorgehensmodell als auch den Spezifischen Vorgehensmodellen. Sie bestehen aus Prozessen, Phasen, Meilensteinen und Prozessschritten. Der Prozess ist die höchste Instanz und unterteilt sich in den Generischen und die Spezifischen Prozesse. Jeder Prozess besteht aus Phasen und Meilensteinen. Meilensteine sind Textbeschreibungen. Die Phasen des Generischen Prozesses sind ebenfalls Textbeschreibungen, jedoch unterteilt sich jede Phase der Spezifischen Prozesse in mehrere Prozessschritte. Diese bestehen aus Ein- und Ausgangsinformationen und Tätigkeitsbeschreibungen. Verknüpft sind sie mit Methoden und Richtlinien (Fachinformationen) sowie Wechselwirkungen (Erfahrungsinformationen). Dabei handelt es sich um 1:m-Beziehungen. Die Entscheidungsunterstützung für das geeignete MID-Verfahren hat wesentliche Auswirkungen auf die weitere Arbeit mit den Spezifischen Vorgehensmodellen. Es besteht daher eine Verknüpfung zum Generischen Prozess (siehe Kapitel 4.5.6).

Fachinformationen stellen den aktuellen Stand der Technik dar, d.h. von Fach- und Forschungswelt anerkanntes Wissen. Dazu zählen MID-Verfahren,

Methoden, Richtlinien sowie Materialdaten. Die **MID-Verfahren** sind steckbriefartig beschrieben inkl. der Eigenschaftskarte für das jeweilige Verfahren. Unter **Methoden** sind Kurzbeschreibungen zum Ziel und zur Durchführung der Methode und evtl. rechnerbasierte Vorlagen (z.B. Excel-Tabellen) zu finden. Der Bereich **Richtlinien** enthält entsprechende Dokumente. In Richtlinien sind Handlungsempfehlungen und verbindliche Vorgaben enthalten. Es gibt Richtlinien für beinahe jeden Bereich der Mechatronik, lediglich gezielte MID-Richtlinien fehlen bislang. Unter **Materialdaten** befinden sich Informationen zu Werkstoffen, die bei MID-Produkten eingesetzt werden können. Sie stammen entweder von Materialherstellern, aus durchgeführten Forschungsprojekten oder unternehmensinternen Quellen. In der Regel bestehen Fachinformationen aus Text und Graphiken. Sie sind mit den entsprechenden Prozessschritten verknüpft. Hier handelt es sich häufig um 1:1-Beziehungen (z.B. ist die Methode *Schwachstellen-Analyse* nur mit der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* vernetzt), selten auch um 1:m-Beziehungen (die *Spezifikationstechnik nach FRANK* taucht in den Phasen *Planen und Klären der Aufgabe* und *Produkt konzipieren* auf). Auch zu Know-how-Trägern bestehen Verbindungen, wenn z.B. ein Entwickler Experte für eine Methode ist.

Erfahrungsinformationen enthalten Erkenntnisse, die die Ingenieure während der Entwicklung machen. Dazu zählen Lösungen für aufgetretene Probleme, Anwendungs- und Testszenarien, Entwurfsregeln, Konstruktionshinweise und zu beachtende Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Es sind kurze Textbausteine. Erfahrungsinformationen sind mit Prozess-, Fach- und Produktinformationen verknüpft. Dabei handelt es sich um 1:m-Beziehungen. Eine weitere Verknüpfung mit Know-how-Trägern (Personendaten) zeigt die Personen, die die Erfahrungsinformation erstellt haben (1:1-Beziehung). Sollten Erfahrungsinformationen mehrfach gemacht und von Fachleuten bestätigt werden, können sie zu Fachinformationen werden.

Produktinformationen beschreiben bekannte MID-Produkte. Damit werden Anforderungen und Einsatzfälle ehemaliger Entwicklungen für neue Produkte nachhaltig dokumentiert. Zu den Produktinformationen gehören Anwendungszweck, Einsatzgebiet, verwendetes MID-Verfahren, Entwicklungszeit und Problemfälle. Diese werden steckbriefartig dokumentiert und mit den MID-Verfahren (Fachinformationen), Erkenntnissen (Erfahrungsinformation) und den beteiligten Know-how-Trägern (Personendaten) verknüpft. Diese Verknüpfungen sind entsprechend 1:1- oder 1:m-Beziehungen (ein Produkt zu einem Verfahren, ein Produkt zu mehreren Entwicklern und Erfahrungen).

Personendaten umfasst Know-how-Träger bei der MID-Entwicklung. Dazu zählen interne und externe Know-how-Träger. Interne Know-how-Träger sind eigene Mitarbeiter des Unternehmens mit Expertenwissen zu Bereichen wie MID allgemein, Spritzguss, Metallisierung, Bestückung, Löten sowie Mecha-

nik- und Elektronik-Entwickler mit MID-Erfahrung. Externe Know-how-Träger sind Experten von fremden Unternehmen oder Universitäten, die Expertenwissen zur MID-Einführung oder zu speziellen MID-Verfahren haben. Folgende Informationen werden abgelegt: Personenbezogene Daten (Name, Titel, Funktion), Kontaktdaten (Unternehmen, Abteilung, Anschrift, Telefon, Mobiltelefon, Email-Adresse) und Foto. Die Personendaten sind zu Fach-, Erfahrungs- und Produktinformationen verlinkt (1:m-Beziehungen).

4.5.4 Verknüpfungen zwischen den Wissenselementen

Die einzelnen Wissenselemente sind untereinander verknüpft. Diese Verknüpfungen werden im Folgenden vorgestellt.

Prozesse

- Welches MID-Verfahren gehört zu diesem Prozess?
- Welcher Prozessschritt gehört zu der Phase?
- Welche Ein-/Ausgangsinformationen gehören zum Prozessschritt?
- Welche Tätigkeitsbeschreibungen gehören zu dem Prozessschritt?
- Welche Methode gehört zu dem Prozessschritt?
- Welche Richtlinie gehört zu dem Prozessschritt?
- Welche Wechselwirkung gehört zu dem Prozessschritt?
- Welche Materialinformation ist bei diesem Prozessschritt wichtig?

Fachwissen

- Zu welchem Prozess gehört dieses MID-Verfahren?
- Zu welchem Prozessschritt gehört diese Methode?
- Zu welchem Prozessschritt gehört diese Richtlinie?
- Wer ist Experte für dieses MID-Verfahren?
- Wer ist Experte für diese Methode?

Erfahrung

- Bei welchem Prozessschritt ist diese Erfahrung zu beachten?
- Welche Fachinformation wird um diese Erfahrung ergänzt?
- Welche Erfahrung ist bei diesem Produkt gemacht worden?

Produkte

- In welchem MID-Verfahren wurde dieses Produkt hergestellt?
- Wer war an der Entwicklung beteiligt?
- Bei welchem Produkt ist diese Erfahrung gemacht worden?

Personen

- Für welches MID-Verfahren ist diese Person Experte?
- Für welche Methode ist diese Person Experte?
- Welche Erfahrungsinformationen hat diese Person erstellt?
- An welchem Produkt hat diese Person mitgearbeitet?

4.5.5 Abfragemöglichkeiten der MID-Wissensbasis

Um auf die Inhalte der MID-Wissensbasis zugreifen zu können, kann der Benutzer Abfragen über Abfragemasken an die Wissensbasis stellen. Zunächst wählt der Benutzer auf dem Hauptfenster eine der vier Hauptkategorien.

In der Kategorie **Prozessinformationen** gibt es keine Abfragemöglichkeit. Die verfügbaren Prozesse sind über Schaltflächen erreichbar. Allerdings besteht eine Verknüpfung zur Entscheidungsunterstützung für die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens (siehe Kapitel 4.5.6).

In der Kategorie **Fachinformationen** kann in einer Abfragemaske die gewünschte Informations-Klasse (MID-Verfahren, Methode, Richtlinie, Material) ausgewählt werden. Diese Information kann mit einem Stichwort zur Sucheinschränkung (z.B. LDS) kombiniert werden.

Produktinformationen können in der entsprechenden Kategorie über Eingabe des Namens kombiniert mit dem Verfahren und einer beteiligten Person abgefragt werden.

In der Kategorie **Personendaten** stehen die Merkmale Name, Funktion, Unternehmen und Expertenbereich zur Auswahl. Die Auswahl des Expertenbereichs ist über ein Auswahlménü festgelegt, die anderen Eingaben erfolgen frei.

Im Hauptfenster ist außerdem eine **Volltextsuche** enthalten. Sie erleichtert das Arbeiten mit der MID-Wissensbasis, da für Benutzer häufig das Problem besteht, in Datenbanken die richtigen Informationen zu finden. Die Volltextsuche durchsucht dabei jeden Informationsbereich in der MID-Wissensbasis und listet die Ergebnisse nach Wichtigkeit auf. Mit Hilfe von Schlagworten kann die Suche zielorientiert eingegrenzt werden.

4.5.6 Auswahl des MID-Verfahrens

Zur Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten MID-Verfahrens existiert eine eigene Abfragemaske. Diese Entscheidungsunterstützung wurde prototypisch umgesetzt und veröffentlicht [KFG07], [KPG08].

Die Auswahl des MID-Verfahrens ist produktgetrieben. Dazu wird das Produkt über fünf Merkmale mit jeweils verschiedenen Ausprägungen klassifiziert. Die Merkmale orientieren sich dabei an den Produktmerkmalen nach PEITZ [Pei08, S. 115]. In einer Abfragemaske (Bild 4-29) muss der Entwickler für die fünf Produktmerkmale Dreidimensionalität, Leiterbahnbreite, Variantenzahl, Stückzahl und Kostendruck die jeweiligen Merkmalsausprägungen des Produkts eintragen. Dabei stehen mehrere Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung: beispielsweise Dreidimensionalität hoch (Typ 3), mittel (Typ 2), niedrig (Typ1). Die Auswahlmöglichkeiten werden jeweils erläutert. Wird die Eingabe bestätigt, startet eine Datenbankabfrage, die die eingegebenen Merkmale mit dem Eigenschaftsprofil der MID-Verfahren vergleicht (siehe Kapitel 4.4.3). Als Ergebnis werden ein oder mehrere Verfahren als Empfehlung vorgeschlagen. Wählt der Benutzer ein Verfahren aus, startet automatisch das entsprechende Spezifische Vorgehensmodell. [KPG08, S. 171ff]

MID Knowledge Base

Search MID Process

Three-dimensionality:
 Low: Type 1 Medium: Type 2 High: Type 3

Conductive strip width:
 Fine: 8 mil
 Normal: 16 mil
 Broad: 32+ mil

Number of variants:
 Variants are similar products of the same type.
 They differ in shape and electronic circuitry.

Quality of manufacture:
 Small: < 100 pieces
 Medium: < 1000 pieces
 Large: 1000+ pieces

Pricing pressure:
 Low: Functionality in the foreground
 Noticeable: Only minor cost risings allowed
 Rigorous: Costs in the foreground

Result

Process Laser Direct Structuring

Bild 4-29: Screenshot der Abfragemaske

Bewertung der Systematik an den Anforderungen

Abschließend wird die erarbeitete Systematik anhand der Anforderungen aus Kapitel 2.6 bewertet. Dazu wird für jede Anforderung knapp erläutert, inwiefern sie durch die Systematik erfüllt wird.

A1) Strukturierung des Entwicklungsprozesses: Die erarbeitete Systematik gliedert den Entwicklungsprozess in ein Generisches (verfahrensunabhängiges) Vorgehensmodell und in Spezifische (verfahrensabhängige) Vorgehensmodelle. Die Vorgehensmodelle werden wiederum in Phasen und Meilensteine sowie untergliederte Prozessschritte unterteilt. Diese Anforderung wird erfüllt.

A2) Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Produkt und Produktionssystem: Schon bei der Produkt- und Produktionssystemkonzipierung müssen gegenseitige Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Daher beinhaltet die jeweilige Phase einen Prozessschritt *Restriktionen erfassen*. Anhand von *Restriktionschecklisten* können die wesentlichen Wechselwirkungen erkannt und berücksichtigt werden. In späteren Produktentwicklungsphasen treten mehr Wechselwirkungen auf. Abhängig vom MID-Verfahren sind für jeden Prozessschritt der Phase *3D-Elektronik entwerfen* die zu beachtenden Wechselwirkungen aufgeführt.

A3) Entwicklungsunterstützung durch Methoden- und Richtlinienempfehlung: Sowohl im Generischen als auch im Spezifischen Vorgehensmodell werden Methoden zur Produktentwicklung empfohlen. Die Empfehlung beruht dabei auf der Auswahl etablierter Methoden mit möglichst geringem Aufwand. Methoden speziell für die Entwicklung von MID-Teilen (*Eigenschaftskarten der MID-Verfahren*, *MID-Konstruktionskatalog*, *Restriktionschecklisten*) wurden in das Vorgehensmodell eingeordnet. Im Spezifischen Vorgehensmodell werden zudem Richtlinien und Normen sowohl für die Produkt- als auch Prozessentwicklung genannt.

A4) Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl des MID-Verfahrens: Die Anforderungen durch das MID-Produktkonzept bilden die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens. Insgesamt acht Merkmale bestimmen die Eignung eines MID-Verfahrens für ein Produkt. Zur Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens wird auf die *Eigenschaftskarten der MID-Verfahren nach PEITZ* zurückgegriffen. Das Merkmalsprofil des MID-Produktkonzepts lässt sich direkt mit dem Eigenschaftsprofilen der MID-Verfahren vergleichen. Daraus lassen sich Aussagen über die Eignung der MID-Verfahren machen.

A5) Rechnerunterstützung durch eine Wissensbasis: Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für die Rechnerunterstützung der Systematik durch eine Wissensbasis erstellt. Dazu wurden Anforderungen an eine MID-

Wissensbasis aufgestellt und der Aufbau und die Handhabung der Wissensbasis konzipiert. Die Wissensbasis deckt die Bereiche *Prozesse* (Vorgehensmodelle und Tätigkeitsbeschreibungen), *Fachwissen* (Methoden, Richtlinien und Entscheidungshilfen) und *Erfahrungswissen* (Wechselwirkungen) ab. Teile dieser Wissensbasis, insbesondere der Entscheidungsunterstützung, sind bereits prototypisch umgesetzt und veröffentlicht worden.

A6) Verständlichkeit: Kern der Systematik sind die Vorgehensmodelle. Sie ermöglichen eine systematische und zielgerichtete Produktentwicklung. An geeigneten Stellen wird auf bestehende Methoden und Richtlinien verwiesen. Sie unterstützen die Entwickler bei der tatsächlichen Durchführung der Tätigkeiten. Jede dieser Methoden und Richtlinien ist auch unabhängig von der Gesamtsystematik einsetzbar.

A7) Beherrschung der Komplexität: Die im Generischen Vorgehensmodell definierten Phasen werden im Spezifischen Vorgehensmodell in Prozessschritte weiter unterteilt. Für jeden Prozessschritt werden die Tätigkeiten detailliert und am Beispiel des MID-Gehäuses des Miniaturroboters erläutert. Eingangs- und Ausgangsdokumente für jeden Prozessschritt sind definiert.

A8) Gleichberechtigung der Domänen: Diese Anforderung wird durch die Systematik erfüllt, da sie die an der MID-Entwicklung beteiligten Domänen (Mechanik, Elektronik, Fertigungstechnik, Aufbau- und Verbindungstechnik) gleichermaßen und gleichwertig betrachtet. Zur Beschreibung der Prinziplösungen von Produkt und Produktionssystem wird auf die *Spezifikationstechniken von FRANK und MICHELS* zurückgegriffen. Sie ermöglichen eine übersichtliche und domänenübergreifende Darstellung.

Die vorgestellte *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* erfüllt damit alle Anforderungen. Sie wurde mit Erfolg am Beispiel Autonomer Miniaturroboter getestet. Mit Hilfe der Systematik wurde ein MID-Gehäuse entwickelt, das über 100 elektronische Bauteile sowie Motoren, Akkumulator, Leiterplatten und Aufbaumodule mechanisch und elektronisch verbindet.

Heute dient der Miniaturroboter als Forschungsplattform für Schwarmintelligenz und Multi-Agenten-Anwendungen der Informatik am Heinz Nixdorf Institut. Darüber hinaus ist er Demonstrator für dynamisch rekonfigurierbare Systeme im Sonderforschungsbereich 614 *Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus* und als integrierte mechanisch-elektronische Baugruppen im Verbundprojekt *Instrumentarium für die frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme* (InZuMech).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die Technologie MID ermöglicht Innovationen bei mechatronischen Systemen, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen (mechanisch-elektronische Baugruppen). Durch sie lassen sich planare Leiterplatten durch räumliche Schaltungsträger ersetzen. Die Technologie MID unterstützt durch ihre Gestaltungsfreiheit die Miniaturisierung und reduziert die Teilezahl. Das führt zu einer höheren Zuverlässigkeit und geringeren Kosten. Darüber hinaus ermöglicht sie völlig neue Lösungen und Funktionen bei mechanisch-elektronischen Baugruppen. Typische Anwendungen stammen aus der Medizin- und Automatisierungstechnik, beispielsweise das MID-Modul im Hörgerät und das MID-Gehäuse eines LED-Anzeigenelements.

Dem großen Potential der Technologie MID stehen aber auch Barrieren gegenüber: Eine hohe Produktkomplexität durch die vielen beteiligten Domänen und die Abhängigkeiten zwischen Produkt und Produktionssystem machen die Entwicklung von MID-Teilen zu einer Herausforderung. Aus diesem Grund gelangten bislang nur wenige MID-Produktideen bis zur Serienreife.

Zur Überwindung der Barrieren benötigen die Entwickler Unterstützung: Sie brauchen einen Leitfaden, der den Entwicklungsprozess strukturiert, detailliert beschreibt und die fertigungsspezifischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen aufzeigt. Dabei müssen die beteiligten Domänen Mechanik, Elektronik und Fertigungstechnik gleichermaßen betrachtet werden. Dem Entwickler sollen Werkzeuge in Form von Methoden und Richtlinien empfohlen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Systematiken zur Mechatronik-Entwicklung untersucht. Keiner der betrachteten Ansätze erfüllt alle der in Kapitel 2.6 definierten Anforderungen. Zwar beinhalten die meisten Systematiken eine domänenübergreifende Vorgehensweise, aber nur die *VDI-Richtlinien 2221* und *2422* sowie die *Systematiken nach EQUAL* und *INERELA* beschreiben auch detailliert den Entwicklungsprozess. Einige Systematiken geben Empfehlungen zum Methodeneinsatz während der Entwicklung. Dazu zählen der die *VDI-Richtlinie 2221* und das *Vorgehen nach LINDEMANN*. Die MID-spezifischen Werkzeuge *Eigenschaftskarten* und die *MIDIS-Datenbank* unterstützen lediglich die Auswahl des geeigneten MID-Verfahrens. Die CAD-Werkzeuge *MIDCAD* und *NEXTRA* unterstützen nicht den gesamten Entwurfsprozess, sondern nur die Ausarbeitung. Aus diesen Erkenntnissen leitet sich der Handlungsbedarf nach einer neuen Systematik ab.

Die in dieser Arbeit entwickelte Systematik greift einige der untersuchten Ansätze auf und ergänzt sie um detailliertere Beschreibungen, Richtlinien und Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Ergebnis ist eine Systematik, die im Kern aus drei Elementen besteht:

- einem **Generischen Vorgehensmodell**, das die wesentlichen Prozessphasen und Meilensteine definiert, die dazugehörigen Tätigkeiten und Ergebnisse beschreibt und geeignete Entwicklungsmethoden empfiehlt,
- einem **Spezifischen Vorgehensmodell für die Laserdirektstrukturierung**, das die Entwicklungstätigkeiten detailliert beschreibt und dabei die Eigenschaften dieses MID-Verfahrens berücksichtigt, Wechselwirkungen zwischen dem Verfahren und dem Produkt aufzeigt sowie Richtlinien zur Unterstützung vorschlägt und
- einem **Konzept einer Wissensbasis**, in der alle gesammelten Informationen abgelegt sind und die den Entwicklungsablauf rechnerbasiert unterstützt.

Abschließend ist festzuhalten, dass die erarbeitete *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* die aufgestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt. Die Systematik wurde im Rahmen der Entwicklung eines autonomen Miniaturroboters erfolgreich eingesetzt. Das Ergebnis ist ein MID-Gehäuse, das über 100 elektronische Bauteile mechanisch und elektronisch verbindet. Heute dient der Miniaturroboter als Demonstrator im Sonderforschungsbereich 614 *Selbstopimierende Systeme des Maschinenbaus* und im Verbundprojekt *Instrumentarium für die frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme* (InZuMech).

Ausblick

Für die Technologie MID besteht auch in Zukunft weiterer Forschungsbedarf. Beispielsweise sind die zu beachtenden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem noch nicht ausreichend untersucht. In dieser Arbeit werden lediglich Wechselwirkungen für das MID-Verfahren Laserdirektstrukturierung aufgezeigt. Es existieren aber viele weitere Verfahren, deren Wechselwirkungen z.T. noch unbekannt sind.

Ein großer Nutzen würde sich aus einer eigenen Konstruktionslehre für die Technologie MID ergeben. Neben Vorgehensmodellen zählen dazu Gestaltungsrichtlinien, Konstruktionskataloge sowie Richtlinien und Normen. Für Teile davon existieren erste Ansätze (Vorgehensmodelle, Konstruktionskataloge), es fehlt aber insbesondere an Richtlinien und Normen. Damit ergeben sich hier neue Forschungsfelder. Ziel ist eine Konstruktionslehre nach dem Vorbild von PAHL/BEITZ [PB07] für den Bereich Maschinenbau.

6 Abkürzungsverzeichnis

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BGA	Ball Grid Array
CoB	Chip on Board
ECAD	Elektronik-CAD
evtl.	eventuell
FSM	Finite State Machines
GFK	Glasfaser-verstärkter Kunststoff
ggf.	gegebenenfalls
LCP	Liquid Crystalline Polymer
LDS	Laserdirektstrukturierung
LED	Licht emittierende Diode
M ³ D	Maskless Mesoscale Materials Deposition
MID	Molded Interconnect Devices
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
PCB	Printed Circuit Board
PCK	Printed Circuit Board Kollmorgen
QFD	Quality Function Deployment
RFID	Radio Frequency Identification
SKW	Sankyo Kasei Wiring Board
SMT	Surface Mounted Technology
SMD	Surface Mounted Device
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
THT	Through Hole Technology
z.T.	zum Teil
z.B.	zum Beispiel

7 Literaturverzeichnis

Publikationen

- [Ame02] AMELINGMEYER, J.: Wissensmanagement – Analyse und Gestaltung der Wissensbasis von Unternehmen. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2002
- [AR88] ANDREAS, D; REICHLE, W.: Selbst fertigen oder Kaufen? – Strategische Überlegungen – Rechen- und Entscheidungsschema. Maschinenbau-Verlag, Frankfurt/M., 1988
- [Arm89] ARMSTRONG, J. R.: Chip-Level-Modeling with VHDL. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989
- [Ben05] BENDER, K. (Hrsg.): Embedded Systems – qualitätsorientierte Entwicklung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [Bro03] DER BROCKHAUS: Brockhaus – Naturwissenschaft und Technik, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 2003
- [Bur06] BURMEISTER, M.: Small Outline Pressure Sensor in MID-Package. In : FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN (Hrsg.): 7. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2006, 27. bis 28. September 2006, Erlangen, 2006
- [Con01] CONRADS, D.: Telekommunikation – Grundlagen, Verfahren, Netze. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2001
- [DH02] DAENZER, W.; HUBER, F. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 2002
- [Dö89] DÖRNER, D.: Die Logik des Misslingens – Strategisches Denken in komplexen Situationen. Rohwolt-Verlag, Reinbeck, 1989
- [Dud04] DUDEN: Die deutsche Rechtschreibung. Band 1, 23. Auflage, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 2004
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [Ern05] ERNST, C.: Genau hinhören: Neues System bringt mehr Klang und Komfort für's Ohr. In: HARTING TecNews, Espelkamp, 2005
- [Esc93] ESCHERMANN, B.: Funktionaler Entwurf digitaler Schaltungen. Springer-Verlag, Berlin, 1993
- [FGK+04] FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 155, Paderborn, 2004
- [FK04] FELDMANN, K.; KUNZE, A.: Technologie 3D-MID – Aktuelle Werkstoffe und Herstellungsverfahren. In: Kunststoffe 4/2004
- [For04] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V.: 3D-MID Technologie – Räumliche Elektronische Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2004

- [FPR06] FELDMANN, K.; PFEFFER, M.; REINHARDT, A.: Creative Developments and Innovative Technologies for the Further Success of MID. In: : FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN (Hrsg.): 7. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2006, 27. bis 28. September 2006, Erlangen, 2006
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fri06] FRITSCH GMBH: Bestückungstechnik: Flexible Fertigung von kleinen und mittleren Serien. In: PLUS 5/2006
- [FSW04] FELDMANN, K.; SCHÜBLER, F.; WÖLFLICK, P.: MID and Foil – Technologies for Flexible Circuit Carriers. In: FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN (Hrsg.): 6. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2004, 22. bis 23. September 2004, Erlangen, 2004
- [Gaj97] GAJSKI, D.: Principles of Digital Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997
- [Gau04] GAUSEMEIER, J.: Systematik der Fertigungsplanung. In: ZWF Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 6/2004, S. 327-334
- [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
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEIER, F.: Produktinnovation - Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GF99] GAUSEMEIER, J.; FINK, A.: Führung im Wandel – Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. Carl Hanser Verlag, München, 1999
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GP06] GAUSEMEIER, J.; PEITZ, T.: MID-Studie 2006 – MID-Marktvolumen Deutschland, Analyse von MID-Projekten. Eine Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung 3-D MID e.V. (Hrsg.), Erlangen, 2006
- [GR05] GAUSEMEIER, J.; REDENIUS, A.: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: SCHÄPPI, B.; ANDREASEN, M.; KIRCHGEORG, M.; RADERMACHER, F.-J.: Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2005
- [GT88] GAJSKI, D.; THOMAS, D.: Introduction to Silicon Compilation. In: GAJSKI, D. (Hrsg.): Silicon Compilation. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1988
- [Hän06] HÄNDSCHKE, J.: Leiterplattendesign – Ein Handbuch nicht nur für den Praktiker. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2006
- [Han94] HANKE, H.-J. (Hrsg.): Baugruppentechologie der Elektronik – Leiterplatten. Verlag Technik, Berlin, 1994
- [Heh06] HEHLGANS, J.: Innovative MID-Anwendungen bei der Firma HARTING – RFID in der 3. Dimension. In: PLUS 11/2006
- [HKR+07] HEDGES, M.; KING, B.; RENN, M.; EBERHARDT, W.; KÜCK, H.: M³D™ – Ein neues Verfahren zur 3D-Direktstrukturierung. In: PLUS 3/2007

- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMUZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics – „What Is It, Why and How?“ – An Editorial. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996
- [Ise 99] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [KBS+97] KALLENBACH, E.; BIRLI, O.; SAFFERT, E.; SCHÄFFEL, C.: Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte. In: Mechatronik im Maschinen- und Fahrzeugbau, Tagung Moers, 11. bis 12. März 1997, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, VDI Verlag, Düsseldorf, VDI-Berichte Nr. 1315, 1997
- [KF05] KREBS, T.; FRANKE, J.: Konstruktionswerkzeuge für elektronisch/mechanisch integrierte Produkte – ECAD- und MCAD-Funktionen in einem dreidimensionalen Entwicklungssystem integriert. In: Elektronik 18/2005, S. 60-66
- [KFG06] KRAUSE, F.-L.; FRANKE, H.-J.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Innovationspotentiale in der Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Köc03] KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation. Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 143, 2003
- [Kri02] KRIBITSCH, I.: 3-D-MID Technologie in der Automobiltechnologie. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [Laß02] LAB, D.: Kundenwünsche analysieren und verstehen – Band C: Methoden und Anwendungsbeispiele. Dissertation, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft, Freie Universität Berlin, Weißensee Verlag, Berlin, 2002
- [Lin05] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer Verlag, Berlin, 2005
- [LKS00] LÜCKEL, J.; KOCH, T.; SCHMITZ, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: VDI-Tagung „Mechatronik – Mechanisch elektrische Antriebstechnik“, 29. – 30. März 2000, Wiesloch, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Mau05] MAUS, H.: Neues Mitglied im 3-D MID e.V. In: PLUS 3/2005
- [Mel92] MELCHERT, M.: Entwicklung einer Methode zur systematischen Planung von Make-or-Buy-Entscheidungen. Shaker Verlag, Aachen, 1992
- [Mic06] MICHELS, J.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation. Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006
- [Möh04] MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 156, Paderborn, 2004
- [Mül90] MÜLLER, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften – Systemtechnik, Heuristik, Kreativität. Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [PB07] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 2007

- [Pei08] PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2008
- [PGE02] PÖHLAU, F.; GERHÄUBER, T.; EBERHARDT, W.: Two-Shot MID with microstructures as substrate for wire bonding. In: FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN (Hrsg.): 5. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2002, 25. bis 26. September 2002, Erlangen, 2002
- [Poj02] POJTINGER, A.: Automatisierte Fertigungslinie für Heißpräge-MID-Baugruppen. Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts AHMID, Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“, Wernau, 2002
- [REF90] REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 1990
- [RG05] REICHINGER, G.; GÖTZ, K.: Spritzen von Leiterzügen auf Kunststoffen. In: VDI-Z Integrierte Produktion 1/2 2005
- [Ros92] ROSE, M.: Leiterplattenentwurf. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1992
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band II, Kataloge. Springer-Verlag, Berlin, 2000
- [Sau02] SAUER, J.: Potentials and Use of MID in the Field of Medical Technology. In: FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN (Hrsg.): 5. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2002, 25. bis 26. September 2002, Erlangen, 2002
- [SD07] SÜB-WOLF, R.; DE PAOLIS, M.: LEONI FLAMECON – Strukturierte Metallisierung von der Idee zur technischen Umsetzung. In: PLUS 2/2007
- [Sch99] SCHEEL, W. (Hrsg.): Baugruppentechologie der Elektronik. Verlag Technik, Berlin, 1999
- [VHJ+07] VOLZ, P.; HEININGER, N.; JOHN, W.; BOBLER, H.-J.; ROTH, S.; DÖRFLER, R.; WILLEMANN, R.: Funktionale Schaltungsträger mittels Rapid Prototyping (RP) für MID-Anwendungen. In: PLUS 10/2007
- [Wat06] WATTY, R.: Methode zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik. Dissertation. Institut für Konstruktionstechnik und technisches Design, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006
- [ZAF06] ZHUO, Y.; ALVAREZ, C.; FELDMANN, K.: Entwicklung eines integrierten Konstruktionssystems für mechatronische Produkte mit räumlichen Schaltungsstrukturen. In: GAUSEMEIER, J., RAMMIG, F., SCHÄFER, W., TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme, 4. Paderborner Workshop, 30. -31. März 2006. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 189, 2006
- [ZAF07] Zhuo, Y.; Alvarez, C.; Feldmann, K.: *Entwicklung eines integrierten Konstruktionssystems für mechatronische Produkte mit räumlichen Schaltungsstrukturen*. In: Gausemeier, J., Rammig, F., Schäfer, W., Trächtler, A.; Wallaschek, J. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme, 5. Paderborner Workshop, 22. -23. März 2007. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 210, 2007
- [ZVEI06] ZENTRALVERBAND DER ELEKTROINDUSTRIE ZVEI: ZVEI Jahresstatistik. In: PLUS 11/2006

Normen und Richtlinien

- [2002/95/EG] Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)
- [FD X50-179] Qualitätsmanagement - Leitfaden für die Identifizierung der Kundenanforderungen.
- [VDI1000] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Richtlinienarbeit - Grundsätze und Anleitungen. VDI-Richtlinie 1000, Beuth-Verlag, Berlin, 2006
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklung mechatronischer Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2012] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Gestalten von Werkstücken aus GFK. VDI-Richtlinie 2012, Beuth-Verlag, Berlin, 1988
- [VDI2013] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Dimensionierung von Bauteilen aus GFK. VDI-Richtlinie 2013, Beuth-Verlag, Berlin, 1988
- [VDI2014] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. VDI-Richtlinie 2014, Beuth-Verlag, Berlin, 1989
- [VDI2221] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Beuth-Verlag, Berlin, 1993
- [VDI2222] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1, Beuth-Verlag, Berlin, 1997
- [VDI2247] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. VDI-Richtlinie 2247, Beuth-Verlag, Berlin, 1994
- [VDI2251] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Feinwerkelemente. VDI-Richtlinie 2251, Beuth-Verlag, Berlin, 1991
- [VDI2421] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Kunststoffoberflächenbehandlung in der Feinwerktechnik. VDI-Richtlinie 2421, Beuth-Verlag, Berlin, 1980
- [VDI2422] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER (VDE): Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. VDI/VDE-Richtlinie 2422, Beuth-Verlag, Berlin, 1994
- [VDI2424] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER (VDE): Industrial Design. VDI/VDE-Richtlinie 2424, Beuth-Verlag, Berlin, 1986
- [VDI2428] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER (VDE): Gerätetechnik. VDI/VDE-Richtlinie 2428, Beuth-Verlag, Berlin, 1989
- [VDI2803] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Funktionenanalyse. VDI-Richtlinie 2803, Beuth-Verlag, Berlin, 1996
- [VDI2806] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Kreativitätspotenziale und Ideenfindung. VDI-Richtlinie 2806, Beuth-Verlag, Berlin, 2002
- [VDI3404] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologies (Rapid Prototyping). VDI-Richtlinie 3404, Beuth-Verlag, Berlin, 2006

- [VDI3712] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTRO-TECHNIKER (VDE): Leiterplattenbestückung; Bestimmung der Genauigkeit und der Leistung von SMD-Bestückungsautomaten. VDI/VDE-Richtlinie 3712, Beuth-Verlag, Berlin, 1991
- [VDI3715] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI); VEREIN DEUTSCHER ELEKTRO-TECHNIKER (VDE): Prozeßmeß- und Prüftechnik für Leiterplattenbaugruppen in SMD-Technik. VDI/VDE-Richtlinie 3715, Beuth-Verlag, Berlin, 1995
- [VDI4005] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse. VDI-Richtlinie 4005, Beuth-Verlag, Berlin, 1981
- [DIN1530] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Press-, Spritzgieß- und Druckgießwerkzeuge. DIN-Norm 1530, Beuth-Verlag, Berlin, 2008
- [DIN16901] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Kunststoff-Formteile; Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße. DIN-Norm 16901, Beuth-Verlag, Berlin, 1982
- [DIN19226] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Leittechnik, Regelungstechnik, Steuerungstechnik. Allgemeine Grundlagen. DIN-Norm 19226, Beuth-Verlag, Berlin, 1994
- [DIN25424] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen. DIN-Norm 25424, Teil 1, Beuth-Verlag, Berlin, 1981
- [DIN60617] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Graphische Symbole für Schaltpläne. DIN-Norm 60617, Beuth-Verlag, Berlin, 1997
- [DIN60825] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Sicherheit von Lasereinrichtungen. DIN-Norm 60825, Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [DIN61188] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Leiterplatten und Flachbaugruppen - Konstruktion und Anwendung. DIN-Norm 61188, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [DIN62430] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): Umweltbewusstes Gestalten von elektrischen und elektronischen Produkten und Systemen. DIN-Norm 62430, Beuth-Verlag, Berlin, 2007

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A1 Methoden zur Anforderungsanalyse	A1
A1.1 Schwachstellen-Analyse	1
A1.2 Fokusgruppeninterview	1
A2 Methoden zur Lösungsfindung	A3
A2.1 Funktionsmodellierung	3
A2.2 Konstruktionskataloge	3
A2.3 Morphologischer Kasten	4
A3 Methoden zur Gestaltung	A7
A3.1 Gestaltungsprinzipien	7
A3.2 Systematische Variation der Gestalt	8
A3.3 Numerische Simulation	9
A4 Methoden zur Arbeitsplanung	A11
A4.1 Vorranggraphen	11
A4.2 Kapazitätsplanung mit Kapazitätsfeldern	12

A1 Methoden zur Anforderungsanalyse

A1.1 Schwachstellen-Analyse

Die Stärken-Schwächen-Analyse vergleicht die Leistungen eines Unternehmens mit den Spitzenleistungen der Branche (best practice). Gegenstand der Bewertung können dabei sowohl Funktionsbereiche als auch Erzeugnisse des Unternehmens sein. Die Bewertung erfolgt anhand von Wettbewerbsfaktoren. Darunter werden im Wettbewerb relevante Größen verstanden, die vom Unternehmen mittelbar oder unmittelbar beeinflusst werden können. Beispiele sind Vertrieb oder Produktqualität.

Im Rahmen einer Expertenbefragung werden die einzelnen Wettbewerbsfaktoren anhand mehrerer Kriterien analysiert. Zur Bewertung wird eine Skala von 0 (entspricht einer wesentlichen Schwäche im Vergleich zur Konkurrenz) bis 4 (wesentliche Stärke im Vergleich zur Konkurrenz) verwendet. Die Ergebnisse der Befragung werden graphisch aufbereitet und ergeben das Stärken-Schwächen-Profil des Untersuchungsgegenstands. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen ableiten. [GF99, S. 193ff]

Bewertung: Die Stärken-Schwächen-Analyse kann für die Analyse und Bewertung bestehender Produkte eingesetzt werden. Sie ist produktunabhängig einsetzbar und erlaubt Eigenschaftsanalysen in verschiedenen Detaillierungen. Ihr Aufwand ist vergleichsweise gering. Sie funktioniert jedoch nur, wenn bereits vergleichbare Produkte existieren. Zur Anforderungsanalyse bei Neukonzipierungen ist sie nicht einsetzbar.

A1.2 Fokusgruppeninterview

Fokusgruppeninterviews sind eine häufig angewandte Technik in der Marktforschung. Sie werden allgemein mit der Neuproduktentwicklung assoziiert, können aber auch zur Aufdeckung von Kundenwünschen bei bestehenden Produkten eingesetzt werden. [LaB02, S. 1407]

Fokusgruppen haben in der Regel acht bis zwölf Teilnehmer und werden von einem Moderator geleitet. In einer entspannt-lockeren Atmosphäre diskutieren die Teilnehmer möglichst angeregt über neue Produktideen oder Wünsche und Erwartungen bei bestehenden Produkten. Zusätzlich können dabei Kreativitätstechniken wie Brainstorming eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3.2.2). Durch die gruppendynamischen Effekte kann in relativ kurzer Zeit ein breites Spektrum von offensichtlichen und latenten Kundenproblemen und -wünschen entdeckt werden. [LaB02, S. 1408]

Fokusgruppen können darüber hinaus für Konzepttests eingesetzt werden. Die Teilnehmer erhalten Muster des geplanten Produkts. Die sich anschließende Diskussion bildet in gewisser Weise den Aufnahmeprozess des Produkts in den Markt ab. Einige Teilnehmer werden das Produkt annehmen, andere ablehnen. Daraus lassen sich Veränderungen und Marketingstrategien ableiten. [Laß02, S. 1408]

Empirische Studien haben gezeigt, dass Fokusgruppeninterviews nicht mehr oder bessere Kundenwünsche, Erwartungen und neue Produktideen liefern als Einzelinterviews. Fokusgruppen sind aber vielseitiger einsetzbar und bieten aufgrund der Gruppendynamik einen leichteren Zugang zu latenten und tieferen Bedürfnissen. [Laß02, S. 1409]

Bewertung: Fokusgruppen sind eine weit verbreitete Methode zur Identifizierung von Kundenwünschen. Sie ist produktunabhängig einsetzbar kann dabei sowohl für Neuprodukte und Produktverbesserungen als auch für Produkttests genutzt werden. Sie verursacht mittleren Aufwand. Für die Anforderungsanalyse von MID-Projekten sind Fokusgruppen daher sehr gut geeignet.

A2 Methoden zur Lösungsfindung

A2.1 Funktionsmodellierung

Funktionsmodelle bilden Eigenschaften von Produkten auf abstrakter Ebene ab. Sie dienen der Strukturierung komplexer Gesamtfunktionen in einfachere leichter zu bearbeitende Teilfunktionen. Damit unterstützen sie den Umgang mit Komplexität. Das Erstellen von Funktionsmodellen fördert das Verständnis für das zu entwickelnde System. Das Verhalten des Systems kann in geeigneter Form (z.B. lösungsneutral) abgebildet werden. [Lin05, S. 238]

Zu Beginn der Funktionsbetrachtung muss das Ziel des Funktionsmodells festgelegt werden. Zur lösungsneutraler Abbildung neuer Produkte bietet sich die umsatzorientierte Funktionsmodellierung an, für eine Stärken-Schwächen- oder Widerspruchsanalyse eignet sich das relationsorientierte Funktionsmodell. Bei umsatzorientierter Funktionsmodellierung werden hauptsächlich Stoff- Energie- und Signalumsätze betrachtet, die Relationen zwischen den Funktionsträgern stehen nicht im Vordergrund und werden nur in ihrer Wirkungsrichtung unterschieden. Bei der relationsorientierte Funktionsmodellierung sind die Relationen streng systematisiert, die zu verknüpfenden Objekte sind aus der Problemsicht heraus festzulegen. [Lin05, S. 239]

Das Arbeiten mit Funktionsmodellen erfordert die Fähigkeit, sich auf einem abstrakten Niveau der Produktbeschreibung zu bewegen. Eine funktionale Beschreibung eröffnet den Zugang zu Lösungen aus anderen Disziplinen. [Lin05, S. 239]

Bewertung: Die Funktionsmodellierung ermöglicht ein leichteres Verständnis des Produkts und die Lösungsfindung aus anderen Domänen. Sie unterstützt damit die Anforderung A1 sehr gut. Die Methode ist produktunabhängig einsetzbar. Sie kann sowohl bei Neukonzipierungen als auch für die Verbesserung bestehender Produkte eingesetzt werden. Funktionsmodellierung ist damit für die Produktentwicklung sehr gut geeignet.

A2.2 Konstruktionskataloge

Konstruktionskataloge sind Sammlungen bekannter und bewährter technischer Lösungen [PB07, S. 150]. Sie unterstützen den Entwickler bei der Konstruktion, indem direkt verschiedene Lösungsalternativen für ein identifiziertes Problem vorgeschlagen werden [VDI2222, S. 27]. Konstruktionskataloge werden in verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses angewendet; daher reicht der Inhalt von Konstruktionskatalogen von abstrakten physikalischen Effekten über Wirkprinzipien bis hin zu Normteilen [PB07, S. 150]. Konstruktionskata-

loge werden unterschieden in konventionelle Kataloge von Lieferanten (mit Normteilen und Maschinenelementen), Sammlungen technischer Lösungen und systematisch geordnete Konstruktionskataloge (nach ROTH und VDI-Richtlinie 2222) [Ehr07, S. 416].

Die wesentlichen Ziele von Konstruktionskatalogen sind die Unterstützung eines schnellen, aufgabenorientierten Zugriffs auf Lösungen und ein möglichst vollständiges Lösungsspektrum [Ehr07, S. 416]. Für den Aufbau von Konstruktionskatalogen empfiehlt ROTH eine Struktur aus Gliederungs-, Haupt- und Zugriffsteil und einen Anhang. Der Gliederungsteil enthält ordnende Gesichtspunkte und unterscheidende Merkmale. Die Übersicht und Handhabung wird so vereinfacht. Der Hauptteil umfasst den eigentlichen Inhalt des Katalogs. Die Lösungsalternativen sind anhand von Skizzen dargestellt. Im Zugriffsteil sind Eigenschaften der Lösungsalternativen enthalten. Der Anhang enthält ergänzende Informationen. [Rot00, S. 4]

Konstruktionskataloge entstammen dem Maschinenbau. Entsprechend gibt es Kataloge für viele Bereiche des Maschinenbaus, von der Antriebstechnik, Führungen und Lager, Getriebe bis zur Verbindungstechnik. ROTH [Rot00] umfasst 56 Konstruktionskataloge. In anderen Domänen sind Konstruktionskataloge seltener. Hinweise für die Erstellung von Konstruktionskatalogen geben sowohl ROTH als auch die VDI-Richtlinie 2222. [Rot00], [VDI2222]

Bewertung: Konstruktionskataloge sind hervorragend für die Lösungssuche geeignet. Sie erlauben einen schnellen Zugriff auf bewährte Lösungen. Darüber können sie gut in eine Wissensbasis integriert werden. Konstruktionskataloge sind prinzipiell für jede Domäne erstellbar. PEITZ [Pei08] hat speziell für MID einen MID-Konstruktionskatalog entwickelt.

A2.3 Morphologischer Kasten

Der Morphologische Kasten ist ein nach Kriterien geordnetes eindimensionales Ordnungsschema. In der Produktentwicklung wird er für die Lösungssuche und -generierung eingesetzt. Dazu werden für Teilprobleme bzw. Teilfunktionen eines Systems verschiedene Lösungsalternative systematisch in einer Matrix erfasst. Die Methode basiert auf der Zerlegung komplizierter Sachverhalte in kleinere Strukturen, in der Zuordnung von Lösungselementen und deren Kombination zu einem integrierten Gesamtkonzept. [Lin05, S. 251], [GEK01, S. 227], [Ehr07, S. 428f]

Um einen Morphologischen Kasten zu erstellen, wird zunächst das Problem analysiert und verständlich definiert. Die gemeinsamen Ordnungskriterien aller potentiellen Lösungen (häufig die Teilfunktionen) werden systematisch erfasst und in der ersten Spalte eingetragen. Die jeweiligen Teillösungen werden dann

durch Methoden der Lösungssuche (z.B. Konstruktionskataloge, siehe oben) erarbeitet und in horizontaler Richtung eingefügt. Anschließend wird der Morphologische Kasten dazu verwendet, um Teillösungen zu Gesamtkonzepten zusammenzustellen. Dies geschieht durch Kombination der Teillösungen: Für jedes Teilproblem wird eine Lösung ausgewählt und in die Gesamtlösung integriert. Das Finden guter Gesamtlösungen ist häufig ein iterativer Prozess. [Lin05, S. 252]

Durch den systematischen Lösungsprozess unterstützt der Morphologische Kasten die Abbildung eines sehr großen Lösungsfelds. Sehr viele Informationen und Lösungen werden übersichtlich dargestellt. In vielen Fällen ist die gewonnene Lösungsmenge dennoch nicht mehr überschaubar. Es ist dann schwierig zu erkennen, welche Kombination die Optimallösung darstellt. Hier ist es sinnvoll, das mögliche Lösungsfeld durch Vorauswahl der Lösungen und geeignetes Vorgehen einzuschränken. [Lin05, S. 252]

Bewertung: Der Morphologische Kasten ist eine seit vielen Jahren eingesetzte und bewährte Methode zur Lösungsfindung. In Verbindung mit Konstruktionskatalogen aus den verschiedenen Domänen, insbesondere dem MID-Konstruktionskatalog (Kapitel 3.3.2) können damit für Teilbereiche gute domänenübergreifende Lösungskonzepte erarbeitet werden. Er erfüllt daher die Anforderung A8 sehr gut. Bei komplexen Systemen mit vielen Funktionen stößt aber auch diese Methode an ihre Grenzen.

A3 Methoden zur Gestaltung

A3.1 Gestaltungsprinzipien

Gestaltungsprinzipien sind Grundregeln für die Gestaltung technischer Systeme. Sie geben grundsätzliche Handlungsempfehlungen, die sich nicht aus der Aufgabenstellung und nur bedingt aus der Anforderungsliste ableiten lassen, aber bei der Bauteilgestaltung zu berücksichtigen sind. Sie unterstützen die von PAHL/BEITZ aufgestellten Grundregeln der eindeutigen, einfachen und sicheren Gestaltung technischer Systeme. [PB07, S. 353f] Gestaltungsprinzipien sind allgemeingültig und produktunabhängig einsetzbar. In der Literatur ist eine ganze Reihe von Gestaltungsprinzipien zu finden. Am weitesten verbreitet sind die Gestaltungsprinzipien von PAHL/BEITZ. Sie klassifizieren Gestaltungsrichtlinien in folgende vier Gruppen [PB07, S. 354ff]:

Prinzipien der Kraftleitung: Kraftfluss und Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit, Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung, Prinzip der abgestimmten Verformungen und das Prinzip des Kraftausgleichs

Prinzipien der Aufgabenteilung: Zuordnung der Teilfunktionen, Aufgabenteilung bei unterschiedlichen Funktionen, Aufgabenteilung bei gleichen Funktionen

Prinzipien der Selbsthilfe: Selbstvertärende Lösungen, Selbstaussgleichende Lösungen, Selbstschützende Lösungen

Prinzipien der Stabilität und Bistabilität: Prinzip der Stabilität, Prinzip der Bistabilität

Ein Beispiel für ein solches Gestaltungsprinzip ist das *Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung*. Es besagt, dass Kräfte oder Momente auf direktem und möglichst kurzem Weg zwischen Gestaltelementen übertragen werden sollen. Das bewirkt ein Minimum an Werkstoffaufwand, Volumen, Gewicht und Verformung [PB07, S. 366]. Die Anwendung der Gestaltungsprinzipien erfolgt abhängig von der jeweiligen Konstruktionsaufgabe. Der Entwickler wählt je nach Anforderungen einzelne Gestaltungsprinzipien aus.

Bewertung: Gestaltungsprinzipien sind produktunabhängig und allgemeingültig. Jeder Entwickler sollte sie kennen. Sie werden häufig im Rahmen des Entwurfs und der Ausarbeitung eingesetzt. Da bei MID-Teilen die Gestalt des Schaltungsträgers schon in der Konzipierung eine wichtige Rolle spielt (u.a. für die Auswahl des MID-Verfahrens), sollten sie schon in der Konzipierung angewendet werden.

A3.2 Systematische Variation der Gestalt

Die Gestalt eines Produktes wird durch die Gesamtheit seiner geometrischen Merkmale beschrieben. Jedes Produkt ist ein System von Gestaltelementen; jedes Element kann durch die Merkmale Form, Größe und Oberfläche definiert werden. Das Produkt lässt sich somit durch die Gestalt der einzelnen Elemente sowie deren Lage und Anordnung in Raum darstellen. Je nach Produkt kann die Gestalt eine hohe Komplexität aufweisen. [Ehr07, S. 433]

Bei der Gestaltung von Bauteilen werden das generierende Gestalten und das korrigierende Gestalten unterschieden. Das *generierende Gestalten* erfolgt hauptsächlich in der Konzipierung; die abstrakte Wirkstruktur eines Produkts wird durch die Gestaltung von Bauteilen konkretisiert. Variationsmerkmale der Bauteilgestalt (Form, Größe, Lage) werden zu Lösungsvarianten verändert und bewertet. Dies erfolgt im Allgemeinen bei der Neukonzipierung. Beim *korrigierenden Gestalten* wird ein bestehendes Produkt überarbeitet; die vorhandene Gestalt dient als Grundlage. Das korrigierende Gestalten findet fast ausschließlich in der Entwurfsphase statt. [Ehr07, S. 436]

EHRLENSPIEL definiert über 20 Variationsmerkmale der Gestalt. Sie werden nach Art der Variation untergliedert; dabei wird zwischen direkter und indirekter Variation unterschieden. Unter direkter Variation wird die direkte Veränderung der Gestalt (Flächen und Körper und deren Beziehungen) verstanden. Zugehörige Variationsmerkmale sind Form, Zahl, Lage und Größe. Eine indirekte Variation erfolgt über die Veränderung von Stoff, Kraftübertragung, Fertigungs- und Montageverfahren, Bewegungen und Getriebearten. [Ehr07, S. 439] Durch das Übertragen der Merkmalsausprägungen auf das Konstruktionsproblem lassen sich Varianten erzeugen und bewerten. Dazu definiert EHRLENSPIEL drei Teilschritte [Ehr07, S. 437]:

Aufgabe klären: Die Schwachstellen einer Ausgangslösung werden analysiert und Anforderungen an die neue Gestalt definiert.

Lösungen suchen: Die Variationsmerkmale der vorhandenen Lösung werden ermittelt und die vordefinierten Merkmalsausprägungen angewendet. Die hohe Zahl an Variationsmöglichkeiten empfiehlt eine Fokussierung auf Schwachstellen.

Lösung auswählen: Die Lösungen werden bewertet und die Beste ausgewählt.

Bewertung: Durch eine systematische Variation von Produkteigenschaften soll die Gestalt optimiert werden. Die Stärke der Methodik liegt in der Systematik. Konkrete Handlungsempfehlungen z.B. für die Gestaltung eines Schaltungsträgers werden nicht gegeben. Die Methode ist daher nur bedingt geeignet.

A3.3 Numerische Simulation

Bei numerischen Simulationen geht es um die Ermittlung ausgewählter Merkmalsausprägungen auf Basis numerischer Modelle. Die Modelle sollen die realen Verhältnisse möglichst genau vorhersagen. Die Wahl der Methode der numerischen Simulation erfolgt in Abhängigkeit vom zu erwartenden Aufwand, der verfügbaren Kompetenz, der geforderten Aussage (Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Abhängigkeiten etc.), den Forderungen hinsichtlich Termine und anderer Randbedingungen. [Ehr07, S. 497], [Lin05, S. 253]

Wird eine numerische Simulation geplant, so müssen das Modell für die Simulation, die zu betrachtenden Parameter, die Grenzen des Simulationsverfahrens, die Form der Durchführung sowie die Auswertung und Dokumentation festgelegt werden. [Lin05, S. 253]

Es gibt eine ganze Reihe von Simulationsmethoden, die mittlerweile alle rechnerunterstützt werden. Die häufigste Simulation in der Mechatronik ist die Mehrkörpersimulation (MKS), das bekannteste kommerzielle Werkzeug dazu ist Matlab/Simulink. Bei integrierten mechanisch-elektronischen Systemen wie MID-Teilen können während der Entwicklung Steifigkeitsanalysen des Schaltungsträgers mittels Finite Elemente Methode (FEM) eingesetzt werden, zur Schaltungssimulation kommen so genannte SPICE-Tools zum Einsatz. Auch Teilschritte der Fertigung wie der Spritzguss (z.B. mit Moldflow) und die Bestückung können simuliert werden.

Bewertung: Simulationsmethoden während des gesamten Entwurfs und Ausarbeitung eingesetzt werden und liefern dem Entwickler wertvolle Hinweise zur Eigenschaftsabsicherung und Produktverbesserung. Allerdings sind für jedes Untersuchungsziel andere Methoden und Werkzeuge einzusetzen, die häufig hohe Anforderungen an Kompetenz und Aufwand stellen. Außer bei den Mechanik-Simulationen wird der dreidimensionale Charakter von MID-Teilen nicht unterstützt (z.B. bei EMV-Simulationen).

A4 Methoden zur Arbeitsplanung

A4.1 Vorranggraphen

Der Arbeitsablauf in der Produktion wird hauptsächlich von der Konstruktion des Produkts beeinflusst. Diese bestimmt weitgehend den Einsatz verschiedener Technologien und legt auch die Reihenfolge der Teilvorgänge fest. Zur Analyse der Gestaltungsspielräume bezüglich des Arbeitsablaufs hat sich der Einsatz des Vorranggraphen im Planungsprozess bewährt. [REF90, S. 157]

Der Vorranggraph enthält netzplanartig sämtliche zur Herstellung eines Produkts gehörenden Tätigkeiten, die als Teilvorgänge bezeichnet werden. Ein Teilvorgang kann nicht sinnvoll weiter unterteilt werden und muss daher vollständig von einer Person oder einem Betriebsmittel durchgeführt werden. Bei der Erstellung des Vorranggraphen gibt es zwei Möglichkeiten des Vorgehens, die einzeln oder kombiniert angewendet werden können [REF90, S. 158f]:

- ausgehend vom letzten Teilvorgang (Endprodukt) oder
- ausgehend von den Einzelteilen zum frühesten Zeitpunkt.

In der ersten Möglichkeit werden vor dem rechts eingezeichneten letzten Teilvorgang alle weiteren Teilvorgänge vergleichbar mit der Netzplantechnik angeordnet. Der Weg gabelt sich, wenn durch Demontage zwei Baugruppen entstehen, die wiederum unabhängig voneinander demontiert werden können. Wird dieser Weg bis zum „Schluss“ bis zu allen Einzelteilen verfolgt, ergibt sich ein Vorranggraph. Dieser Vorranggraph sagt aus, zu welchem Zeitpunkt die jeweiligen Teilvorgänge *spätestens* ausgeführt sein müssen (Rückwärtsplanung). Die zweite Art der Vorranggraphen-Erstellung geht von den Einzelteilen aus. Dabei werden die Teilvorgänge bezüglich des frühest möglichen Zeitpunkts der Ausführung untersucht und von links beginnend aufgetragen. Ein solcher Vorranggraph beginnt in der Regel mit vielen parallelen Montageschritten und verjüngt sich solange, bis er in einem letzten Teilvorgang mündet (z.B. Endkontrolle durchführen). Die Kombination der beiden Vorgehen ergibt die aussagekräftigste Form, da sowohl der frühestmögliche als auch der späteste Zeitpunkt eingetragen sind. Die Differenz beider Zeitpunkte ergibt den Spielraum im Arbeitsablauf (Pufferzeit). [REF90, S. 159]

Gleichartige im Vorranggraphen eingetragene Teilvorgänge können dann zusammengefasst werden, z.B. Teilvorgänge gleicher Bearbeitungslage, Teilvorgänge zur Prüfung, nicht automatisierbare Teilvorgänge etc.

Bewertung: Die Arbeitsplanung mittels der Vorranggraphen ist weit verbreitet und wird durch viele Software-Werkzeuge unterstützt. Gerade für die Ferti-

gungsplanung von MID-Teilen mit ihren vielen Technologien und Arbeitsschritten ist sie sehr gut geeignet. Da sie auf abstraktem Niveau arbeitet, ist sie auch domänenübergreifend verständlich.

A4.2 Kapazitätsplanung mit Kapazitätsfeldern

Das Kapazitätsfeld ermöglicht die Gestaltung von Arbeitsabläufen unter Berücksichtigung der jeweils verfügbaren Kapazität der Produktionseinheiten (Personen oder Betriebsmittel). [REF90, S. 168]

Der Kapazitätsbedarf für jeden Teilvorgang ergibt sich aus dem Produkt von Bearbeitungszeit pro Stück und der herzustellenden Menge in Stück. Der Kapazitätsbedarf kann dann in einem Mengen-Zeit-Diagramm als Fläche, dem Kapazitätsfeld, dargestellt werden. Die einzelnen Teilvorgänge werden sequentiell in das Mengen-Zeit-Diagramm eingetragen. Durch die Gegenüberstellung von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsbestand in graphischer Form können dann leichter folgende Bereiche geklärt werden:

- Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine,
- Arbeitsteilung innerhalb der Technik
- Arbeitsteilung von verschiedenen Menschen.

Dazu kann die Arbeit so auf mehrere Menschen oder Maschinen verteilt werden, dass entweder jeder nur einen speziellen Teil des Gesamtablaufs (Arteilung) oder den gesamten Ablauf (Mengenteilung) ausführt. Es gibt viele Zwischenformen; dann wird von einer gemischten Kapazitätsplanung gesprochen. [REF90, S. 168f]

Bewertung: Die Kapazitätsplanung mittels Kapazitätsfeldern ist eine sehr verbreitete Methode, die durch viele Software-Werkzeuge unterstützt wird. Sie ist für die Fertigung von MID-Teilen allerdings von nachrangiger Bedeutung, da weniger die Fertigungskapazitäten als vielmehr eine hohe Automatisierbarkeit über eine günstige Fertigung entscheiden.

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 zusammenschließen, 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: Auf dem Weg zu den technischen Systemen von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in vielen Studiengängen der Universität. Hier ist das übergeordnete Ziel, den Studierenden die Kompetenzen zu vermitteln, auf die es in der Wirtschaft morgen ankommt.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut sieben Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: 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 tomorrow's economy.

Today seven Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 1 FAHRWINKEL, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 1, 1995 – ISBN 3-931466-00-0
- Bd. 2 HORNBOSTEL, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 2, 1995 – ISBN 3-931466-01-9
- Bd. 3 STEMANN, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 3, 1995 – ISBN 3-931466-02-7
- Bd. 4 KETTERER, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 4, 1995 – ISBN 3-931466-03-5
- Bd. 5 HARTMANN, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 5, 1995 – ISBN 3-931466-04-3
- Bd. 6 WACHSMANN, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, 1995 – ISBN 3-931466-05-1
- Bd. 7 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Die Szenariotechnik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 7, 1995 – ISBN 3-931466-06-X
- Bd. 8 CZUMAJ, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 8, 1995 – ISBN 3-931466-07-8
- Bd. 9 HUMPERT, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 9, 1995 – ISBN 3-931466-08-6
- Bd. 10 AMEUR, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, 1995 – ISBN 3-931466-09-4
- Bd. 11 PAUL, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 11, 1996 – ISBN 3-931466-10-8
- Bd. 12 HOLL, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, 1996 – ISBN 3-931466-11-6
- Bd. 13 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 13, 1996 – ISBN 3-931466-12-4
- Bd. 14 PETRI, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 14, 1996 – ISBN 3-931466-13-2
- Bd. 15 LESCHKA, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 15, 1996 – ISBN 3-931466-14-0
- Bd. 16 SCHNEIDER, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 16, 1996 – ISBN 3-931466-15-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 17 FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 17, 1996 – ISBN 3-931466-16-7
- Bd. 18 GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 18, 1996 – ISBN 3-931466-17-5
- Bd. 19 DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 19, 1996 – ISBN 3-931466-18-3
- Bd. 20 HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 20, 1997 – ISBN 3-931466-19-1
- Bd. 21 GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 21, 1997 – ISBN 3-931466-20-5
- Bd. 22 BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 22, 1997 – ISBN 3-931466-21-3
- Bd. 23 GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 23, 1997 – ISBN 3-931466-22-1
- Bd. 24 GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 24, 1997 – ISBN 3-931466-23-X
- Bd. 25 EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 25, 1997 – ISBN 3-931466-24-8
- Bd. 26 FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologischer neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 26, 1997 – ISBN 3-931466-25-6
- Bd. 27 DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 27, 1997 – ISBN 3-931466-26-4
- Bd. 28 BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 28 1997 – ISBN 3-931466-27-2
- Bd. 29 PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 29, 1997 – ISBN 3-931466-28-0
- Bd. 30 HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 30, 1997 – ISBN 3-931466-29-9
- Bd. 31 DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 31, 1997 – ISBN 3-931466-30-2
- Bd. 32 BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 32, 1997 – ISBN 3-931466-31-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 33 HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 33, 1997 – ISBN 3-931466-32-9
- Bd. 34 SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 34, 1997 – ISBN 3-931466-33-7
- Bd. 35 STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 35, 1997 – ISBN 3-931466-34-5
- Bd. 36 MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 36, 1998 – ISBN 3-931466-35-3
- Bd. 37 SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 37, 1998 – ISBN 3-931466-36-1
- Bd. 38 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 38, 1998 – ISBN 3-931466-37-X
- Bd. 39 GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 39, 1998 – ISBN 3-931466-38-8
- Bd. 40 REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 40, 1998 – ISBN 3-931466-39-6
- Bd. 41 DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 41, 1998 – ISBN 3-931466-40-X
- Bd. 42 KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 42, 1998 – ISBN 3-931466-41-8
- Bd. 43 TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 43, 1998 – ISBN 3-931466-42-6
- Bd. 44 GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 44, 1998 – ISBN 3-931466-43-4
- Bd. 45 wird noch vergeben!
- Bd. 46 VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 46, 1998 – ISBN 3-931466-45-0
- Bd. 47 SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 47, 1999 – ISBN 3-931466-46-9
- Bd. 48 GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 48, 1999 – ISBN 3-931466-47-7
- Bd. 49 WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 49, 1999 – ISBN 3-931466-48-5

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 50 FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 50, 1999 – ISBN 3-931466-49-3
- Bd. 51 HOLTkamp, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 51, 1999 – ISBN 3-931466-50-7
- Bd. 52 KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 52, 1999 – ISBN 3-931466-51-5
- Bd. 53 SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 53, 1999 – ISBN 3-931466-52-3
- Bd. 54 KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 54, 1999 – ISBN 3-931466-53-1
- Bd. 55 SCHÜRholz, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 55, 1999 – ISBN 3-931466-54-X
- Bd. 56 GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 56, 1999 – ISBN 3-931466-55-8
- Bd. 57 KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 57, 1999 – ISBN 3-931466-56-6
- Bd. 58 THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 58, 1999 – ISBN 3-931466-57-4
- Bd. 59 KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statorn für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 59, 1999 – ISBN 3-931466-58-2
- Bd. 60 DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 60, 1999 – ISBN 3-931466-59-0
- Bd. 61 LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 61, 1999 – ISBN 3-931466-60-4
- Bd. 62 KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 62, 1999 – ISBN 3-931466-61-2
- Bd. 63 LUKOVSKI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 63, 1999 – ISBN 3-931466-62-0
- Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 64, 1999 – ISBN 3-931466-63-9
- Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMU-net - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 65, 2000 – ISBN 3-931466-64-7

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 66, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 67, 2000 – ISBN 3-931466-66-3
- Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 68, 2000 – ISBN 3-931466-67-1
- Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine Spezifikations-sprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 69, 2000 – ISBN 3-931466-68-X
- Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 70, 2000 – ISBN 3-931466-69-8
- Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 71, 2000 – ISBN 3-931466-70-1
- Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 72, 2000 – ISBN 3-931433-71-X
- Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 73, 2000 – ISBN 3-931466-72-8
- Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 74, 2000 – ISBN 3-931466-73-6
- Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 75, 2000 – ISBN 3-931466-74-4
- Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 76, 2000 – ISBN 3-931466-75-2
- Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 77, 2000 – ISBN 3-931466-76-0
- Bd. 78 SCHEIDELER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 78, 2000 – ISBN 3-931466-77-9
- Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 79, 2000 – ISBN 3-931466-78-7
- Bd. 80 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungs-umgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 80, 2000 – ISBN 3-931466-79-5
- Bd. 81 RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Implementations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 81, 2000 – ISBN 3-931466-80-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- | | |
|---|---|
| <p>Bd. 82 GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 82, 2000 – ISBN 3-931466-81-7</p> <p>Bd. 83 DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 83, 2000 – ISBN 3-931466-82-5</p> <p>Bd. 84 SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrichtung in kooperativen Verbänden; Klassifikation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 84, 2000 – ISBN 3-931466-83-3</p> <p>Bd. 85 KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechnischen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 85, 2000 – ISBN 3-931466-84-1</p> <p>Bd. 86 BARTSCHER, T.: Methoden des Integrierten Workflowmanagements (IWFm). Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 86, 2000 – ISBN 3-931466-85-X</p> <p>Bd. 87 QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsmethode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 87, 2000 – ISBN 3-931466-86-8</p> <p>Bd. 88 PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 88, 2001 – ISBN 3-931466-87-6</p> <p>Bd. 89 wird noch vergeben!</p> | <p>Bd. 90 WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 90, 2001 – ISBN 3-931466-89-2</p> <p>Bd. 91 LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 91, 2001 – ISBN 3-935433-00-X</p> <p>Bd. 92 VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 92, 2001 – ISBN 3-935433-01-8</p> <p>Bd. 93 BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 93, 2001 – ISBN 3-935433-02-6</p> <p>Bd. 94 WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturierungsprojekten in Forschungs- und Entwicklungsorganisationen der Automobilindustrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 94, 2001 – ISBN 3-935433-03-4</p> <p>Bd. 95 WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 95, 2001 – ISBN 3-935433-04-2</p> <p>Bd. 96 HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 96, 2001 – ISBN 3-935433-05-0</p> <p>Bd. 97 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMiRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 97, 2001 – ISBN 3-935433-06-9</p> |
|---|---|

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 98 LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungs-Lenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 98, 2001 – ISBN 9-935433-07-7
- Bd. 99 BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 99, 2001 – ISBN 9-935433-08-5
- Bd. 100 WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 100, 2001 – ISBN-3-935433-09-3
- Bd. 101 HEMSEL, T.: Untersuchung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 101, 2001 – ISBN 3-935433-10-7
- Bd. 102 MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 102, 2001 – ISBN 3-935433-11-5
- Bd. 103 WAGENBLAßT, D.: Eine Analyseverfahren zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 103, 2002 – ISBN 3-935433-12-3
- Bd. 104 PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 104, 2002 – ISBN 3-935433-13-1
- Bd. 105 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 105, 2002 – ISBN 3-935433-14-X
- Bd. 106 SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 106, 2002 – ISBN 3-935433-15-8
- Bd. 107 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 107, 2002 – ISBN 3-935433-16-6
- Bd. 108 FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 108, 2002 – ISBN 3-935433-17-4
- Bd. 109 AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 109, 2002 – ISBN 3-935433-18-2
- Bd. 110 HELMKE, S.: Eine simulationsgestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 110, 2002 – ISBN 3-935433-19-0
- Bd. 111 CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 111, 2002 – ISBN 3-935433-20-4
- Bd. 112 GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdynamik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 112, 2002 – ISBN 3-935433-21-2

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 113 LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 113, 2002 – ISBN 3-935433-22-0
- Bd. 114 HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 114, 2002 – ISBN 3-935433-23-9
- Bd. 115 ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 115, 2002 – ISBN 3-935433-24-7
- Bd. 116 SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 116, 2003 – ISBN 3-935433-25-5
- Bd. 117 EL-KEBBI, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 117, 2003 – ISBN 3-935433-26-3
- Bd. 118 PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 118, 2003 – ISBN 3-935433-27-1
- Bd. 119 SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 119, 2003 – ISBN 3-935433-28-X
- Bd. 120 KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 120, 2003 – ISBN 3-935433-29-8
- Bd. 121 MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 121, 2003 – ISBN 3-935433-30-1
- Bd. 122 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 122, 2003 – ISBN 3-935433-31-X
- Bd. 123 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 123, 2003 – ISBN 3-935433-32-8
- Bd. 124 LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 124, 2003 – ISBN 3-935433-33-6
- Bd. 125 WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 125, 2003 – ISBN 3-935433-34-4
- Bd. 126 HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 126, 2003 – ISBN 3-935433-35-2
- Bd. 127 WITKOWSKI, U.: Einbettung selbstorganisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 127, 2003 – ISBN 3-935433-36-0
- Bd. 128 BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 128, 2003 – ISBN 3-935433-37-9

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 129 HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 129, 2003 – ISBN 3-935433-38-7
- Bd. 130 KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 130, 2003 – ISBN 3-935433-39-5
- Bd. 131 KEIL-SLAWIK, R.; BRENNECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 131, 2003 – ISBN 3-935433-40-9
- Bd. 132 OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 132, 2003 – ISBN 3-935433-41-7
- Bd. 133 HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 133, 2003 – ISBN 3-935433-42-5
- Bd. 134 UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 134, 2003 – ISBN 3-935433-43-3
- Bd. 135 BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplatzierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 135, 2003 – ISBN 3-935433-44-1
- Bd. 136 FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 136, 2003 – ISBN 3-935433-45-X
- Bd. 137 KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 137, 2004 – ISBN 3-935433-46-8
- Bd. 138 STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wandervellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 138, 2004 – ISBN 3-935433-47-6
- Bd. 139 KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 139, 2004 – ISBN 3-935433-48-4
- Bd. 140 ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 140, 2004 – ISBN 3-935433-49-2
- Bd. 141 BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 141, 2004 – ISBN 3-935433-50-6
- Bd. 142 BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 142, 2004 – ISBN 3-935433-51-4
- Bd. 143 KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 143, 2004 – ISBN 3-935433-52-2
- Bd. 144 HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 144, 2004 – ISBN 3-935433-53-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 145 GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 145, 2004 – ISBN 3-935433-54-9
- Bd. 146 LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 146, 2004 – ISBN 3-935433-55-7
- Bd. 147 HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 147, 2004 – ISBN 3-935433-56-5
- Bd. 148 BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 148, 2004 – ISBN 3-935433-57-3
- Bd. 149 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 149, 2004 – ISBN 3-935433-58-1
- Bd. 150 MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 150, 2004 – ISBN 3-935433-59-X
- Bd. 151 GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 151, 2004 – ISBN 3-9354 33-60-3
- Bd. 152 FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 152, 2004 – ISBN 3-935433-61-1
- Bd. 153 SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 153, 2004 – ISBN 3-935433-62-X
- Bd. 154 RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 154, 2004 – ISBN 3-935433-63-8
- Bd. 155 FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 155, 2004 – ISBN 3-935433-64-6
- Bd. 156 MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 156, 2004 – ISBN 3-935433-65-4
- Bd. 157 FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 157, 2004 – ISBN 3-935433-66-2
- Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 158, 2004 – ISBN 3-935433-67-0
- Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 159, 2004 – ISBN 3-935433-68-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 160, 2004 – ISBN 3-935433-69-7
- Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 161, 2005 – ISBN 3-935433-70-0
- Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 162, 2005 – ISBN 3-935433-71-9
- Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 163, 2005 – ISBN 3-935433-72-7
- Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 164, 2005 – ISBN 3-935433-73-5
- Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 165, 2005 – ISBN 3-935433-74-3
- Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 166, 2005 – ISBN 3-935433-75-1
- Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 167, 2005 – ISBN 3-935433-76-X
- Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 168, 2005 – ISBN 3-935433-77-8
- Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 167, 2005 – ISBN 3-935433-78-6
- Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 170, 2005 – ISBN 3-935433-79-4
- Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 171, 2005 – ISBN 3-935433-80-8
- Bd. 172 MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 172, 2005 – ISBN 3-935433-81-6
- Bd. 173 KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 173, 2005 – ISBN 3-935433-82-4
- Bd. 174 BALÁŽOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 174, 2005 – ISBN 3-935433-83-2
- Bd. 175 FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 175, 2005 – ISBN 3-935433-84-0

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 176 BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 176, 2005 – ISBN 3-935433-85-9
- Bd. 177 BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive – Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 177, 2005 – ISBN 3-935433-86-7
- Bd. 178 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 178, 2005 – ISBN 3-935433-87-5
- Bd. 179 FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 179, 2005 – ISBN 3-935433-88-3
- Bd. 180 WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 180, 2005 – ISBN 3-935433-89-1
- Bd. 181 MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 181, 2006 – ISBN 3-939350-00-1
- Bd. 182 HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 182, 2006 – ISBN 3-939350-01-X
- Bd. 183 PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 183, 2006 – ISBN 3-939350-02-8
- Bd. 184 BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenariotechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 184, 2006 – ISBN 3-939350-03-6
- Bd. 185 KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 185, 2006 – ISBN 3-939350-04-4
- Bd. 186 KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 186, 2006 – ISBN 3-939350-05-2
- Bd. 187 WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 187, 2006 – ISBN 3-939350-06-0
- Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 188, 2006 – ISBN 3-939350-07-9
- Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 189, 2006 – ISBN 3-939350-08-7
- Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 190, 2006 – ISBN 3-939350-09-5
- Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 191, 2006 – ISBN 3-939350-10-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 192, 2006 – ISBN 3-939350-11-7
- Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 193, 2006 – ISBN 3-939350-12-5
- Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 194, 2006 – ISBN 3-939350-13-3
- Bd. 195 KUHLE, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 195, 2006 – ISBN 3-939350-14-1
- Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 196, 2006 – ISBN 3-939350-15-X
- Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 197, 2006 – ISBN 3-939350-16-8
- Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhausen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 198, 2006 – ISBN 3-939350-17-6
- Bd. 199 FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssoftwaresysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 199, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7
- Bd. 200 SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 200, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4
- Bd. 201 KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 201, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0
- Bd. 202 HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 202, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7
- Bd. 203 RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 203, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4
- Bd. 204 SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 204, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1
- Bd. 205 IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 205, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 206 ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 206, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5
- Bd. 207 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 207, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2
- Bd. 208 LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 208, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9
- Bd. 209 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 209, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6
- Bd. 210 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 210, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3
- Bd. 211 KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 211, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9
- Bd. 212 DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 212, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6
- Bd. 213 DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 213, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3
- Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 214, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0
- Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 215, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7
- Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMiRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 216, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4
- Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 217, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1
- Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 218, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8
- Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 219, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5
- Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architekturkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produktpräsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 220, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 221, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8
- Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project "Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)", Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 222, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5
- Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 223, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2
- Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 224, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9
- Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 225, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6
- Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 226, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3
- Bd. 227 ZEIDLER, C.: Systematik der Materialflussplanung in der frühen Phase der Produktionssystementwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 227, 2008 – ISBN 978-3-939350-46-0
- Bd. 228 PARISI, S.: A Method for the intelligent Authoring of 3D Animations for Training and Maintenance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 228, 2008 – ISBN 978-3-939350-47-7
- Bd. 229 DITTMANN, F.: Methods to Exploit Reconfigurable Fabrics. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 229, 2008 – ISBN 978-3-939350-48-4
- Bd. 230 TONIGOLD, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 230, 2008 – ISBN 978-3-939350-49-1
- Bd. 231 BRANDT, T.: A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 231, 2008 – ISBN 978-3-939350-50-7
- Bd. 232 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 232, 2008 – ISBN 978-3-939350-51-4
- Bd. 233 CHANG, H.: A Methodology for the Identification of Technology Indicators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 233, 2008 – ISBN 978-3-939350-52-1
- Bd. 234 ADEL, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PODLOGAR, H.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 234, 2008 – ISBN 978-3-939350-53-8

Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 235 DELL'AERE, A.; HIRSCH, M.; KLÖPPER, B.; KOESTER, M.; KRÜGER, M.; KRUPP, A.; MÜLLER, T.; OBERTHÜR, S.; POOK, S.; PRIESTERJAHN, C.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SONDERMANN-WÖLKE, C.; TICHY, M.; VÖCKING, H.; ZIMMER, D.: Verlässlichkeit selbstoptimierender Systeme – Potenziale nutzen und Risiken vermeiden. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 235, 2008 – ISBN 978-3-939350-54-5
- Bd. 236 GEHRKE, M.; GIESE, H.; STROOP J.: Proceedings of the 4th Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER4), Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 236, 2008 – ISBN 978-3-939350-55-2
- Bd. 237 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 4. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 30. und 31. Oktober 2008, Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 237, 2008 – ISBN 978-3-939350-56-9
- Bd. 238 BRÖKELMANN, M.: Entwicklung einer Methodik zur Online-Qualitätsüberwachung des Ultraschall-Drahtbondprozesses mittels integrierter Mikrosensorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 238, 2008 – ISBN 978-3-939350-57-6
- Bd. 239 KETTELHOIT, B.: Architektur und Entwurf dynamisch rekonfigurierbarer FPGA-Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 239, 2008 – ISBN 978-3-939350-58-3
- Bd. 240 ZAMBALDI, M.: Concepts for the development of a generic Multi-Level Test Bench covering different areas of applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 240, 2008 – ISBN 978-3-939350-59-0
- Bd. 241 OBERSCHELP, O.: Strukturierter Entwurf selbstoptimierender mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 241, 2009 – ISBN 978-3-939350-60-6
- Bd. 242 STOLLT, G.: Verfahren zur strukturierten Vorausschau in globalen Umfeldern produzierender Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 242, 2009 – ISBN 978-3-939350-61-3
- Bd. 243 WENZELMANN, C.: Methode zur zukunftsorientierten Entwicklung und Umsetzung von Strategieoptionen unter Berücksichtigung des antizipierten Wettbewerbsverhaltens. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 243, 2009 – ISBN 978-3-939350-62-0
- Bd. 244 BRÜSEKE, U.: Einsatz der Bibliometrie für das Technologiemanagement. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 244, 2009 – ISBN 978-3-939350-63-7
- Bd. 245 TIMM, T.: Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 245, 2009 – ISBN 978-3-939350-64-4
- Bd. 246 GRIESE, B.: Adaptive Echtzeitkommunikationsnetze. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 246, 2009 – ISBN 978-3-939350-65-1
- Bd. 247 NIEMANN, J.-C.: Ressourceneffiziente Schaltungstechnik eingebetteter Parallelrechner. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 247, 2009 – ISBN 978-3-939350-66-8