



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Robert Watty

Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik

Bericht Nr. 533

Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von
Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Robert Watty
geboren in Düsseldorf

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

Tag der Einreichung: 11.05.06

Tag der mündlichen Prüfung: 10.11.06

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2006

D 93

ISBN-10: 3-922823-62-9

ISBN-13: 978-3-922823-62-9

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart. Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz danke ich herzlich für die Betreuung der vorliegenden Arbeit und für die stets gute Zusammenarbeit. Sein immer offenes Ohr, seine wertvollen Anregungen und seine großzügige Unterstützung haben entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Diese Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Zeitmess-technik, Fein- und Mikrotechnik (IZFM). Prof. Dr. rer. nat. H. Kück, dem Leiter des IZFM, danke ich herzlich für die Übernahme des Mitberichts, die umfassende Unterstützung und die Möglichkeit, in seinem Institut aktuelles Wissen aus der Mikrosystemtechnik sammeln zu können. Stellvertretend für die hilfsbereite und kompetente Unterstützung durch die Mitarbeiter des Institutes möchte ich besonders Dr.-Ing. Daniel Warkentin für viele hilfreiche Diskussionen und die intensive fachliche Durchsicht des Manuskriptes danken.

Dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses, Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, gilt mein Dank für die Übernahme dieser Aufgabe. Bei Dipl.-Ing. Martin Blacha und Dipl.-Ing. Stephan Schmitz bedanke ich mich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes, bei meinen Studien- und Diplomarbeitern Jorge Lopez, MSc, Dipl.-Ing. Birgit Rüth, cand.-Ing. Jiaxin Liu und Dipl.-Ing. Markus Wagner für die Unterstützung bei der Erprobung der Methodik.

Besonderer Dank gilt allen Personen in meinem persönlichen Umfeld, die mir über die letzten Jahre oft den Rücken freigehalten und damit diese Arbeit ermöglicht haben. Meine Partnerin Dipl.-Ing. Annika Götz hat mit Geduld und Verständnis für manchen langen Abend die Erstellung dieser Dissertation begleitet. Meiner Mutter Adelinde Watty danke ich von Herzen, dass sie mir meine Ausbildung ermöglicht und meinen Weg immer unterstützt hat.

Stuttgart, im November 2006

Robert Watty

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	VII
Abstract	IX
1 Einleitung	1
1.1 Definitionen und Abgrenzung der Arbeit	2
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	6
1.3 Wissenschaftliche Einordnung und Struktur der Arbeit.....	8
2 Aktueller Stand der Mikrosystemtechnik (MST)	13
2.1 Eigenschaften von Mikrosystemen	13
2.2 Markt für Produkte der Mikrosystemtechnik	24
2.3 Besonderheiten der Entwicklung von Mikrosystemen.....	28
2.4 Aktueller Stand der Vorgehensweise bei der Entwicklung	33
2.5 Folgerungen für diese Arbeit.....	41
3 Anforderungen an die Entwicklung in der MST	43
4 Bestehende Methodiken	49
4.1 Allgemeine Lösungsprozesse.....	50
4.2 Entwicklungsmethodiken im Maschinenbau	51
4.3 Entwicklungsmethodiken der Elektrotechnik	59
4.4 Entwicklungsmethodiken der Mechatronik und anderer Bereiche.....	67
4.5 Entwicklungsmethodiken der Softwaretechnik	72
4.6 Zusammenfassung der Bewertung	77
5 Eine Methodik für die Mikrosystemtechnik	79
5.1 Grundsätzlicher Aufbau	79
5.2 Vorgehensmodell.....	80
5.3 Entwicklungsablauf.....	91

5.4	Sichten auf den Gesamtablauf.....	92
5.5	Darstellung der Vorgehensweise	96
6	Methodenunterstützung.....	99
6.1	Allgemeine Methoden	100
6.2	Ermittlung von Anforderungen	101
6.3	Sammlung physikalischer Effekte	105
6.4	Konstruktionskataloge	106
6.5	Auswahlmatrix für Material und Herstellungstechnologie	107
6.6	Wirkstruktur	109
6.7	Fertigungsgerechte Gestaltung	118
7	Evaluation - Einsatzbeispiele und Befragung	121
7.1	Anwendung in Projekten.....	121
7.1.1	Entwicklung eines Neigungssensors	122
7.1.2	Entwicklung eines Drehwinkelsensors	123
7.1.3	Entwicklung eines Luftmassensensors.....	124
7.2	Evaluierung mit Industrieunternehmen	125
8	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literatur.....	133
	Anhang	149
A.1	Beispiel eines Entwicklungsprozesses	149
A.2	Qualitätssicht auf den Entwicklungsprozess	173
A.3	Hauptmerkmalsleitlinie für Sensoren.....	175
A.4	Erweiterte Anforderungsliste mit Ausfüllanleitung	176
A.5	Beispiele für Gestaltungsregeln für MID-Bauelemente	177
A.6	Teilergebnisse zur Entwicklung des Neigungssensors	180
A.7	Teilergebnisse zur Entwicklung eines Drehwinkelsensors	184
A.8	Beschreibung und Fragen zur Evaluierung	187
A.9	Evaluation Harting Mitronics AG	189

A.10 Evaluation Festo AG & Co. KG	191
A.11 Evaluation Boehringer Ingelheim microparts GmbH	193
A.12 Evaluation Unternehmen X	195

Abkürzungen

Zeichen Bedeutung

ASIC	Application specific integrated circuit
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CVD	Chemical Vapour Deposition
DSM	Design Structure Matrix
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
LIGA	Lithographie-Galvanoformung-Abformung
MEMS	Micro-Electro-Mechanical-Systems
MID	Moulded Interconnect Device
MST	Mikrosystemtechnik
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVD	Physical Vapour Deposition
QFD	Quality Function Deployment
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

Abstract

Introduction

Right from the beginning, a few decades ago, MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) technology was regarded as a worldwide key technology with enormous potential for the 21st century. The market for MEMS has grown around 20% per year over the last decade and MEMS products are meanwhile used in various fields, e. g. in the automation, automotive or bio-medical sector, to enhance conventional applications or to open new areas of technology. MST (Micro-Systems-Technology) allows the production of such systems with extreme mechanical precision and high repetition accuracy.

The placement of new innovative products on these markets requires a large investment in research and development as well as a systematic organisation of both product development and production chain to accelerate the process from the start of development to the market introduction of MEMS. Therefore it is important to master the actual challenges for the industry: the trend towards globalisation, growing complexity of both products and processes, the need for knowledge and experience management, increasing commercial pressures and the request for sustainable products.

Up to now structured development processes for MEMS are not common practice due to the novelty of products and manufacturing technologies. Only a few systematic procedures are known but not established and the exchange of knowledge of development proceedings is reduced. Products are often based on brilliant ideas without a systematic approach. Continuous improvement to support a shorter development time is often not applied sufficiently. Experience in other disciplines, e. g. mechanical, electrical or software engineering, has shown that a well structured development process allows the exploitation of the wide possibilities of MEMS, the organization of knowledge for further developments and the development of marketable products with a high reliability.

The main target of this thesis is to close this gap by supplying designer in practice with a methodology for the development of innovative MEMS products. Fur-

thermore the development procedure is supplemented by methods to assist the designer in dealing with the main challenges of MEMS development.

Emphases of the thesis

This thesis focuses upon four areas: An analysis of the actual state and requirements of MEMS technology, a comparison of methodologies in other areas, the suggestion of a new approach to MEMS design and the provision of supporting methods.

Actual state of MEMS technology

MEMS technology deals with the integration of diverse micro technologies in complex and highly integrated systems under continuously developing boundary conditions. Successful development of MEMS demands a customised and rapid development process and requires attention to their special characteristics: essential cooperation of experts of various fields, a wide range of manufacturing technologies and technology-driven development.

The field of MEMS was developed by adapting microelectronic manufacturing technologies and is still immature. MEMS technology integrates several domains, e. g. micromechanics, microelectronics or microoptics, in small package dimensions and therefore demands interdisciplinary cooperation of experts of diverse disciplines. MEMS products are produced in a wide range of technologies and processes usually based on silicon or plastic. Materials and manufacturing technologies are continuously improving. The close interdependence between product and production technologies asks domain experts to acquire both technological and design process knowledge to become MEMS experts. Furthermore they have to keep up with actual technological changes much more than in traditional disciplines. This requires lifelong learning far beyond continuing training in other disciplines to keep an actual level of knowledge, because designers have to observe their own and neighbouring domains throughout their professional life.

Interrelations and interactions in highly complex MEMS must be considered in an appropriate way. An extensive study of MEMS design emphasises the need for guidelines for geometry, manufacturing and materials as well as assistance

in the understanding of the entire system. The actual state and the needs of MEMS technology lead to requirements to a methodology for MEMS design.

Methodologies in other areas

Methodologies for product development are common in diverse disciplines. An analysis of methodologies in mechanical engineering, electronics, software engineering, control engineering and mechatronics shows that the approach of the VDI-guideline 2206 for mechatronics comprises a suitable basis for a MEMS development process.

A Methodology for MEMS Design

The MEMS development process suggested in this thesis is shown in Figure 1.

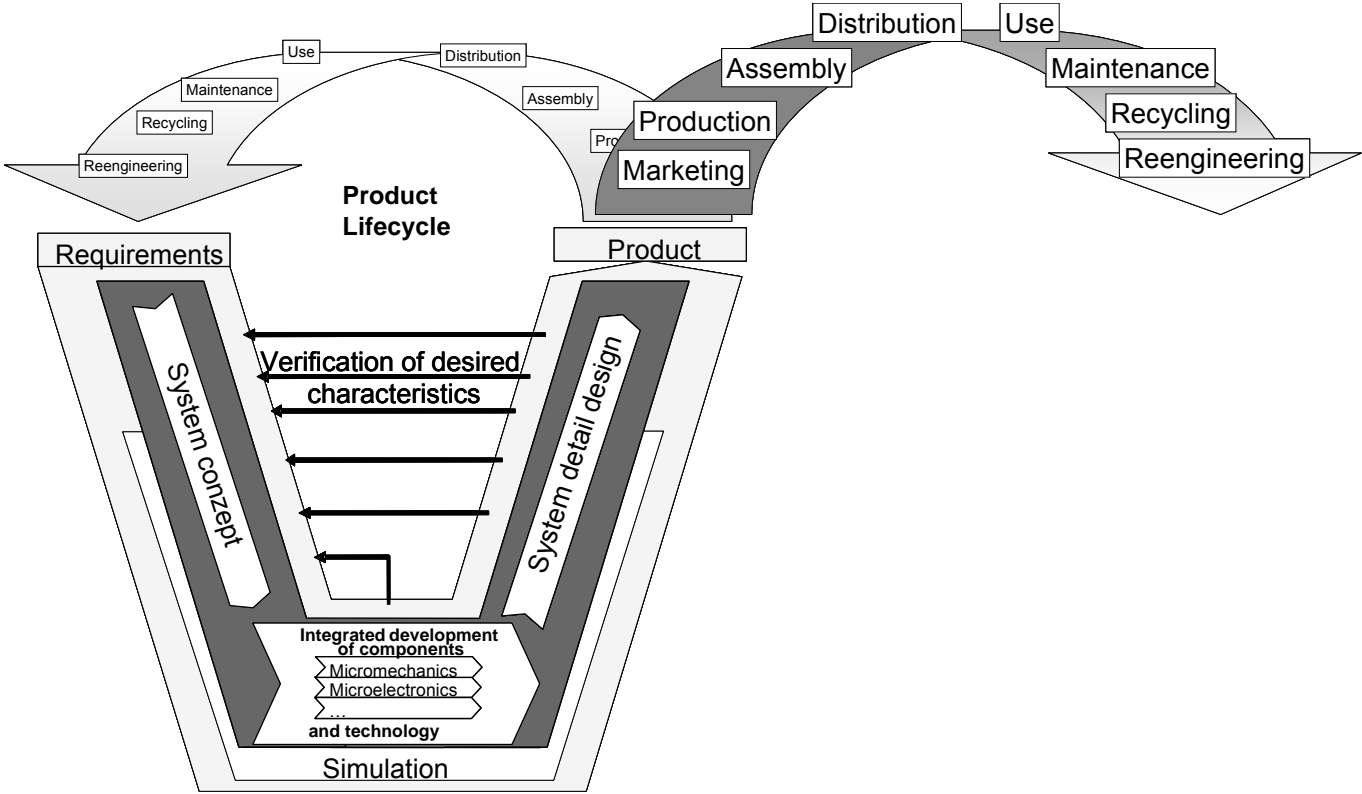


Figure 1: Suggested MEMS development process

This general development process starts with the generation of an interdisciplinary system concept. It is continued by the most important part of MEMS development that differs significantly from other domains: a parallel development of the systems components in diverse domains and the manufacturing technology.

A proper development procedure in this phase is fundamental to avoid parasitic interactions between the elements of the system and its environment. The concluding system integration verifies the desired characteristics of the product.

The development process is embedded in the product lifecycle to incorporate knowledge and demands from different stages of the product's life. Simulation as early as possible helps to predict the properties of the system and supports both integration and supply of efficient technology.

A well-defined and continuous MEMS development process like the classic process for mechanical tasks is often not possible. It is disturbed by the fast-changing environment and the simultaneous development of the manufacturing technology. The development process is therefore characterised by iterations. The consideration of parasitic influences and the simulation of the system and its components at an early stage is one way of forecast of properties and prevention of iterations. The described general process must be precisely specified and adapted for the demands of specific product developments.

Supporting Methods

The development process can be supported by many methods used in other disciplines. Moreover methods are useful in the potential weak points of MEMS design: The collection and preparation of knowledge in continuously developing conditions and the handling of internal and external interactions of the system's components and its surroundings.

The first task can be solved by systematic supply of information about physical effects, design catalogues and regularly updated guidelines about geometry, manufacturing limits and materials. The examination of the entire system and the consideration of aspects of system integration can be achieved through the use of a newly developed working structure and a corresponding Design Structure Matrices (DSM). Both methods clarify the dependencies between the components of the system and therefore enable the designer to regard all influences and to be sure to gather all information from diverse domains influencing the design process.

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik ist eine relativ junge Disziplin, die aufgrund ihres schier unbegrenzten Anwendungspotenzials vielfach als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gesehen wird [VDI94, VÖLKLEIN00, S. 4, UVM05, S. 8]. Das riesige Potenzial für Forschung und Industrie in zahlreichen Branchen [SMM03, S. 35, BERLINNEWS99] hat immense Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur Folge. Weltweit gesehen nimmt Deutschland hinter den USA eine Spitzenposition in der Mikrosystemtechnik ein, traditionell besonders bei der Entwicklung neuer, hochwertiger Produkte und der Bereitstellung von Herstellungstechnologien [SALOMON05, S. 42].

Der Markt für Mikrosysteme ist geprägt von starkem Wandel, zunehmender Handels- bzw. Käufermacht und sich schnell ändernden Markt- und Kundenforderungen. Dadurch und durch den Markteintritt neuer Industrieländer erhöht sich der Druck auf Kosten, Qualität und Entwicklungszeiten stetig.

Aufgrund der Neuheit sowohl der Produkt- als auch der Herstellungstechnologien kann nicht auf breite Erfahrungen vergangener Entwicklungen zurückgegriffen werden. Die Entwicklungsabläufe sind bisher nicht standardisiert und auch zu wenig strukturiert und erprobt, so dass eine systematische Vorgehensweise, insbesondere in den frühen Phasen der Entwicklung, bisher teilweise unterbleibt. Einige Ansätze sind bekannt, haben sich aber nicht durchgesetzt [Kasper00; MEHNER00]; auch ein Wissensaustausch zur Vorgehensweise bei der Entwicklung findet nur in geringem Maße statt.

In diesem turbulenten Umfeld gewinnt die kurzfristige und schnelle Reaktion auf neue Anforderungen zunehmend an Bedeutung. Um die Produktentwicklungszeit zu senken, ist es notwendig, Entwicklungsprozesse zu parallelisieren und zu integrieren und bereits zu einem frühen Zeitpunkt alternative Technologieketten zur Fertigung eines Produktes aufzuzeigen [EVERSHEIM00, S. 32]. Eine enge Kooperation der beteiligten Bereiche der Unternehmen und die effiziente Nutzung des technologischen Wissens wird immer mehr zu einem wirtschaftlichen Überlebensfaktor und einer Kernkompetenz der Unternehmen [SMM03, S. 36].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen daher eine Entwicklungsmethodik mit speziell angepassten Entwicklungsmethoden erarbeitet werden, um die Entwickler in der Mikrosystemtechnik zu unterstützen. Als flexibler Leitfaden soll diese Methodik dazu beitragen, Abläufe effektiver zu gestalten und Fehler möglichst frühzeitig zu entdecken bzw. zu vermeiden.

1.1 Definitionen und Abgrenzung der Arbeit

Die Begriffe „Mikrosystemtechnik“ und „Methodik“ werden in sehr vielen und verschiedenen Zusammenhängen verwendet. Daher ist eine eindeutige Definition und Abgrenzung des Themas notwendig, um eine klare Zielsetzung für diese Arbeit zu ermöglichen.

Der Begriff „**Mikro**“ (v. griech. „mikros (μικρός)“ für „klein“ [BROCKHAUS99]) wird im Deutschen als Wortbildungselement oder Vorsilbe mit der Bedeutung klein..., gering... oder fein... verwendet. Auch im Begriff „Mikrosystem“ steht „Mikro“ für die geometrische Größe des Systems. Die Abmessungen der Komponenten von Mikrosystemen liegen in mindestens einer geometrischen Dimension im Mikrometerbereich [μm], also bei ca. 0,1 bis 100 μm [MESCHEDER00, S. 3], Bild 1.1. Damit werden die Dimensionen von Leiterplatten deutlich unterboten und einzelne Bauelemente wie z. B. mikromechanische Balken oder fluidische Strömungskanäle erreichen zum Teil die Größenordnungen von Strukturen auf Siliziumchips. Erkennbar ist in Bild 1.1 auch, dass mit dem Erreichen der Auflösungsgrenze sichtbaren Lichts auch hohe Anforderungen an die Herstellungstechnologien gestellt werden.

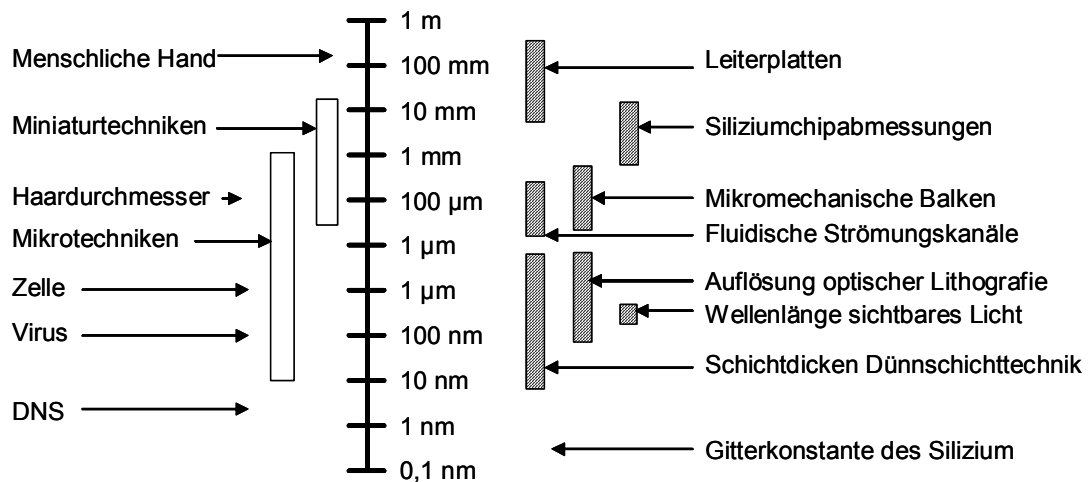


Bild 1.1: Größenbereich der Mikrosystemtechnik, nach [GERLACH97, S. 12]

Die Dimensionen von Mikrosystemen sind eine Größenordnung kleiner als Miniatursysteme der Feinwerktechnik und erst recht viel kleiner als „Makrosysteme“ (von griech. makros: groß, weit, lang [BROCKHAUS99]), die z. B. im Maschinenbau entwickelt werden. Die Grenze zwischen „Mikro“ und „Makro“ ist in der Technik nicht klar definiert. Im Bereich der mechanischen Systeme überschneiden sich beispielsweise Maschinenbau, Feinwerktechnik und Mikrosystemtechnik. Zur klaren Abgrenzung sollen für diese Arbeit Systeme dann als Mikrosysteme betrachtet werden, wenn für die Funktion wesentliche Elemente mindestens in einer Dimension Abmessungen unter $100\ \mu\text{m}$ haben. Systeme mit größeren Abmessungen werden als Makrosysteme bezeichnet.

Der Begriff des „**Systems**“ (griech. Systema, Σύστημα) bezeichnet ein aus mehreren Teilen zusammengesetztes gegliedertes Ganzes [BROCKHAUS99]. Die Definitionen technischer Systeme sind vielfältig:

- „Gesamtheit geordneter Elemente, z. B. Funktionen oder technische Gebilde, die aufgrund ihrer Eigenschaften durch Relationen verknüpft und durch eine Systemgrenze umgeben sind.“ [PAHL03, S. 751]
- “a set of interacting components having well-defined behavior or purpose (MIT)”, [MAGEE02, S. 2].

- “Gesamtheit der zur selbständigen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes erforderlichen technischen und / oder organisatorischen und / oder anderen Mittel der obersten Betrachtungsebene.“ [DIN40150, S. 1]

Nach gängiger Sichtweise der Experten reicht die bloße Miniaturisierung bisher makroskopischer Komponenten nicht aus, um zu einem Mikrosystem zu gelangen. Entscheidend für die Ausschöpfung des Potenzials der Mikrosystemtechnik ist der Systemansatz, der durch

- Miniaturisierung, einhergehend mit Verringerung der Größe, Masse und des Energiebedarfs,
- Integration verschiedener Disziplinen auf engstem Raum,
- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Integration, Vermeidung von Störeinflüssen, Reduzierung der Anzahl von Schnittstellen, Bauelementen, elektrischen Kontakten und Leitungen sowie hoher Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses und
- Kosten- und Materialeinsparung durch Einsatz kostengünstiger Massenfertigung mit auf das Produkt abgestimmter Herstellungstechnologie und Integration von Funktionen in wenigen Bauelementen

gekennzeichnet ist [VÖLKLEIN00, S. 4 f.; JOHNSTONE04, S. 2 f.].

Der Begriff „Mikrosystemtechnik“ wurde Ende der achtziger Jahre vom VDI / VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH geprägt. Er etablierte sich rasch, obwohl sich die Fachleute bis heute nicht einig sind, wie er korrekt zu definieren sei.

Eine gängige Definition für **Mikrosysteme** stammt vom Bundesministerium für Forschung und Technologie aus dem Jahr 1994: „Werden Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft, dass sie »empfinden«, »entscheiden« und »reagieren« können, so spricht man von einem Mikrosystem.“ [MSTONLINE05A]

Genormt ist der Begriff „Mikrosystem“ in [DIN32564, S. 4] als „miniaturisierte Einheit, welche durch hybride oder monolithische Integration mehrere Mikro-

komponenten und / oder Funktionseinheiten enthält.“, wobei die Mikrokomponenten mechanische, optische, opto-elektronische, fluidische und weitere, z. B. chemische Funktionen erfüllen [DIN32564, S. 3].

Die Mikrosystem**technik** befasst sich mit dem Entwurf, der Herstellung und der Applikation solcher Systeme [KASPER00, S. 5], [GERLACH97, S. 12]. Eine umfassende Definition der Mikrosystemtechnik wird in [REICHL94, S. 1] bereitgestellt: „Die Mikrosystemtechnik umfasst den Entwurf, die Herstellung und Anwendung von technischen Systemen, welche unterschiedliche Funktionen integrieren. Die Funktionseinheiten stehen in enger Wechselwirkung miteinander und ihre funktionsbedingten geometrischen Strukturgrößen liegen typischerweise im Bereich von Millimetern bis herab zu Mikrometern. Im Mikrosystem treten Funktionen auf, die durch nichtelektrische Parameter gekennzeichnet sind. Wesentliches Kriterium für den Entwurf von Mikrosystemen ist die Optimierung der Gesamtfunktion. Dies ist von Vorteil hinsichtlich des technologischen Aufwands, da nicht unbedingt die Teilfunktionen für sich optimiert werden müssen. Da aber die Wechselwirkung zwischen den Parametern selbst Funktionscharakter hat, ist die Funktion eines Mikrosystems mehr als die Summe der Funktionen der Teilkomponenten.“

In der internationalen Literatur werden Mikrosysteme gleichbedeutend auch als MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) bezeichnet [KASPER00, S. 5].

Der Begriff „**Methodik**“ (v. griech. methodike: Kunst des planmäßigen Vorgehens [BROCKHAUS99]) ist definiert als ein System von zusammengehörigen Modellen, Methoden und Hilfsmitteln zur Lösung einer theoretischen und/oder praktischen Aufgabenstellung [NEUHAUSEN01, S. 6]. Diese Definition leitet sich aus den Erklärungsansätzen von Laufenberg [LAUFENBERG95] und Heyn [HEYN98] ab, die den Begriff Methodik aus der gewachsenen historischen Bedeutung anderer Fachgebiete auf die Anwendungsgebiete ingenieurwissenschaftlicher Fragestellungen übertragen haben. In der fachspezifischen Literatur zur Mikrosystemtechnik wird mit „Methodik“ oder „methodischer Produktentwicklung“ oft der Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen für den Entwurf von Mikrosystemen bezeichnet [z. B. ANTONSSON96].

Für die vorliegende Arbeit werden beide Begriffe weiter gefasst: „Produktentwicklung“ umfasst die gesamten Tätigkeiten vom ersten Erkennen des Bedarfs für ein Produkt bis hin zum Anlauf der Serienproduktion. Die Produktentwicklung beginnt also keinesfalls mit der ersten Produktidee im Sinne eines Lösungsansatzes, sondern bereits vor den frühesten Ansätzen zur Lösung eines erkannten Bedarfes oder einer auftretenden Problemstellung. Gerade in der Mikrosystemtechnik umfasst sie oft auch die parallele Ausgestaltung der Herstellungsmöglichkeiten bis hin zur Serienfertigung, endet also nicht, wie in anderen Bereichen üblich, mit einer Übergabe des konstruierten Produktes an einen Planungsbereich der Fertigung. Eine „Methodik“ stellt für diesen gesamten Produktentwicklungsablauf eine Vorgehensweise bereit, indem sie Vorschläge für Arbeitsschritte und ihre Reihenfolge macht. Die (Herstellung-)Prozessentwicklung ist dabei nicht direkt Bestandteil dieses Ablaufs, aber technologische Aspekte müssen, stärker als im Makrobereich, intensiv mitbetrachtet werden.

Die Bedeutung des Begriffs **Methode** stammt aus dem Griechischen (méthodos) und lautet sinngemäß „Weg zu etwas hin“. Eine Methode ist ein „zielgerichtetes, planmäßiges Vorgehen bzw. Verfahren zur Erlangung von (wissenschaftlichen) Erkenntnissen oder praktischen Ergebnissen“ [BROCKHAUS99]. Eine Methode im technisch / naturwissenschaftlichen Sinne besteht aus einer systematischen Vorgehensweise zur Erlangung von Ergebnissen und Erreichung von Zielen und soll den Entwickler bei der Bearbeitung von Arbeitsschritten oder Aufgaben im Rahmen der Produktentwicklung unterstützen. „Sie erfordert Eingaben und besteht aus Regeln, einem Vorgehen, Modellen, Rollen und Hilfsmitteln“ [DOBBERKAU02, S. 16].

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Forschung und die Entwicklung neuer Produkte und Herstellungstechnologien in der Mikrosystemtechnik erfordern hohe Investitionen. Der Entwicklungsablauf mikrosystemtechnischer Produkte ist bisher wenig strukturiert, Bild 1.2. Nur vereinzelt gibt es strukturierte methodische Entwicklungsprozesse in Unternehmen, die aber stark firmenspezifisch ausgerichtet sind. Da sie aber nicht publiziert oder in breiterem Kreis diskutiert werden, gibt es bisher keine allgemein verwendeten strukturierten oder ausgereiften Entwicklungsprozesse

[KLAUBERT98, S. 29]. Damit besteht die Gefahr, dass Produkte nicht systematisch entwickelt werden, weil den Entwicklern benötigte Informationen fehlen, sondern auf zufälligen Ideen basierende Lösungen mit mangelnder Flexibilität für andere Anwendungsgebiete geschaffen werden.

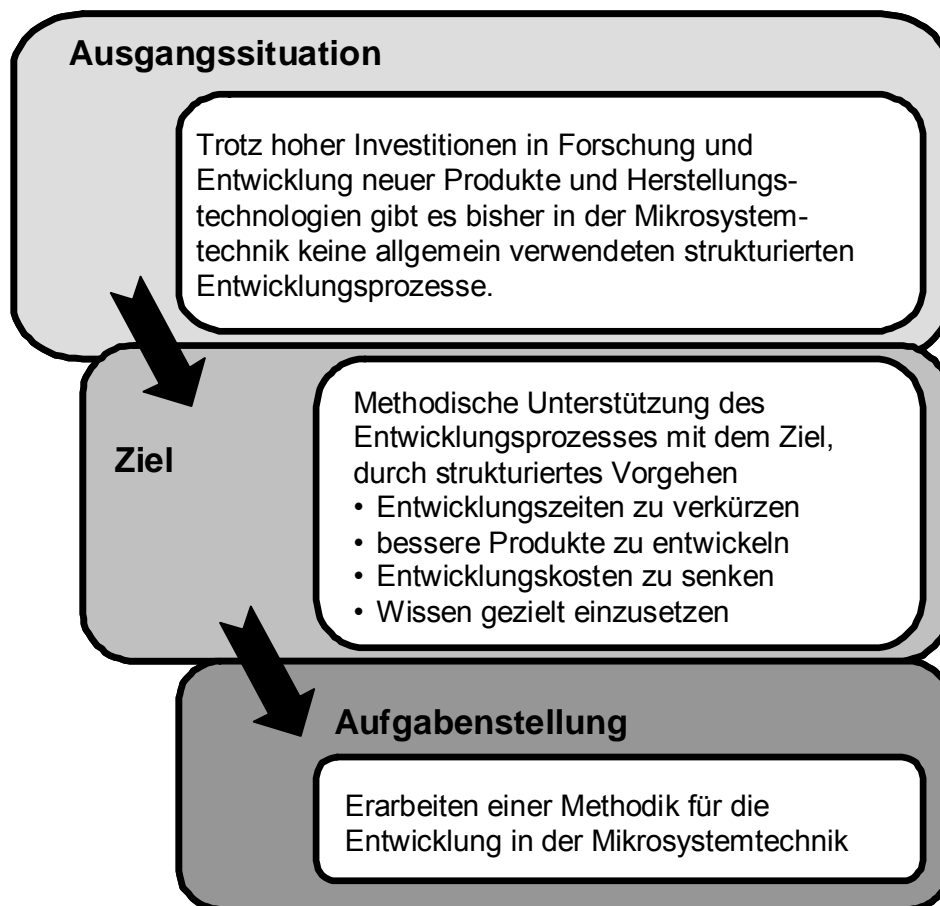


Bild 1.2: Ausgangssituation, Ziel und Aufgabenstellung

Um diese Situation zu verbessern, ist es Ziel dieser Arbeit, einen allgemeinen methodischen Entwicklungsprozess zu erarbeiten, um ein strukturiertes Vorgehen bei der Entwicklung zu unterstützen. So können durch Vermeidung unnötiger Iterationen Entwicklungszeiten eingespart werden, um bei geringerem Ressourceneinsatz qualitativ hochwertige Produkte zu entwickeln. Eine gezielte Speicherung des dabei erworbenen Wissens ermöglicht, es auf folgende Entwicklungsaufgaben zu übertragen und damit wiederverwendbar zu machen.

Wie in Bild 1.2 dargestellt, besteht die Aufgabenstellung darin, eine Methodik bereitzustellen, die einen systematischen Entwicklungsablauf für anforderungsgerechte mikrosystemtechnische Produkte unterstützt. Diese Methodik soll so

flexibel sein, dass sie die Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben in den zum Teil sehr unterschiedlichen Anwendungsgebieten und für die verwendeten verschiedenartigen Herstellungstechnologien abdeckt. Da diese Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zeitmesstechnik, Fein- und Mikrotechnik (IZFM) der Universität Stuttgart und in Kontakt mit einer Reihe von Unternehmen entstand, deren Produkte zum Teil auf der MID (Moulded Interconnected Devices)-Technik basieren, entstammen viele Beispiele diesem Bereich. Methodik und Methoden sind aber mit entsprechenden Modifikationen genauso für andere Herstellungstechnologien und Anwendungsbereiche einsetzbar.

1.3 Wissenschaftliche Einordnung und Struktur der Arbeit

Nach der gängigen Einteilung in der Wissenschaftstheorie ist diese Arbeit dem Bereich der „angewandten Realwissenschaften“ zuzuordnen [ULRICH76, S. 305], Bild 1.3.

Ziel der Realwissenschaften ist es, subjektiv wahrgenommene Ausschnitte der Wirklichkeit präzise zu beschreiben, zu generalisieren und letztlich Handlungsalternativen zu ihrer Gestaltung zu entwerfen [ULRICH76, S. 306]. Als Teilbereiche der Realwissenschaften unterscheiden sich die angewandten Wissenschaften von den Grundlagenwissenschaften durch das Streben nach Regeln und Modellen zur Schaffung neuer Realitäten und die Ausrichtung auf aus der Praxis erwachsende Problemstellungen [ULRICH81, S. 10 ff.].

Für angewandte Wissenschaften, zu denen neben den Ingenieurwissenschaften auch die Betriebswirtschaft gehört, steht die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zwecks Gestaltung sozialer und technischer Systeme im Vordergrund [ULRICH01, S. 45 ff.].

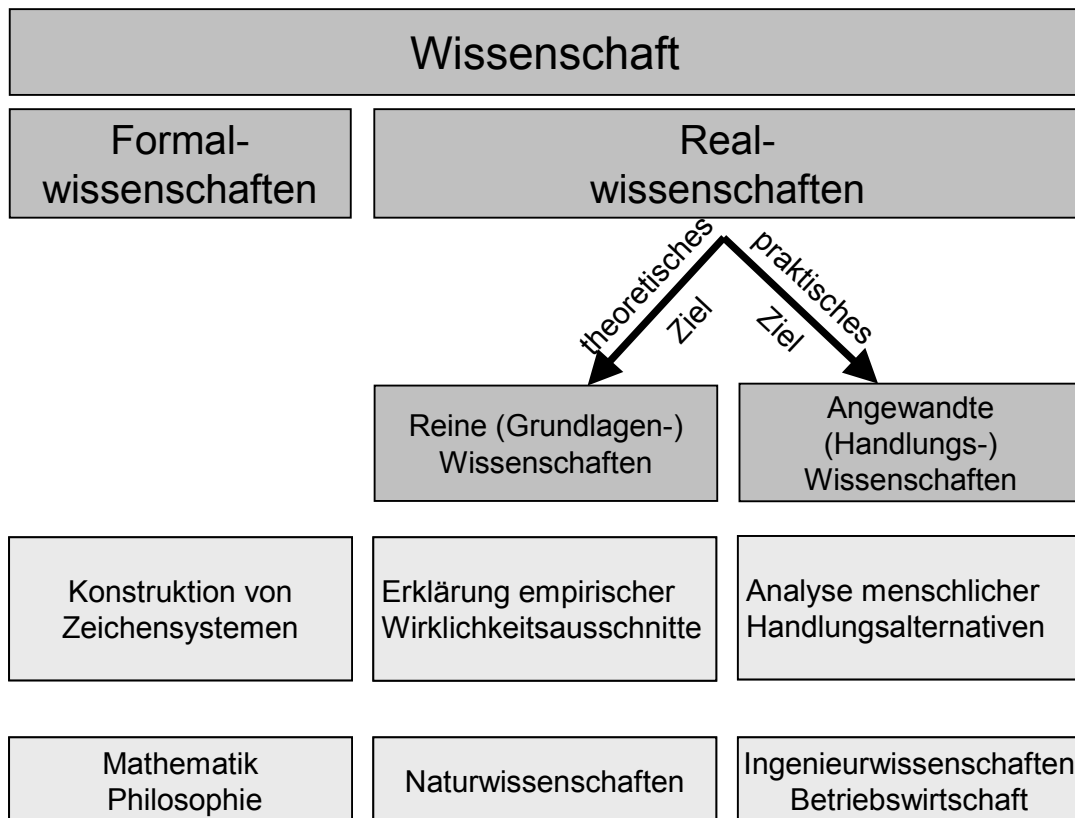


Bild 1.3: Wissenschaftssystematik [nach ULRICH76, S. 305; RAFFÉE79, S. 163]

Durch die Beschränkung auf wesentliche Bestandteile und die Vorgabe von Verhaltensregeln werden die Handlungsmöglichkeiten im Rahmen des sehr komplexen Systems „Forschung und Entwicklung“ auf wesentliche Systemänderungen eingeschränkt. Dadurch wird vernünftiges praktisches Handeln erst möglich gemacht [ULRICH81, S. 14 f.]. Ziel angewandter Wissenschaften ist es, Gestaltungsempfehlungen zu geben [MARTIN89, S. 242], d. h. Verhaltensweisen zu ermöglichen, die durch aus der Wissenschaft übernommenes Wissen fundiert werden [ULRICH01, S. 221].

Das Vorgehen in dieser Arbeit orientiert sich an der von Ulrich vorgeschlagenen Strategie der Forschung [ULRICH81, S. 19 f.; ULRICH01, S. 222], Bild 1.4.

Dabei beruht die Arbeit auf einer induktiv-empirischen Vorgehensweise auf Grundlage von Analysen von Fallbeispielen aus der Literatur, Expertengesprächen mit Entwicklern aus Industrie und Hochschule sowie hochschulinternen Projektdokumentationen.

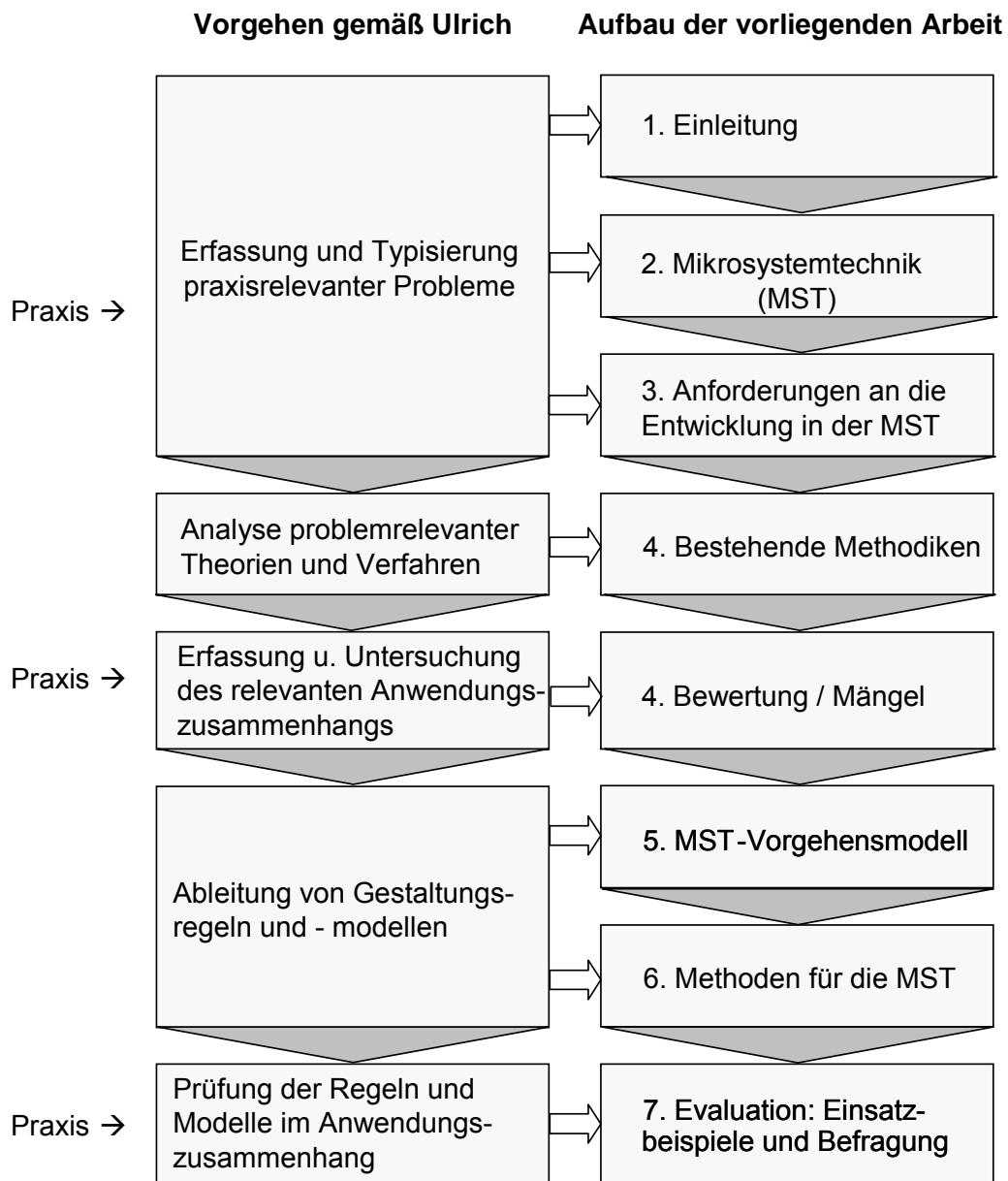


Bild 1.4: Struktur der vorliegenden Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden die relevanten Probleme in der Praxis erfasst und typisiert. Um ein einheitliches Begriffsverständnis zu gewährleisten, werden in der **Einleitung** zunächst die relevanten Begriffe geklärt und definiert und die Zielsetzung der Arbeit erarbeitet (Kapitel 1).

Die praxisrelevanten Probleme und **Besonderheiten der Mikrosystemtechnik** werden erfasst, gegenüber den Merkmalen der Entwicklung in verwandten Disziplinen der Technik abgegrenzt (Kapitel 2) und daraus der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

Sich ergebende **Anforderungen an die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik** und damit an die Methodik werden in Kapitel 3 erläutert.

Auf dieser Basis werden die **bestehenden Entwicklungsmethodiken** in verwandten Disziplinen, wie z. B. dem Maschinenbau, der Elektrotechnik oder der Informatik, auf ihre Eignung zur Lösung der Probleme untersucht und bezüglich ihrer Übertragbarkeit bewertet (Kapitel 4). Dadurch werden problemrelevante Verfahren analysiert gegebenenfalls bei der Entwicklung der Methodik auf die Mikrosystemtechnik übertragen bzw. in die Methodik integriert werden.

Darauf aufbauend wird ein grundlegendes **Vorgehensmodell** einer Methodik für die Mikrosystemtechnik entwickelt (Kapitel 5). Dieses Modell soll den Entwicklungsprozess in den Gesamtzusammenhang der Entwicklung einordnen und die grundlegende systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung darstellen.

Neben der Vorgehensweise müssen auch **Methoden für die Mikrosystemtechnik** entwickelt werden, die den Entwickler bei der Lösung von für die Mikrosystemtechnik typischen Problemen unterstützen (Kapitel 6).

Durch eine **Evaluation** wird die Methodik anhand von Praxisbeispielen und Befragungen überprüft und verifiziert (Kapitel 7).

Im Ausblick werden weiterführende Fragestellungen, die aus den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit resultieren, erläutert (Kapitel 8).

2 Aktueller Stand der Mikrosystemtechnik (MST)

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts fand eine rasante Entwicklung von rein mechanischen Systemen hin zu Systemen mit einer Kombination aus Mechanik, Elektronik und Informationstechnik statt, für die in Japan 1969 der Begriff „Mechatronik“ geprägt wurde [ISERMANN03, S. 4]. Die konsequente Weiterführung dieser Entwicklung durch stetige Verkleinerung und Integration weiterer Technologien führte zur Mikrosystemtechnik, die sich darüber hinaus durch spezielle, neuartige Herstellungstechnologien auszeichnet [ISERMANN03, S. 9].

Der Begriff „Mikrosystem“ wurde ursprünglich in der Mikroelektronik für die Kombination mehrerer integrierter Schaltungen zu einem komplexen System verwendet. Die Mikroelektronik befasst sich mit rein elektronischen Bauelementen, deren zweidimensionale Struktur in der Regel voll automatisiert entworfen wird. Ein erster Schritt in die dritte Dimension wurde mit der Verwendung einer Siliziumscheibe mit integrierten Piezowiderständen als mechanische Deformationskörper 1962 beschrieben [TUFTTE62, S. 3322]. Im Jahr 1966 wurde eine erste Anwendung in einem „Resonant Gate Transistor“ entwickelt, der einen geätzten Biegebalken aus Silizium verwendet [NEWELL66, S. 62 f.].

In den frühen 1980er Jahren entstanden erste konkrete Anwendungen für Mikrosysteme, die über die reine Mikroelektronik immer mehr hinausgingen, z. B. magnetische Festplatten für Computer, und damit erste Definitionen, in denen Mikrosysteme als Kombination von Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren aufgefasst wurden [BERGER05, S. 6].

2.1 Eigenschaften von Mikrosystemen

Struktur und Aufbau von Mikrosystemen

Die Struktur von Mikrosystemen ist in Bild 2.1 dargestellt. Das System ist in seine Umgebung eingebunden und erfasst diese mit Sensoren, die nichtelektrische, z. B. thermische, optische oder biologische Größen, meist in elektrische Größen umwandeln.

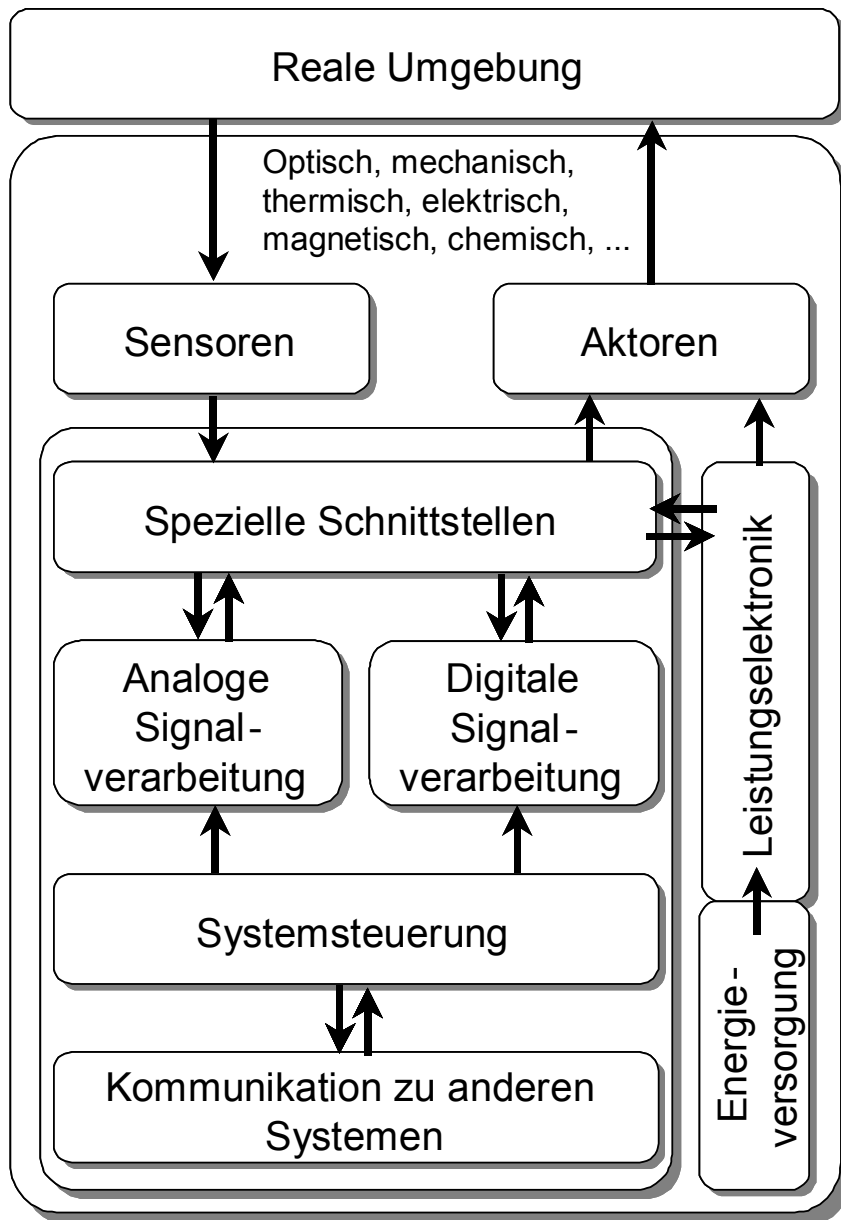


Bild 2.1: Struktur von Mikrosystemen [aufbauend auf STORK03, S. 10]

Durch parallele Verarbeitung mehrerer Sensoren, eine dezentrale Signalverarbeitung oder eine Filterung von Störgrößen werden die Daten aufbereitet und der Signalverarbeitung zugeführt. Diese zentrale Einheit kann z. B. Daten statistisch bewerten, einen Selbsttest des Systems durchführen oder den Datenaustausch mit anderen Systemen steuern. Hauptproblem kann dabei die Verarbeitung großer Datenmengen in Echtzeit sein. Auch Aktoren werden aufbauend auf der Signalverarbeitung angesteuert. Aktoren haben die Aufgabe, in der Regel elektrische Größen in nichtelektrische Größen umzuwandeln und auf die Systemumgebung einzuwirken. Dies geschieht z. B. mit piezoelektrischen oder elektro-

statischen Kräften, aber auch in Form von optischen und thermischen Ausgangsgrößen [STORK03, S. 10 ff.].

Zusätzlich müssen neben geeigneten Funktionsprinzipien auch leistungsfähige Materialien, Technologien und Entwurfssysteme zur Verfügung stehen, die eine ausreichende Systemfähigkeit und Integrierbarkeit aufweisen. Die integrierte Erfüllung von elektrischen und nichtelektrischen Subfunktionen auf einem Chip oder Substrat ermöglicht und steigert die Leistungsfähigkeit von Mikrosystemen und sichert ihre Anwendbarkeit in allen Bereichen der Technik und des täglichen Lebens.

Bild 2.2 zeigt beispielhaft den prinzipiellen Aufbau eines Mikrosystems auf Siliziumbasis. Die Basis des dargestellten Systems bildet ein Substrat, das aus Silizium besteht und bereits mit integrierten z. B. mechanischen oder elektrischen Strukturen versehen ist. Auf diesem Substrat sind z. B. elektronische oder optische Komponenten unter Ausnutzung verschiedener Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) montiert und kontaktiert. Zum Schutz vor der Umgebung ist das System meist von einem Gehäuse umgeben.

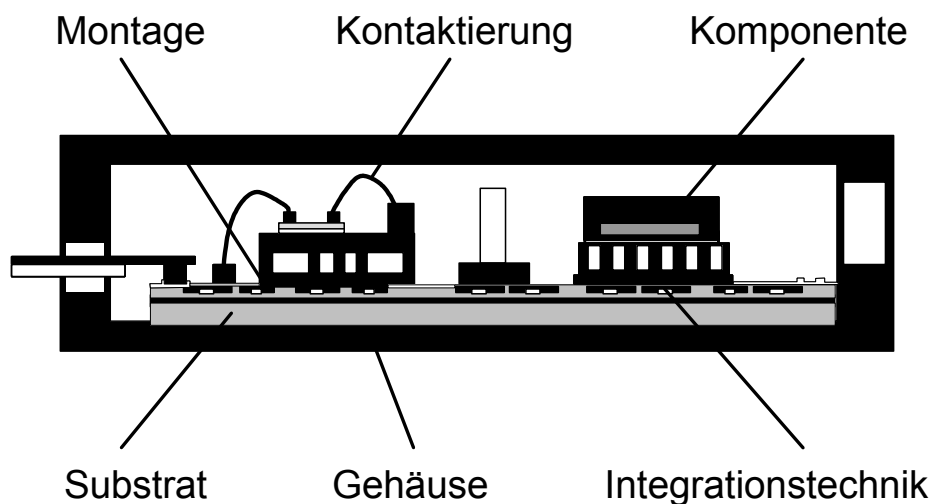


Bild 2.2: Aufbau eines Mikrosystems [REICHL04]

Eine charakteristische Eigenschaft von Mikrosystemen ist die große Anzahl von Komponenten aus verschiedensten Disziplinen, die in Bild 2.3 dargestellt sind. Neben mikromechanischen, mikroelektronischen, mikroakustischen, mikrooptischen und mikrofluidischen Komponenten werden auch Bauelemente und Effekte aus der Mikrobiologie und Mikrochemie auf engstem Raum integriert.

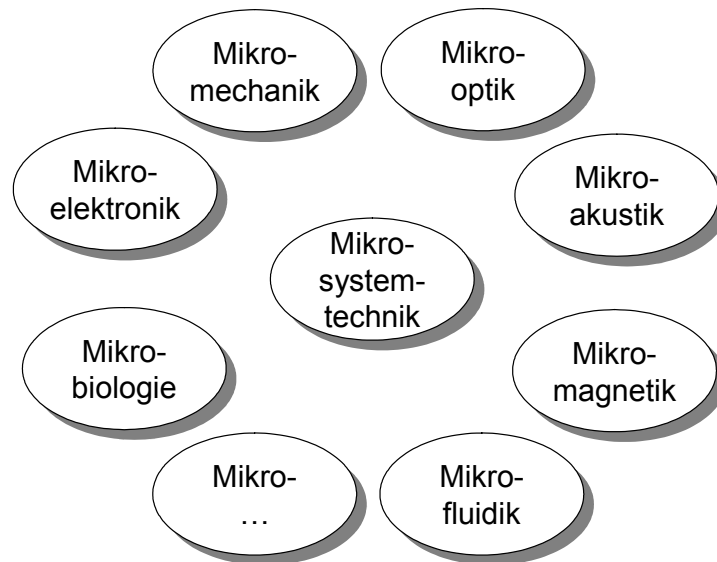


Bild 2.3: Disziplinen in der Mikrosystemtechnik [nach LANG98, GERLACH97, S. 12]

Mikrosysteme sind daher komplexe Systeme [KASPER00, S. 32]. Das bedeutet, dass sie aus vielfältigen Komponenten zusammengesetzt sind, die so verbunden sind und interagieren, dass der Zusammenhang komplex zu beschreiben, zu verstehen, vorherzusagen, handzuhaben, zu konstruieren oder zu ändern ist [MAGEE02, S. 2].

So basiert beispielsweise die Messzelle des in Bild 2.4 dargestellten Drucksensors aus einem Siliziumchip, in den eine dünne Membran mit einer Kantenlänge von 1 mm eingätzt ist. Durch den Druck wird die Membran verformt und eine mechanische Spannung aufgebaut. Diese wird über die Widerstandsänderung nach dem piezoresistiven Effekt in ein elektrisches Signal gewandelt. Über die Anordnung von Widerständen auf der Membran zu einer Wheatstonschen Brücke kann eine Spannungsänderung für die weitere Verarbeitung auf dem Chip erreicht werden. Die Integration von Mechanik und Elektronik auf engstem Raum auf dem Chip bzw. der Membran kann zu Problemen führen, wenn sich unerwünschte Wechselwirkungen und Störgrößen ergeben.

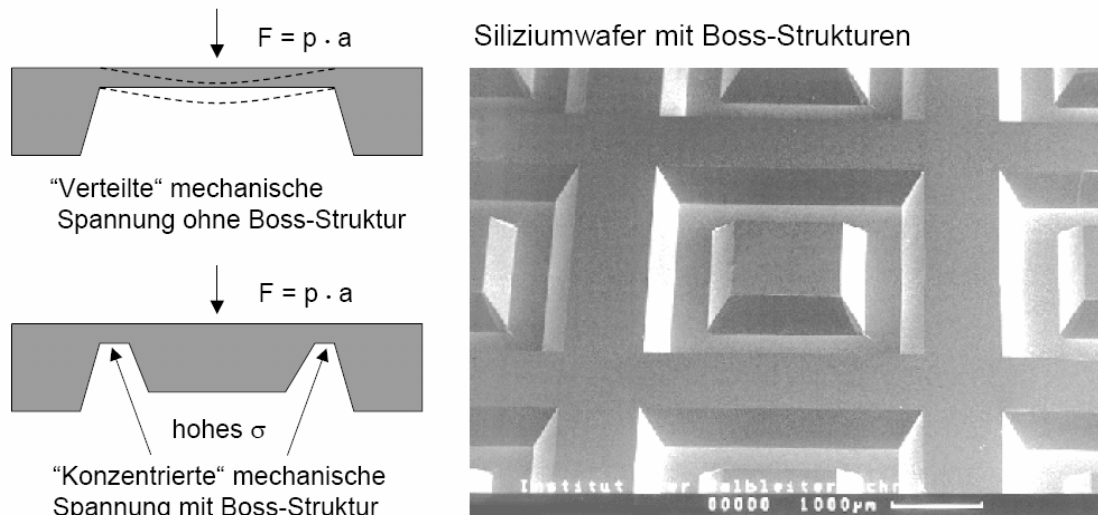


Bild 2.4: Struktur eines piezoresistiven Drucksensors [KÜCK05A]

Die Entwicklung solcher Systeme erfordert daher eine enge Zusammenarbeit von Experten verschiedenster Wissensgebiete in der Produktentwicklung. Diese müssen je nach Anwendungsbereich um weitere Spezialisten ergänzt werden, z. B. um Mediziner, Biologen oder Pharmakologen in der Medizintechnik. Unterschiedliche Begriffswelten und Denkstrukturen z. B. von Ingenieuren und Ärzten erschweren die Zusammenarbeit [LINDEMANN03, S. 104].

Vorteile gegenüber konventionellen Systemen

Mikrosysteme bieten eine ganze Reihe von wirtschaftlichen und technischen Vorteilen gegenüber konventionellen Alternativen, die vor allem in der Verkleinerung unterschiedlicher Funktionseinheiten und ihrer Integration zu einem Gesamtsystem bestehen. Die dezentrale Aufnahme und (Vor-)Verarbeitung von Messdaten erhöht die Störungssicherheit, während innerhalb eines Sensors durch kürzere Leiterbahnen und weniger Verbindungsstellen die Zuverlässigkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht werden [STORK03, S. 15; MAREK06; JOHNSTONE04, S. 2]. Wartung und Austausch einer zentralen Einheit für die Verarbeitung von Messwerten mehrerer Sensoren und Aktoren in einem größeren System können erleichtert werden, weil z. B. für Funktionsänderungen nur eine zentrale Software ausgetauscht werden muss. Wartung und Reparaturen an mikrotechnischer Hardware sind praktisch nicht möglich.

Die geringen Abmessungen der Objekte in der Mikrosystemtechnik erlauben einerseits die Unterbringung vieler, auch verschiedener, Elemente auf kleinstem Raum (Integration), andererseits erzeugt sie vollkommen neue technische Möglichkeiten und Eigenschaften der miniaturisierten Produkte (z. B. Frequenzverhalten, Trägheit, Energieverbrauch). Die Steigerung dieser Integrationsdichte unter zumindest Beibehaltung von Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit ist Basis und Motivation für Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik [VDI94, Vorwort; GERLACH97, S. 16].

Die Materialersparnis ist, insbesondere bei teuren Werkstoffen, ein weiterer Vorteil. Die Anwendung von Massenfertigungsverfahren ermöglicht die Herstellung von großen Stückzahlen zu geringen Preisen und erschließt zusammen mit niedrigem Energieverbrauch viele neue Anwendungsgebiete [MENZ05; MAREK06].

Effekte der Miniaturisierung

Die verkleinerten Dimensionen von Mikrosystemen haben unmittelbare Auswirkungen auf zwei Bereiche: die Herstellungsverfahren und die verwendeten Wirkprinzipien [PAGEL01, S. 1]. Die Miniaturisierung von technischen Systemen („Scaling down“) kann daher nicht durch einfache maßstäbliche Verkleinerung erfolgen. Im Gegensatz zur geometrischen Ähnlichkeit ist die physikalische Ähnlichkeit nur dann gegeben, wenn die betrachteten Größen für jede Größenart in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen [Pagel01, S. 3]. Bei der Miniaturisierung müssen die Strukturen an die Herstellungstechnologien angepasst werden. Darüber hinaus ändern sich insbesondere die Verhältnisse von z. B. physikalischen Wirkungen erheblich. Dies führt dazu, dass trotz gleicher physikalischer Gesetze wie in der Makrowelt die Funktionsprinzipien technischer Systeme bei Verkleinerung nicht mehr funktionieren [Pagel01, S. 2]. So beruhen beispielsweise im Makrobereich Antriebe auf magnetischen Kräften. Durch die nichtlineare Skalierung der Magnetkräfte bei Verkleinerung [WALTER04, S. 49; JOHNSTONE04, S. 48 f.] sind diese Kräfte für Antriebe im Mikrobereich zu gering. Andererseits sind elektrostatische Kräfte im Mikrobereich für Antriebe nutzbar [ARNOLD03], während sie im Makrobereich zu gering sind. Für eine funktionserhaltende Verkleinerung sind also entsprechende Skalierungsfaktoren oder Ähnlichkeitskennzahlen heranzuziehen, wie sie in der Literatur [PAGEL01, S. 25 ff.,

Kasper00, S. 20 ff.] beschrieben werden, und das Funktionsprinzip muss gegebenenfalls geändert werden.

Probleme der Miniaturisierung

Bei einer starken Miniaturisierung ändern sich die physikalischen Eigenschaften von Bauelementen. Mit einfacher Verkleinerung ergeben sich Grenzen, an denen neue Technologien und Verfahren entwickelt und andere physikalische Effekte genutzt werden müssen [DETTNER99, S. 523]. Diese Eigenschaft von Mikrosystemen hat Einfluss auf zahlreiche Anwendungsgebiete.

Schon bei rein mechanischen Bauelementen ist es nicht ausreichend, diese einfach als miniaturisierte Ausführungen konventioneller Bauelemente auszuführen [FUJIMASA96, S. 11 ff.]. So dürfen z. B. miniaturisierte Getriebe nur minimale Verlustmomente aufweisen und erfordern deshalb neuartige Lösungen für Verzahnungen, Lagerungen und eingesetzte Funktionsprinzipien [DEGEN01, S. 758]. Bei Wärmekraftmaschinen steigt die Leistungsdichte im Mikrobereich [PAGELO1, S. 77].

Ein größeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen verbessert die Wärmeabfuhr, und mechanische Eigenschaften eines Systems ändern sich, weil die spezifische mechanische Steifigkeit in kleineren Dimensionen zunimmt [ROTH91, S. 6]. Adhäsionskräfte können im Mikrobereich dominant werden [PAGELO1, S. 29] und führen zu Problemen unter anderem bei der Handhabung von Miniaturbauelementen. Elektromagnetische Effekte ermöglichen zwar elektrostatische Mikroantriebe, führen aber auch zu Schmierungsproblemen [CHAPMAN01, S. 1981], unerwünschten Durchbiegungen [GILBERT95, S. 122] und anderen unerwünschten Nebeneffekten.

Aufgrund der angestrebten Volumenreduktion entstehen Probleme durch parasitäre Kopplungen, die bei konventionellen Systemen zweitrangig sind. Sie werden in der Regel durch Querempfindlichkeiten der verwendeten Komponenten und Materialien verursacht und hängen wesentlich von der Signalart und der relativen Anordnung der Komponenten ab [EIERMANN94, S. 12; KASPER94, S. 163 f.; KOHL94, S. 155 ff., GERLACH97, S. 64]. So wird mit steigender Integrationsdichte und zunehmender Signalverarbeitungsgeschwindigkeit das dynamische Verhalten einzelner Komponenten und des gesamten Systems durch elektrische Leitungen stark beeinflusst. Neben diesen inneren elektromagnetischen Effekten treten auch Störungen durch elektromagnetische Effekte außerhalb des Mikrosystems auf. Beide unerwünschten elektromagnetischen Wechselwirkungen

können zu Beeinträchtigungen der Systemfunktion bis hin zum Systemausfall führen. Umgekehrt können auch elektromagnetische Quellen innerhalb des Systems für die Umgebung unerwünscht sein [SCHRAGE94, S. 58].

Die engen Wechselwirkungen der Funktionseinheiten eines Mikrosystems haben Auswirkungen auf die Funktion. Diese Einflüsse treten meist in Form von Temperatur, Druck, elektrischen und mechanischen Spannungen sowie elektrischen Strömen auf. Da auch die Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen eines Mikrosystems Funktionscharakter haben, ist die Funktion eines Mikrosystems mehr als die Summe der Funktionen der Teilkomponenten. So besteht zwar ein funktionsfähiges System aus funktionierenden Komponenten. Andererseits kann ein global optimiertes System auch aus nicht optimalen Subsystemen und Komponenten bestehen, wenn z. B. Abweichungen in den Komponenten durch die Signalverarbeitung kompensiert werden. Daher kommt der Optimierung der Gesamtfunktion über die Verbesserung der Teilfunktionen hinaus besondere Bedeutung zu [MÜLLER-GLASER94, S. 30].

Mit zunehmender Vielfalt und Anzahl zu integrierender Subkomponenten steigt auch die Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten bezüglich Partitionierung des Systems, Aufteilung zwischen Hard- und Software, Auswahl der Komponenten, Signalverarbeitung, Systemintegration etc. Parallel dazu erhöht sich auch die Zahl möglicher Fehlentscheidungen bei der Entwicklung und die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Fehlern kommt, welche die Funktion des Gesamtsystems beeinträchtigen. Die Kosten für die Behebung solcher Fehler steigen mit jeder Entwicklungsstufe, so dass ihre Vermeidung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt wichtig ist [EIERMANN94, S 12].

Materialien

In der Mikrosystemtechnik wird ein breites Spektrum an Materialien eingesetzt. Eine Auswahl an Werkstoffen ist in Tabelle 2.1 in relevante Materialgruppen eingeteilt.

Halbleiter	Si, Poly-Si, GaAs, SiC, Diamant
Dielektrische Werkstoffe	SiO ₂ (Quarz), Si ₃ N ₄ , PSG, Al ₂ O ₃
Gläser	Borosilikatglas, Glaslote, Li-Al-Silikatglas, Quarzglas
Magnetische Materialien	AlNiCo, SmCo, Ferrite, Weichmagnete
Keramiken	Al ₂ O ₃ , AlN, PZT, α -SiO ₂ , LiNbO ₃
Kunststoffe	Polyimid, PMMA, Epoxyd, LCP
Chemische Materialien	Flüssig-, Festelektrolyte, Metalloxide, organ. Verbindungen, opt. Indikatoren
Biologische Materialien	Enzyme, Proteine, biol. Trägermaterialien, Mikroorganismen
Piezelektrische Materialien	SiO ₂ , PZT, ZnO, Si, Ge, GaAs

Tabelle 2.1: Beispiele für relevante Materialien [KÜCK05A, VDI94, S. 121; GERLACH97, S. 17 ff.; VÖLKLEIN00, S. 13 ff.]

Der Einsatz von Gläsern und Halbleitermaterialien ermöglicht die Verwendung von weit entwickelten Fertigungsverfahren aus der Mikroelektronik [PICHLER96, S. 547 f.], die Integration von elektrischen und anderen funktionalen Komponenten in einem Bauelement und eine Vielzahl von Effekten zur Verknüpfung elektrischer und nichtelektrischer Signale. Aus diesem Grund hat besonders Silizium in der Mikrosystemtechnik einen hohen Stellenwert [VÖLKLEIN00, S. 14 f.; GERLACH97, S. 28 f., PETERSEN82, S. 420]. Silizium dient insbesondere als Substratmaterial und Grundmaterial für Schichtaufbauten auf der ChipEbene. Die sehr gut erforschte Silizium-Technologie bietet neben hoher Verfügbarkeit und hoher Qualität bei günstigem Preis die Möglichkeit der Integration von Mechanik und Elektronik auf einem Chip („monolithische Integration“). Silizium ermöglicht

die Variation seiner elektrischen Eigenschaften, hat gute mechanische Eigenschaften (z. B. elastisches Verhalten bis 600 °C, geringe Dichte) und erlaubt die dreidimensionale Strukturierung durch Ätzverfahren. Es gibt keinen Halbleiter mit ähnlich günstigen Eigenschaften [TRÄNKLER98, S. 172].

Zur Herstellung von Funktionsschichten wird eine Reihe von Werkstoffen verwendet, um Maskierschichten (z. B. Cr, Au, SiO₂, Si₃N₄), Passivierschichten (z. B. SiO₂, Si₃N₄, SiON, Polyimid), dielektrische (z. B. SiO₂) oder auch optische Schichten (z. B. ZnO, SiON) zu erzeugen.

Quarz eignet sich aufgrund seiner piezoelektrischen Eigenschaften besonders für den Aufbau elektrisch-mechanischer Wandler [GERLACH97, S. 30] und ebenso wie Gläser wegen geringer elektrischer und thermischer Leitfähigkeit als isolierendes Trägersubstrat [FISCHER00, S. 171].

Auch Keramiken werden zur Nutzung ihrer Hochtemperaturbeständigkeit, geringer Dichte, geringer Wärmeausdehnung, guter elektrischer Isolation und hoher Härte oft als Trägersubstrat eingesetzt [VÖLKLEIN00, S. 23; MENZ01, S. 84]. Dies gilt insbesondere dann, wenn in nachfolgenden Prozessschritten höhere Temperaturen angewendet werden [GERLACH97, S. 32].

Kunststoffe finden in der Mikrosystemtechnik in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Sie werden für Gehäuse, Umhüllungen und Abdeckungen, aber auch, insbesondere in der MID-Technik, als Strukturträger verwendet. Die MID-Technik erlaubt eine kostengünstige Herstellung von Bauelementen, deren Form wegen der zugrunde liegenden Spritzgusstechnik sehr vielfältig sein kann.

Herstellungsverfahren

Die Herstellverfahren für Makrosysteme sind grundsätzlich nicht einfach auf Mikrosysteme übertragbar. Für Mikrosysteme sind eigene Herstellverfahren erforderlich, die auf modifizierten Verfahren für Makrosysteme (wie z. B. Miniaturspritzgießen, Miniaturfräsen, Funkenerosion [UHLMANN01, S. 733 ff.]) beruhen, aus anderen Bereichen abgeleitet sind (Mikroelektronik) oder speziell für die Mikrosystemtechnik entwickelt werden. Ständige Weiterentwicklung und zunehmende Miniaturisierung der Mikrosysteme erfordern eine kontinuierliche Anpassung oder Neuentwicklung von Herstellungstechnologien. Da die Produktent-

wicklung parallel zu dieser Technologieentwicklung geschieht, ergeben sich wechselseitige Abhängigkeiten und Einflüsse.

Aufgrund der zahlreichen in der Mikrosystemtechnik eingesetzten Werkstoffgruppen werden vielfältige Fertigungsverfahren eingesetzt, Bild 2.5, die in der gängigen Literatur ausführlich beschrieben sind [GERLACH97, S. 37 ff.; VÖLKLEIN00, S. 8 ff.; FISCHER00, S. 39 ff.; MENZ01, S. 109 ff.; KÜCK05A; KÜCK05B]. In vielen Fällen werden die Fertigungsverfahren auch kombiniert, um ein Mikrosystem herzustellen. Die Fertigungsverfahren eignen sich in der Regel hauptsächlich für hohe Stückzahlen.

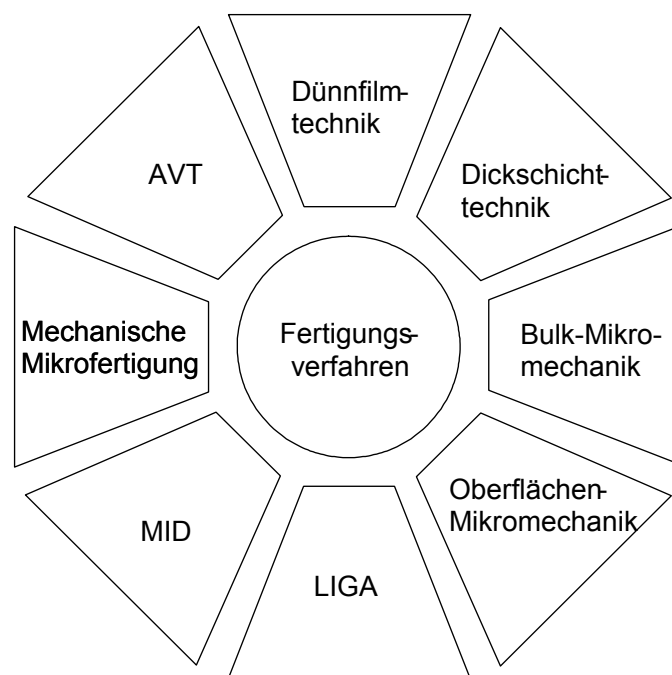


Bild 2.5: Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik (Auswahl), [nach GERLACH97, S. 37 ff., REICHL04]

Der ständige Bedarf nach Herstellungsverfahren, die immer kleinere, genauere und vielfältigere Strukturen erzeugen, führt dazu, dass sich die Mikrosystemtechnik insgesamt bisher als sehr technologiegetrieben darstellt. Neue oder weiter verbesserte Herstellungstechnologien entstehen oft noch im Laufe der Produktentwicklung und erfordern Änderungen am Produkt. In vielen Entwicklungsprojekten werden Produkte und Herstellungstechnologien daher parallel entwickelt. In Branchen wie der Medizintechnik, die durch langwierige Zulassungsverfahren geprägt sind, ist dies oft problematisch, weil Zulassungen auf einer Qua-

lifizierung der Herstellungsverfahren beruhen. Die Scheu vor den Risiken neuer Verfahren verhindert so teilweise ihren Eingang in die Praxis.

Um den Einsatz neuer Technologien anstelle bewährter Verfahren zu fördern, werden im Bereich der Forschung Produkte zum Teil eigens entwickelt, um die Leistungsfähigkeit neuer oder verbesserter Technologien zu zeigen [KLAUBERT98, S. 95].

Die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik ist damit insgesamt sehr stark an die Herstellungstechnologien gekoppelt. Ein grundsätzliches Verständnis der Herstellungsverfahren und ständig aktualisiertes Wissen über die Grenzen der Technologie bekommt dadurch für Produktentwickler eine erheblich größere Bedeutung als in anderen Bereichen der Technik.

Die Vielfalt und die ständig fortschreitende Weiterentwicklung der Herstellungstechnologien, Materialien und Anwendungsgebiete sind für die Produktentwickler eine große Herausforderung. Sie müssen während der Entwicklung ständig alle Voraussetzungen für die Systementwicklung überprüfen und neue Einflüsse berücksichtigen. Dies erfordert insbesondere für die angestrebten Dimensionsverkleinerungen ein hohes Maß an Verständnis für den physikalischen Hintergrund, unterschiedliche Materialien, Herstellungsprozesse, Gesamtkonzept und geforderte Signalwandlungen.

2.2 Markt für Produkte der Mikrosystemtechnik

Durch Mikrosysteme kann ein Mehrwert für konventionelle Systeme erreicht werden [NESTLE05, S. 12] oder diese werden, wie bereits in Kapitel 1.1 erläutert, ersetzt, um

- Kostenvorteile zu erzielen (z. B. Gyroskope),
- die Funktionalität zu erhöhen (z. B. ESP, Kurzzeitnavigation),
- Platz, Gewicht und Energie zu sparen oder
- die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Solche Produkte zeichnen sich in der Regel dadurch aus, dass Mikrosysteme zur Lösung der zentralen Aufgabenstellung entscheidend beitragen und aufgrund ihres geringen Kostenanteils am Endprodukt ein Wettbewerbsvorteil gegenüber konventionellen Produkten erzielt wird. Dies führt zu einem bemer-

kenswerten Hebeleffekt, so dass z. B. im Jahr 2003 4,3 Mrd. Euro direkt mit Mikrosystemen in Deutschland umgesetzt wurden, während Produkte mit Einsatz von Mikrosystemen einen Umsatz von 277 Mrd. Euro erzielten [HEINZE05, S. 35].

Die Produktion und damit die Bedeutung der Mikrosystemtechnik nimmt weltweit immer stärker zu, so dass in Deutschland heute schon 49.000 Menschen direkt und 680.000 indirekt mit der Mikrosystemtechnik beschäftigt sind [BERGER05, S. 7].

Mikrosysteme haben einen hohen Einfluss auf aktuelle und künftige technische und wirtschaftliche Entwicklungen in praktisch allen Bereichen der Technik, von denen einige in Bild 2.6 beispielhaft dargestellt sind.

In der **Automobiltechnik** sind eine Reihe von Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. ABS oder Airbag, ohne mikrosystemtechnische Sensoren nicht realisierbar. Im Airbagsystem nimmt der Sensor zwar nur einen geringen Kostenanteil von wenigen Prozenten ein, aber die Funktion des Systems wäre ohne Mikrosensoren nicht erfüllbar [DETTNER99, S. 524].



Bild 2.6: Einsatzgebiete der Mikrosystemtechnik, nach [NEXUS03]

In einem Mittelklassefahrzeug sind heute schon 30 elektronische Systeme und bis zu 100 Sensoren verbaut, Bild 2.7, um z. B. den Antriebsstrang zu steuern oder für Sicherheit und Komfort zu sorgen. Ihre Zahl wird mit bereits in Entwicklung befindlichen Anwendungen weiter deutlich steigen [SOLZBACHER05, S. 35 f., KRÜGER05, S. 8, REICHL02, S. 26; MAREK03]. So wächst beispielsweise der Markt für Beschleunigungssensoren und Gyroskope [AYAZI98; GRETILLAT98, S. 243 ff.] auch durch Erschließung neuer Anwendungsfelder im Fahrzeug mit jährlichen Raten von derzeit bis zu 25% [ELOY05, S. 43]. Diese Systeme werden meist zunächst in Oberklassefahrzeugen eingeführt und verbreiten sich dann auch in anderen Segmenten.

Entscheidende Schlüsselfaktoren für den Einsatz von Mikrosystemen in Automobilen sind geringe Kosten aufgrund von hoher Integration und geringem Materialeinsatz, hohe Zuverlässigkeit, geringer Stromverbrauch und möglichst umfangreiche Funktionen [SOLZBACHER05, S. 30 f.]. Für den Gesamtmarkt für Sensoren in Kraftfahrzeugen wird ein Zuwachs von 8,8 Mrd. Euro in 2005 auf 11,35 Mrd. Euro in 2010 prognostiziert, wobei der Anteil der Mikrosystemtechnik im gleichen Zeitraum von 2,44 auf 3,42 Mrd. Euro steigen wird [MAREK06].



System	Abb.	Sensors
Distronic	DTR	3
Electron. controlled transmission	ECT	9
Roof control unit	RCU	7
Antilock braking system	ABS	4
Central locking system	ZV	3
Dyn. beam levelling	LWR	6
Common-rail diesel injection	CDI	11
Automatic air condition	AAC	13
Active body control	ABC	12
Tire pressure monitoring	TPM	11
Elektron. stability program	ESP	14
Parktronic system	PTS	12

Bild 2.7: Fahrzeugfunktionen und Sensoren in einem Fahrzeug der gehobenen Mittelklasse [SOLZBACHER05, S. 31, KRÜGER05, S. 8]

Den größten Umsatzanteil der Mikrosysteme haben zur Zeit Druckköpfe und Schreib-/Leseköpfe für Festplatten im Bereich der **Computertechnik** [NEXUS02, S. 10]. Hier leisten mikrosystemtechnische Komponenten einen wichtigen Beitrag zu Miniaturisierung, Integration und kostengünstiger Massenfertigung.

Wichtige weitere Anwendungsfälle sind die Gehäusung integrierter Schaltungen und die Verbindungstechnik, bei der konventionelle Verfahren die Grenze der Miniaturisierung erreicht haben. Auch in der **Kommunikationstechnik**, von der WLAN-Technologie bis hin zur Integration von Computertechnik in Textilien, werden Mikrosysteme eingesetzt [HEINSTEIN05, S. 16, REICHL02, S. 23]. Als intelligente Werkzeuge der Zukunft können Sie entscheidend dazu beitragen, eine Schnittstelle vom Menschen zu seiner computerisierten Umwelt zu schaffen, indem sie z. B. sehen, hören und sich orientieren können oder implantierbare künstliche Organe bereitstellen [BOTTHOF02, S. 2 f.].

In der **Automatisierungstechnik** werden zunehmend mehr Mikrosysteme eingesetzt, um z. B. pneumatisch umgesetzte Bewegungen messtechnisch zu überwachen (Druck und Wege) oder durch Mikroventile zu steuern [NESTLE05, S. 13; KERGEL05, S. 12].

Mikrosysteme spielen ihre Vorzüge insbesondere dann aus, wenn komplexe Aufgabenstellungen in begrenzten Dimensionsumgebungen wahrzunehmen sind. Dazu gehört z. B. auch das Innere des menschlichen Körpers, in dem sich für Mikropumpen, Mikroanalysegeräte oder die mikroinvasive Chirurgie ein breites Anwendungsfeld eröffnet.

Deshalb ist die **Medizin- und Biotechnik** ein stark expandierender Bereich mit großem Potenzial. Typische Anwendungsgebiete sind hier Medikamentendosiersysteme im μl -Bereich [BIER05, S. 22], Diagnosesysteme z. B. für Blutzucker [Schlötterburg05, S. 23], Herzschrittmacher [WEISS05, S. 24] oder Hörgeräte. Auch in der minimalinvasiven Chirurgie kann durch mikrosystemtechnische Komponenten wie Laserwerkzeuge, Ultraschallsensoren oder Endoskope die Funktionalität, die Handhabung und die Sicherheit erheblich gesteigert werden [IRION05, S. 26].

Im **Haushalt** haben Mikrosysteme, wenn auch oft im Verborgenen, eine immer größere Bedeutung als Sensoren für Temperaturregelungen, Alarmanlagen, Klima- und Lüftungsregelungen, für Fernbedienungen von elektrischen Geräten über Funk oder Telefon bis hin zu intelligenten Bewässerungssystemen für den Garten [STRESE05, S. 17, REICHL02, S. 24].

In der **Umwelttechnik** analysieren Mikrosysteme Luft oder Wasser in Anwendungen der Mikrobiologie oder -chemie [BOVENSCHULTE05, S. 18].

Der Markt für mikrosystemtechnische Produkte ist geprägt von einem hohen Kostendruck und sich ständig verkürzenden Produktentwicklungszyklen, die beispielsweise im Bereich der Zulieferer der Automobilindustrie von derzeit 23,6 Monaten auf nur noch 18,3 Monate in 2010 sinken werden [SOLZBACHER05, S. 24].

2.3 Besonderheiten der Entwicklung von Mikrosystemen

Der Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik ist durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet, die sich zum Teil aus den in Kapitel 2.1 bereits dargestellten grundsätzlichen Unterschieden zu anderen Bereichen der Technik ergeben, Bild 2.8.

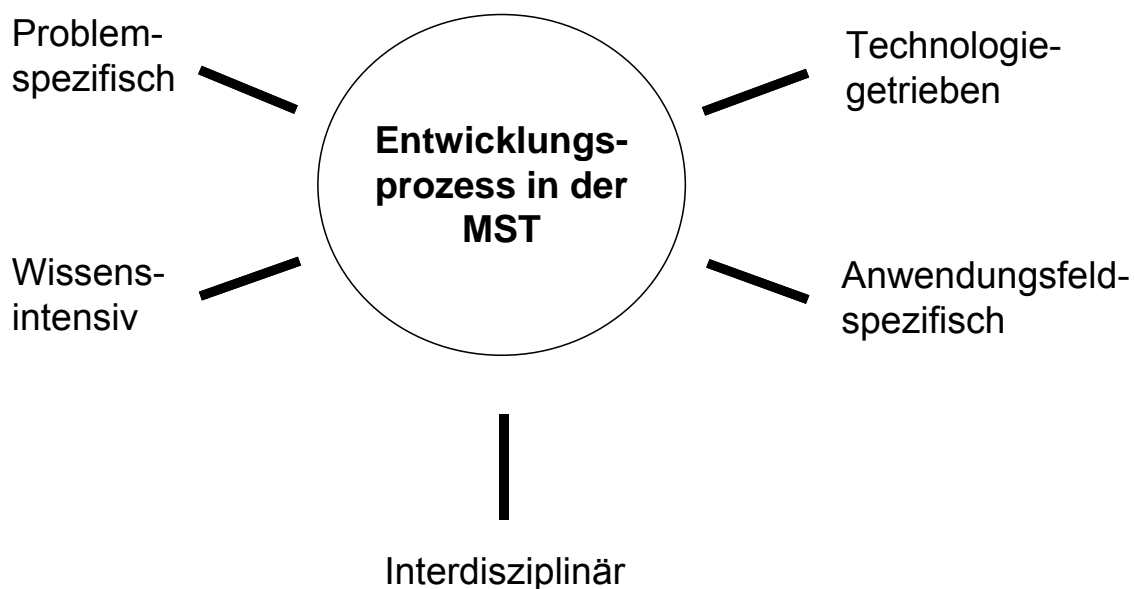


Bild 2.8: Besonderheiten des Entwicklungsprozesses in der Mikrosystemtechnik

Durch fehlende Normteile und unzureichenden Wissensaustausch werden oft Elemente **problemspezifisch** und ohne weitere Einsatzmöglichkeiten entwickelt. Diese mangelnde Flexibilität verursacht unnötige Kosten durch Mehrfachentwicklungen. Die Standardisierung wird insbesondere durch die ständig fortschreitende Entwicklung der Technologie und die hohe Komplexität der Systeme erschwert. Dadurch wird weiteres Wachstum und die Akzeptanz der Mikrosystemtechnik erschwert [CUI03, S. 10 f.; BERGERS02].

In der Mikrosystemtechnik sind Bauelemente weitestgehend nicht standardisiert. Dies bezieht sich sowohl auf die Abmessungen und Schnittstellen zu anderen Bauelementen als auch die Herstellungsverfahren und die verwendeten Werkstoffe. Dadurch müssen Bauelemente teilweise für jeden Anwendungsfall speziell entwickelt werden, obwohl Elemente wie z. B. Lagerungen für bewegliche Teile, Federn oder Elektroden, aber auch etwa Messprinzipien bei Sensoren für andere Anwendungen bereits entwickelt wurden und damit eine Wiederverwendung möglich wäre. Durch die mangelnde Normung ist auch ein einfacher Austausch von Elementen nicht möglich. Zu dieser Vorgehensweise trägt die Unternehmenslandschaft bei, die im Bereich der Mikrotechnologie von vielen als Nischenplayern erfolgreichen Klein- und Kleinstunternehmen geprägt ist [SMM03, S. 38]. Es entstehen unnötig hohe Kosten bei der Entwicklung, der Herstellung und beim späteren Einsatz der entwickelten Systeme. Gerade bei einer neuen Disziplin wäre eine Normung sehr einfach und erfolgversprechend.

Die Mikrosystemtechnik ist **wissensintensiver** als andere Disziplinen. Die Entwicklung von Mikrosystemen erfordert Expertenwissen, das zum Teil sehr firmenspezifisch, wenig aufbereitet und nicht allgemein zugänglich ist. Das Wissen in der Mikrosystemtechnik nimmt zwar ständig stark zu, diffundiert aber teilweise und ist damit oft nicht verfügbar, wenn es benötigt wird. Dem steht natürlich der Vorteil gegenüber, dass entwickelte Komponenten nicht einfach nachgebaut werden können, weil das entsprechende Know-How der Fertigung fehlt. Damit ergibt sich ein Schutz von Aufwendungen für Forschung und Entwicklung, der über den formalen Schutz durch eine Patentierung hinausgeht. Der Entwickler ist aber auf schnell verfügbares und ständig aktualisiertes Wissen angewiesen, das z. B. in Form von Datenbanken verfügbar ist.

Die Vielfalt und der hohe Integrationsgrad der Komponenten erfordern **interdisziplinäre** Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten verschiedener Wissensgebiete. Das Maß an Interdisziplinarität unterschiedlicher Fachbereiche nimmt in Anwendungsfeldern wie z. B. der Biotechnologie, die Fachwissen aus unterschiedlichen Bereichen vereinen, ständig zu. So werden etwa mechanische und elektrische Komponenten auf engstem Raum verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig auf bisher wenig erforschte Art und Weise. In interdisziplinären Projekten werden oft Experten aus vier bis fünf verschiedenen Fachrichtungen

[Glaser94, S. 7; Klaubert98, S. 15] benötigt. Ein hoher Anteil der Entwickler kommt von der Ausbildung her aus der Elektrotechnik, der Physik oder dem Maschinenbau, ergänzt durch Spezialisten aus einer Reihe von anderen Gebieten. Charakteristisch ist aber auch, dass bis zu 2/3 der Entwickler nicht mehr in ihrem ursprünglichen Bereich tätig sind [Klaubert98, S. 13]. Da in diesen Bereichen die Vorgehensweise in Forschung und Entwicklung stark unterschiedlich ist, ist die Zusammenarbeit bis heute nicht optimal. Gerade optimale Abstimmung bei der Zusammenarbeit und effektives Wissensmanagement sind aber künftige Schlüsselkompetenzen des Wirtschaftszweiges Mikrosystemtechnik [SMM03, S. 35].

Aufgrund der Interdisziplinarität kommt der Systemintegration in der Mikrosystemtechnik eine besondere Bedeutung zu. Alle Aspekte, die

- Schnittstellen zwischen Systemkomponenten und zwischen System und Umwelt,
- die Entkopplung einzelner Systemelemente auf verschiedenen physikalischen Ebenen oder
- die Vermeidung störender innerer und äußerer Einflüsse

betreffen, müssen bei der Entwicklung von Mikrosystemen besonders berücksichtigt werden. Dies betrifft sowohl die Abstimmung des Systems als auch die Verbindung der einzelnen Komponenten, wie z. B. die Aufbau- und Verbindungstechnik [HEIMER04, S. 102 ff.].

Künftig wird voraussichtlich neben der Geschwindigkeit der technologischen Entwicklung auch die Komplexität aufgrund des interdisziplinären Charakters und der großen Zahl der Anwendungsbereiche zunehmen [SMM03, S. 40].

Darüber hinaus ist die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik auch **anwendungsfeldspezifisch**. Abhängig z. B. von der betrachteten Branche müssen unterschiedliche Faktoren bei der Vorgehensweise berücksichtigt werden. So führen in der Medizintechnik langwierige Zulassungsverfahren, in denen auch die Herstellungstechnologie zertifiziert werden muss, dazu, dass nur bewährte und beherrschte Herstellungsverfahren eingesetzt werden.

Unter den zahlreichen produkt-, unternehmens- und branchenabhängigen Faktoren spielt in der Mikrosystemtechnik die Entwicklung der Unternehmen eine besondere Rolle. Die Branche ist neben wenigen Großunternehmen geprägt von vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen und insbesondere von deren starkem Wachstum. In diesen Unternehmen lässt sich beobachten, dass die fehlende Kompatibilität der Methodiken in verschiedenen an der Mikrosystemtechnik beteiligten Bereichen oft durch engen persönlichen Kontakt kompensiert wird.

Mit zunehmender Unternehmensgröße verändern sich sowohl die Aufbau- als auch die Ablaufstrukturen im Unternehmen. Dies kann zu stärkerer, oft auch räumlicher Trennung von Teilbereichen und damit stärker verteiltem und spezialisiertem Wissen und abnehmender direkter Zusammenarbeit führen. Um die Bereiche zusammenzuführen und insbesondere die vorliegende Produktkomplexität zu bewältigen, ist ein klarer Entwicklungsablauf bei der Produktentwicklung notwendig. So können Entwicklungsfehler vermieden werden, die oft erst in späten Phasen der Entwicklung bemerkt werden und dann hohe Kosten und Zeitverluste verursachen. Die Entwicklung von Mikrosystemen erfordert daher einen angepassten Entwicklungsprozess und Methoden, die den Entwickler bei der Bearbeitung mikrosystemspezifischer Probleme unterstützen.

Die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik ist sehr **technologiegetrieben**, weil die Realisierungsmöglichkeit nach Aussage von Unternehmen teilweise von parallel entwickelten neuen oder weiterentwickelten Technologien abhängt. Dies zeigt sich auch in der Forschungsliteratur zur Mikrosystemtechnik, die sich schwerpunktmäßig mit der Beschreibung neuer Herstellungsverfahren oder neuer Materialien befasst. In ausgereifteren Disziplinen wie dem Maschinenbau ist dies weniger der Fall, in der Elektrotechnik nur gelegentlich [KLAUBERT98, S. 28].

Hinzu kommt eine große Anzahl von verschiedenen Herstellungstechniken, aus denen die passende ausgewählt werden muss. Hierin unterscheidet sich die Mikrosystemtechnik deutlich von anderen Bereichen der Technik, in denen in der Regel anhand des Anwendungsbezuges eine klare Abgrenzung der Produktentwicklung von der Vorentwicklung, der Technologieentwicklung und der Grundlagenforschung erkennbar ist [Dobberkau02, S. 6; Specht96, S. 16 f.]. In

der Mikrosystemtechnik ist es durchaus üblich, Produkte zu entwickeln, um die Leistungsfähigkeit einer neuen oder weiterentwickelten Herstellungstechnologie nachzuweisen [Klaubert98, S. 95]. Darüber hinaus verursacht die stark technologiegetriebene Entwicklung teilweise Unterbrechungen und Iterationen im Entwicklungsprozess, weil Konstruktionsregeln für eine fertigungsgerechte Entwicklung fehlen oder nicht aktuell sind [KLAUBERT98, S. 107]. Die Entwicklung geeigneter Fabrikationsprozesse sowie der dafür benötigten Werkzeuge und Instrumente ist wesentliche Voraussetzung für die Herstellung der benötigten Bauelemente [SMM03, S. 36]. Die teilweise noch nicht ausgereizten Grenzen und Möglichkeiten der Fertigungsverfahren beeinflussen den Entwicklungsablauf, der im ungünstigsten Fall von vorn beginnen muss, weil die Herstellung nicht wie geplant möglich ist. Insbesondere unerfahrenen Entwicklern fehlen z. B. klare Konstruktionsregeln, die sie bei der Gestaltung von Bauelementen unterstützen und ihnen die ständige Abgleichung ihrer Entwicklung mit den Herstellungsverfahren ersparen [KLAUBERT98, S. 60].

Die Grundlagenentwicklung für Mikrosysteme ist damit zwischen der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung und Entwicklung einzuordnen. Einerseits müssen Methoden des Systementwurfs gefunden werden, die eine Systemoptimierung erlauben und produktübergreifend sind, d. h. von vielen Firmen genutzt werden können. Die Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen können aber nicht, wie in der Grundlagenforschung üblich, losgelöst von Herstellungstechnologien und –abläufen und der Charakterisierung von Technologien und Materialien durchgeführt werden. Andererseits müssen bereits bestehende Lösungen der angewandten Forschung, auch wenn sie in verschiedenen Anwendungsbereichen oder Unternehmen entwickelt wurden, in den Systementwurf integrierbar sein [REICHL94, S. 4].

Der derzeitige Entwicklungsablauf in der Mikrosystemtechnik weist Verbesserungspotenzial insbesondere in den frühen Phasen auf, deren brisante Risikosituation keinen Spielraum für „trial and error“ lässt, weil sonst für spätere Prozesse nicht mehr die erforderliche Zeit bleibt und so Risiken entstehen, die durch eine rechtzeitige Berücksichtigung zugänglicher Informationen vermieden werden könnten. Darüber hinaus determinieren diese frühen Phasen der Produktentwicklung wie im Maschinenbau [EHRENSPIEL05, S. 13] auch in der Mik-

rosystemtechnik 70%-80% der Kosten eines Produktes, obwohl sie nur 10% der Kosten verursachen und ermöglichen damit ein erhebliches Einsparpotenzial [BÜRGE96, S. 3; Kasper00, S. 32].

2.4 Aktueller Stand der Vorgehensweise bei der Entwicklung

Durch die ursprüngliche Ableitung aus der Mikroelektronik ist der Entwicklungsprozess für Mikrosysteme in vielen Prozessmodellen stark an die Vorgehensweise in der Mikroelektronik und die dort verwendeten Beschreibungsmittel angelehnt. In einer Reihe von Vorschlägen für Entwicklungsabläufe werden Ansätze verfolgt, die auf einer Unterteilung des Systems in Komponenten beruhen. Diese Komponenten werden zunächst getrennt entwickelt und dann zu einem System zusammengefügt.

Beispielhaft für diese komponentenbasierten Ansätze seien hier die Modelle von Müller-Glaser [MÜLLER-GLASER94, MEHNER00], Tränkler / Kasper [TRÄNKLER94, (erarbeitet im Rahmen des Verbundprojektes „Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen“ [VDI94]), Kasper00] und Schwarz [SCHWARZ96] erläutert.

Das hierarchische Phasenmodell, das unter anderem von Mehner [MEHNER00, S. 9 f.] und Müller-Glaser [MÜLLER-GLASER94, S. 25 f.] dargestellt wird, geht von einer Aufteilung des Mikrosystems in verschiedene Komponenten aus, Bild 2.9.

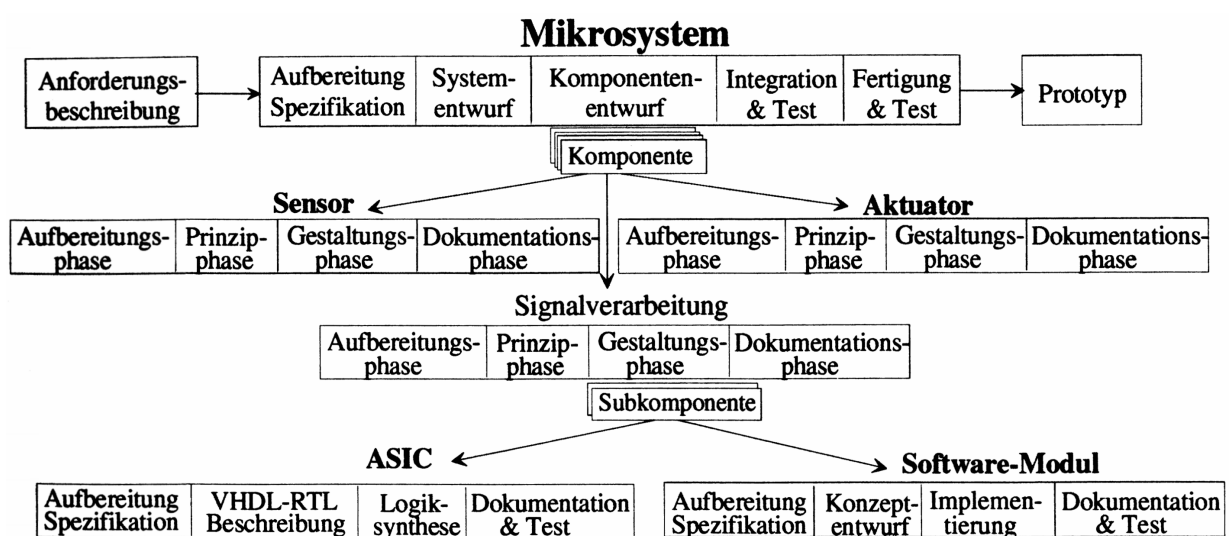


Bild 2.9: Hierarchisches Phasenmodell für die Entwicklung von Mikrosystemen [MEHNER00, S. 9]

Zu Beginn der Entwicklung sollen die Anforderungen an das zu entwickelnde System zusammengetragen und dann in der Aufbereitungsphase auf ihre Widerspruchsfreiheit und Realisierbarkeit hin überprüft werden.

Auf Grundlage der Anforderungsbeschreibung entsteht ein Entwurf des Systems, das dann in Komponenten, wie z. B. Sensoren, Aktuatoren und Signalverarbeitung zerlegt wird (Partitionierung). Die Analyse des Zusammenwirkens findet auf hoher Abstraktionsebene (Blockschaltbilder) statt und beruht auf Berechnungen der Eigenschaften der Teilsysteme und Komponenten.

Die durch den Systementwurf genauer spezifizierten Anforderungen an die Teilsysteme werden im Komponentenentwurf umgesetzt. Diese Komponenten werden nach Mehner getrennt entworfen, wobei jeweils zunächst die erforderlichen Daten komponentenspezifisch aufgearbeitet werden, bevor dann ein Prinzip entwickelt wird, das anschließend gestaltet und dokumentiert wird. Die streng hierarchische Vorgehensweise zeigt sich auch in der bei Bedarf erfolgenden weiteren Aufteilung von Komponenten in Subkomponenten. Die Vorgehensweise beim Entwurf ist grundsätzlich mit der in den klassischen Ingenieurdisziplinen vergleichbar [MEHNER00, S. 10].

Anhand von Modellen wird das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten in der Integrationsphase geprüft. In dieser Phase stehen die charakteristischen Eigenschaften der Komponenten wie Form, Größe, Leistungsverbrauch und Genauigkeit bereits fest. In einer intensiven Testphase sollen mittels Simulationen die Schwachpunkte des Systems erkannt und durch weitere Iterationszyklen behoben. Entsprechen schließlich die Leistungen des Mikrosystems den Anforderungen des Auftraggebers kann mit der Prototypenfertigung begonnen werden. Der Integration der Komponenten folgt die Fertigung, bevor die Entwicklung mit einem Prototyp abschließt.

Auch der Ansatz von Tränkler [TRÄNKLER94, S. 6 ff.], Bild 2.10, beruht auf der Zerlegung des Systems in Komponenten.

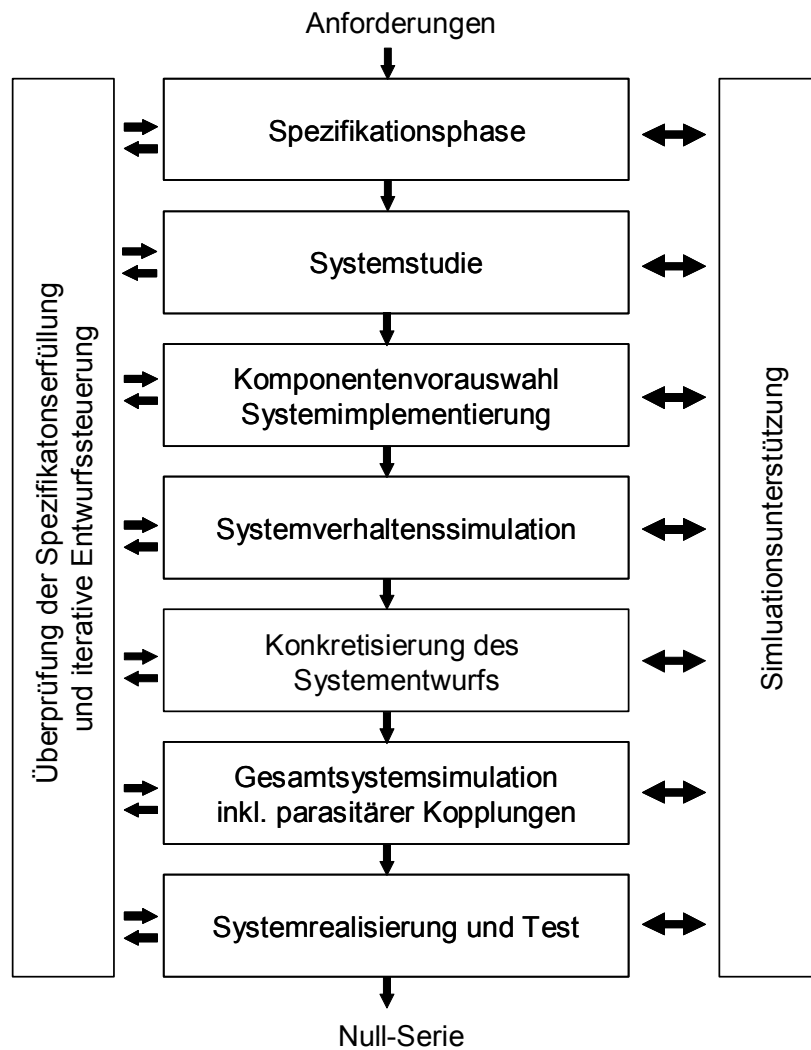


Bild 2.10: Hauptschritte des Entwurfsablaufs für Mikrosysteme nach [TRÄNKLER94, S. 7; KASPER00, S. 91]

Die Entwicklung geht von einer vom Kunden erstellten Systemspezifikation aus, auf die eine Zerlegung der Systemfunktionen in Subfunktionen erfolgt. Damit entsteht eine Art Blockschaltbild des Mikrosystems mit „idealen Komponenten“ [TRÄNKLER94, S. 7].

Diese Komponenten werden aus einer Komponentendatenbank heraus zu einem System zusammengesetzt, dessen Verhalten anschließend simuliert wird. Erst danach wird der Systementwurf konkretisiert und dann eine Gesamtsimulation inklusive parasitärer Kopplungen durchgeführt. Abschließend wird das System realisiert und getestet. Da ein geradliniger Entwicklungsdurchlauf von der Anforderungsliste bis zum Prototypen in der Mikrosystemtechnik oft nicht möglich ist, werden die einzelnen Entwurfsphasen bei Bedarf iterativ durchlaufen.

In der Mikrosystemtechnik werden komplexe, heterogene Systeme gefertigt, die sich zum Teil aus funktional und technologisch unterschiedlichen Komponenten zusammensetzen. Ein gemeinsames Verständnis zur Systemstruktur und zum Systementwurf ist daher wichtig für die Optimierung des Gesamtsystems [MÜLLER-GLASER94, S. 30]. Aus diesen Bedingungen resultieren besondere Anforderungen an die Entwurfsmethodik, die Entwurfswerkzeuge und eine durchgehende Rechnerunterstützung durch geeignete Simulationswerkzeuge [SCHNAKENBERG94, S. 115].

Aufbauend auf der Vorgehensweise von Tränkler schlägt daher Kasper vor, dass alle Phasen möglichst rechnerunterstützt durchzuführen sind und ergänzt die Vorgehensweise von Tränkler um eine durchgängige Simulationsunterstützung, Bild 2.10 [KASPER00, S. 91].

Einen ähnlichen Weg beschreiten auch Schwarz [SCHWARZ96, S. 120] und darauf aufbauend Gerlach [GERLACH97, S. 64]. Schwarz unterteilt das System zunächst in Komponenten, entwickelt diese und fügt sie zum Gesamtsystem zusammen, Bild 2.11.

Die Vorgehensweise beruht stark auf einer rechnergestützten Modellierung und Simulation der Komponenten in ihren jeweiligen Domänen. Ausgehend vom System-Konzept werden zunächst Forderungen an die Komponenten formuliert. Die Komponenten werden unabhängig voneinander entworfen und in mehreren Iterationsschleifen zunächst getrennt, dann im System modelliert, simuliert und optimiert. Es folgt die als Feinentwurf bezeichnete Konstruktion, die nach einer Verifikation in der Herstellung und dem Test durch Messungen mündet.

Dazu muss die Beschreibungssprache aus der Mikroelektronik erweitert werden, um dann Komponenten aus einer Datenbank abzurufen und mit den hinterlegten und bei Bedarf ergänzten Informationen zu simulieren. Die Modellierung und Simulation wird insbesondere als Möglichkeit gesehen, den Aufwand für die Herstellung von Versuchsmustern und die Bereitstellung von Messtechnik zu reduzieren. Zusätzlich wird so die Berücksichtigung von Querempfindlichkeiten und parasitären Effekten möglich [GERLACH97, S. 64]. In der Datenbank müssen zusätzliche Informationen zu Störeinflüssen und Querempfindlichkeiten enthalten sein [Kasper00, S. 92].

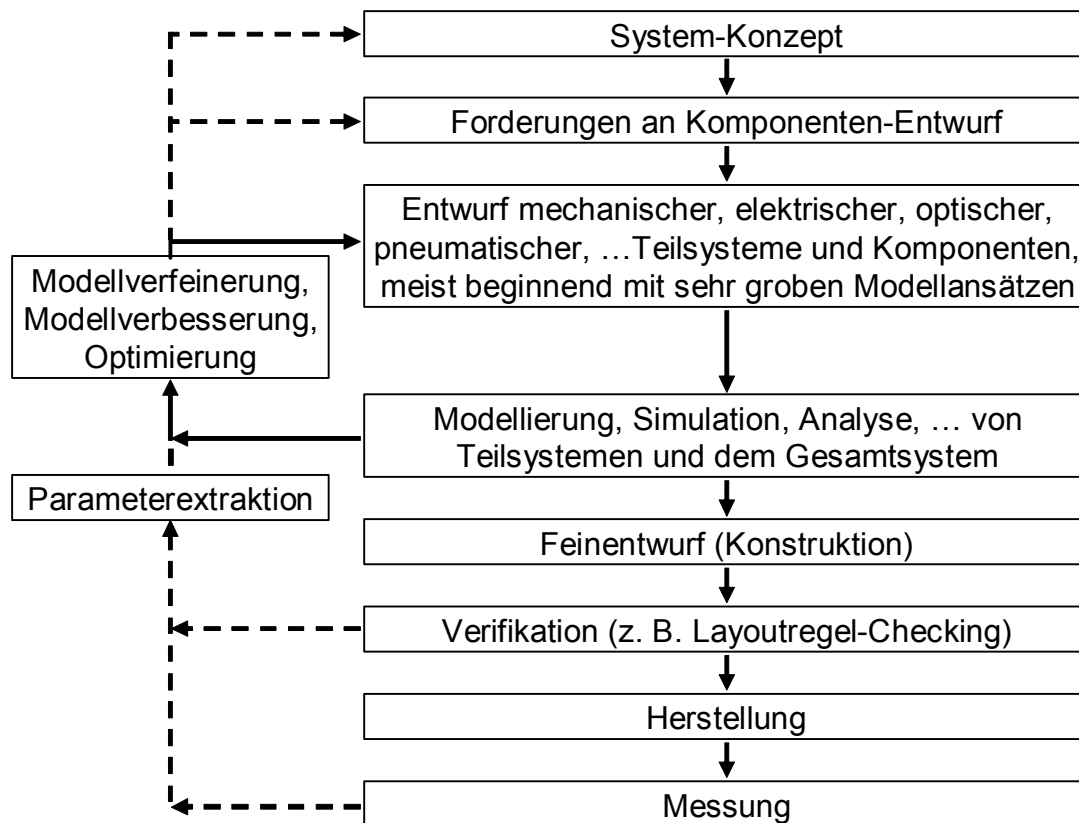


Bild 2.11: Design Flow für Mikrosysteme nach [SCHWARZ96, S. 120]

Diese Vorgehensweise stützt auch Eigler, der Mikrosysteme explizit als „gegenüber dem Entwurf von integrierten Schaltungen erweiterte Disziplin, keine neue Disziplin“ [EIGLER94, S. 5] sieht.

Wie in Bild 2.12 dargestellt, ist der Entwurf aus dieser Sicht eine Transformation der Ausgangsbeschreibung in Form von Anforderungen in eine Dokumentation und gliedert sich in die Schritte

- Auswahl der Struktur (Struktursynthese),
- Wahl der Funktion (Funktionssynthese, Verhaltenssynthese) und
- Wahl der Kenndaten des Systems (Parametersynthese).

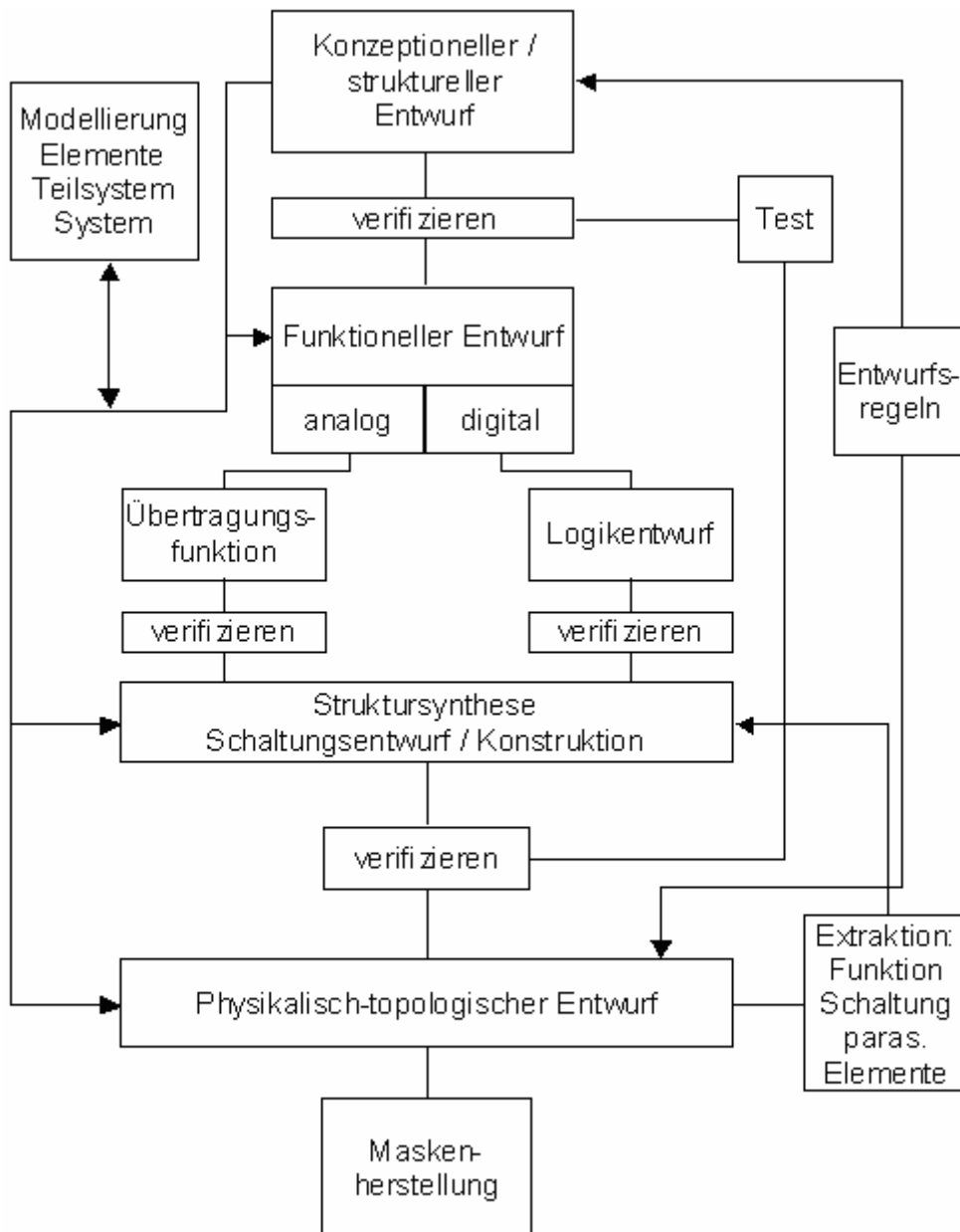


Bild 2.12: Allgemeiner Ablauf des Mikrosystementwurfs [EIGLER94, S. 43]

Das Gesamtsystem ist streng hierarchisch gegliedert und wird Top-down bzw. Bottom-up durchlaufen. Der Entwicklungsablauf erfolgt in wesentlichen Teilen rechnergestützt, wie in Bild 2.12 auch an der Verwendung von Übertragungsfunktion und Logikentwurf mit anschließender Struktursynthese erkennbar ist. An den physikalisch-topologischen Entwurf schließt sich die Herstellung der Masken für die Produktion am Ende des Entwicklungsablaufs an.

Ähnliche Ansätze finden sich auch in der internationalen Literatur [z. B. ANTONSSON96, FEDDER00, SCHACHLER95]. Der beispielhaft dargestellte und von

Antonsson vorgeschlagene Prozess, Bild 2.13, ergänzt die für die Mikrosystemtechnik wichtige parallele Betrachtung von Produkt und Herstellungstechnologie. Auch der Ansatz von Antonsson beruht auf einer intensiven Simulation zur Überprüfung und einer Unterstützung mit Komponentenbibliotheken zur Generierung eines Maskenlayouts.

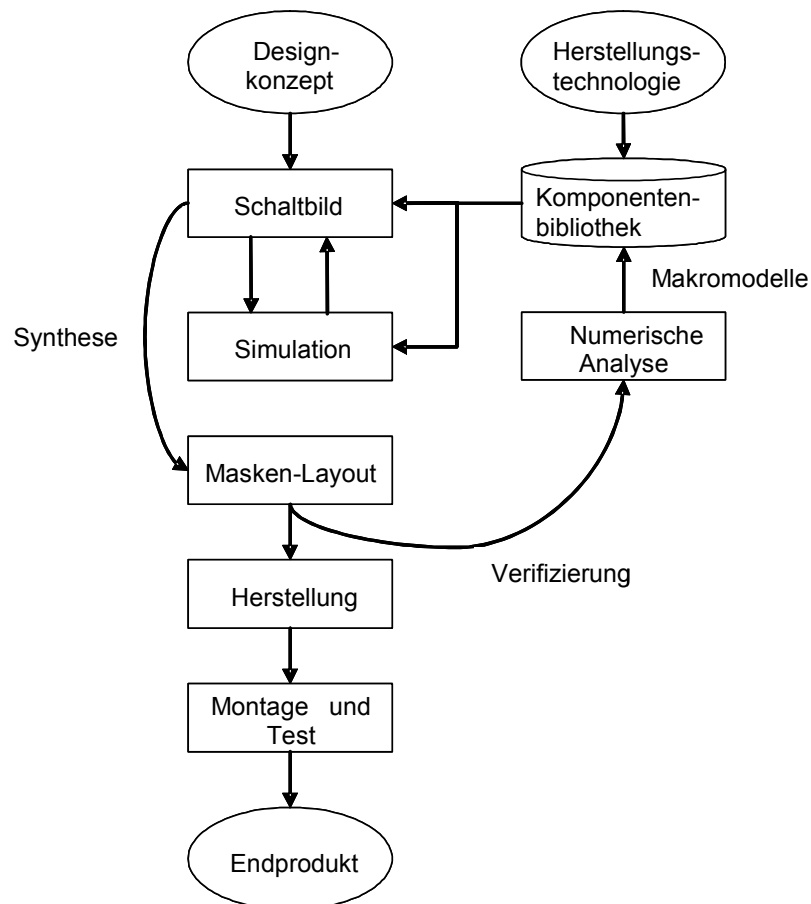


Bild 2.13: Vorgehensweise zur Entwicklung von Mikrosystemen nach [Antonsson96, S. 8]

Die komponentenbasierte Vorgehensweise verdeutlicht ein grundlegendes Problem der hier bisher beschriebenen Ansätze: Es wird auf bereits vorhandene Komponenten zurückgegriffen oder diese werden getrennt voneinander entwickelt und simuliert. Eine kreative Phase in Form einer Suche nach geeigneten neuen Lösungen oder Gesamtkonzepten wird nicht ausdrücklich gefordert. Sowohl der für die Mikrosystemtechnik immens bedeutende Integrationsaspekt mehrerer Funktionen in einem Bauelement als auch Wechselwirkungen und Störeinflüsse werden dadurch unter Umständen erst verspätet sichtbar, wenn

die Komponenten weitgehend „fertig“ sind. Dies führt unweigerlich zu Schleifen im Produktentwicklungsprozess.

Durch die Entwicklung aus der Mikroelektronik heraus wird das Mikrosystem sehr stark als Zusammenbau fertig modellierter und simulationsfähiger Komponenten gesehen, die im Wesentlichen mit Herstellungsverfahren der Mikroelektronik gefertigt werden. Eine reine Top-Down-Strategie, wie in der Mikroelektronik üblich, ist in der Mikrosystemtechnik nicht anwendbar, da die vom System gestellten Anforderungen nur unvollständig von den Komponenten erfüllt werden. Meist muss zusätzlich zur Komponentenbeschreibung auch das Zusammenwirken der Teilsysteme verifiziert werden.

Diese Rückführung von Informationen aus dem Komponentenentwurf in den übergeordneten Systementwurf (Bottom-Up-Strategie) ermöglicht die Integration der Komponenten im System. Die Kombination dieser beiden Strategien in der Mikrosystemtechnik wird von verschiedenen Stellen favorisiert [VDI94, JOHN96] und als Meet-in-the-Middle-Strategie bezeichnet [MÜLLER-GLASER96].

Dies zeigt, dass die bekannten systematischen Entwicklungsprozesse für Mikrosysteme noch nicht ausgereift sind [KLAUBERT98, S. 29]. Die bereits früh erkannte Problematik der nicht beherrschbaren Komplexität der Systeme im nichtelektronischen Bereich [EIGLER94, S. 71] verhindert bis heute die rein algorithmische Lösung von Problemstellungen für Mikrosysteme. Tools für die Bereiche Spezifikation, Synthese, Optimierung und Verifikation sind noch nicht ausreichend vorhanden [SCHWARZ96, S. 119], so dass ein durchgängiger oder gar automatisierter Entwicklungsablauf im Rechner nicht möglich ist. Dies liegt unter anderem daran, dass aktuelle Produkte erheblich komplexer sind und Bauelemente enthalten, die in Funktion und Aufbau weit über die Mikroelektronik hinausgehen. So hat zum Beispiel in Mikroventilen die Fluidik, besonders auch die Abdichtung der Düse, eine entscheidende Bedeutung für die Funktion, die aber im Rechner nur schwer abgebildet werden kann.

Darüber hinaus erfordert die Mikrosystemtechnik zum Teil ein hohes Maß an Intuition und heuristisches Vorgehen und ist durch mangelnde Durchgängigkeit sowie fehlende Automatisierbarkeit von Entwurfsschritten gekennzeichnet [SCHWARZ96, S. 119]. Dazu gehört auch die Berücksichtigung und Überprüfung

des Systemzusammenhangs, um die unterschiedlichen Disziplinen zu integrieren.

Außerdem haben sich die Herstellungsverfahren wesentlich erweitert, wodurch sich erheblich variantenreichere und verschiedenartigere Lösungsmöglichkeiten ergeben. Die dadurch mögliche Kreativität ist aber nur schwer in einer kompletten Datenbank abzubilden.

In den Ansätzen von Schwarz und Reichl fehlt zusätzlich eine Aufbereitung der Kundenspezifikation. Damit bleiben unternehmensinterne Anforderungen z. B. im Hinblick auf die Fertigungsmöglichkeiten unbeachtet.

Auch die bei allen Ansätzen erst am Ende des Entwicklungsprozesses stattfindenden Tests des Gesamtsystems in Form eines Prototypen bergen die Gefahr, dass grundlegende Funktionen nicht erfüllt werden können oder Störeinflüsse die Funktion verhindern. Damit sind aber weite Rückschritte im Entwicklungsprozess verbunden.

2.5 Folgerungen für diese Arbeit

Die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik ist sehr komplex und durch eine Reihe von sehr speziellen Anforderungen gekennzeichnet, die sich deutlich von denen anderer Disziplinen unterscheiden. Solche Problemstellungen erfordern einen durchgängigen Entwicklungsprozess [VDI94, Vorwort] und eine systematische Aufgabenbearbeitung [VDI2222], die sich in erster Linie durch eine klare Struktur des Vorgehens [DOBBERKAU02, S. 13] auszeichnet und durch geeignete Methoden unterstützt wird [GRABOWSKI97, S. 88; KRAUSE98, S. 7-28; SPATH01, S. 180].

Die bestehenden Entwicklungsprozesse sind auf die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik noch nicht optimal abgestimmt. Dies liegt insbesondere daran, dass sie ursprünglich aus der Vorgehensweise der Mikroelektronik abgeleitet wurden und an die Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik nicht angepasst wurden.

Damit ist das Problem einer zielführenden Vorgehensweise bei der Entwicklung von Mikrosystemen bisher nicht zufriedenstellend gelöst. Erfahrungen in ande-

ren Bereichen der Technik zeigen, dass ein sorgfältig geplanter Ablauf Effektivität und Effizienz des Entwicklungsprozesses erheblich verbessern kann. Im Maschinenbau [PAHL03], [VDI2221], [ROOZENBURG95], in der Mechatronik [VDI2206] und in der Softwaretechnik [Balzert99] haben sich methodische Vorgehensweisen bewährt. Eine solche Vorgehensweise fehlt bisher in der Mikrosystemtechnik, und es gibt derzeit, auch international gesehen, keine allgemein akzeptierte Entwicklungsmethodik für Mikrosysteme [KLAUBERT98, S. 1].

Um dies zu ändern, müssen deshalb zunächst die sich aus den Besonderheiten der Mikrosystemtechnik ergebenden Anforderungen geklärt werden, um zu überprüfen, ob auf Basis der Methodiken anderer Disziplinen ein besser angepasster Prozess gestaltet werden kann. Erst im Anschluss kann dann ein entsprechender Entwicklungsablauf erarbeitet werden.

3 Anforderungen an die Entwicklung in der MST

Aus den dargestellten Eigenschaften und Besonderheiten der Mikrosystemtechnik können eine Reihe von Anforderungen an eine Methodik für die Mikrosystemtechnik abgeleitet werden.

Für die Akzeptanz in der Praxis und die Erleichterung der Umsetzung müssen zunächst einmal allgemeine bzw. formale Anforderungen erfüllt werden, die für jede Methodik gelten. Die Methodik muss einen hinreichenden Gebrauchsnutzen haben und den Anwender unterstützen. Dazu sollte sich die Vorgehensweise an den realen Arbeitsabläufen orientieren und in bestehende Entscheidungsprozesse integrierbar sein.

Für die Entscheidungsprozesse ist es wichtig, dass Bearbeitungsfortschritt und Ergebnisse transparent sind und das Vorgehen nachvollziehbar ist. Die Anwendung der Methodik muss ohne Expertenwissen möglich und interdisziplinär verständlich sein. Darüber hinaus muss die Methodik eine Offenheit bezüglich unterschiedlicher Sichten auf den Entwicklungsprozess gewährleisten, also die unterschiedlichen Erfordernisse verschiedener Unternehmensbereiche, wie z. B. der Fertigung oder der Qualitätssicherung, berücksichtigen. Zur Erleichterung der Anwendung muss eine Visualisierung des Arbeitsprozesses möglich sein, die leicht verständlich ist und in unterschiedlichen Detaillierungsstufen anwendbar ist. Grundlegendes Ziel muss es sein, einen effizienten („die Dinge richtig tun“) und effektiven („die richtigen Dinge tun“) Entwicklungsablauf zu unterstützen.

Die spezifischen Anforderungen leiten sich aus den Besonderheiten der Mikrosystemtechnik ab und können, wie in Bild 3.1 dargestellt, zusammengefasst werden.

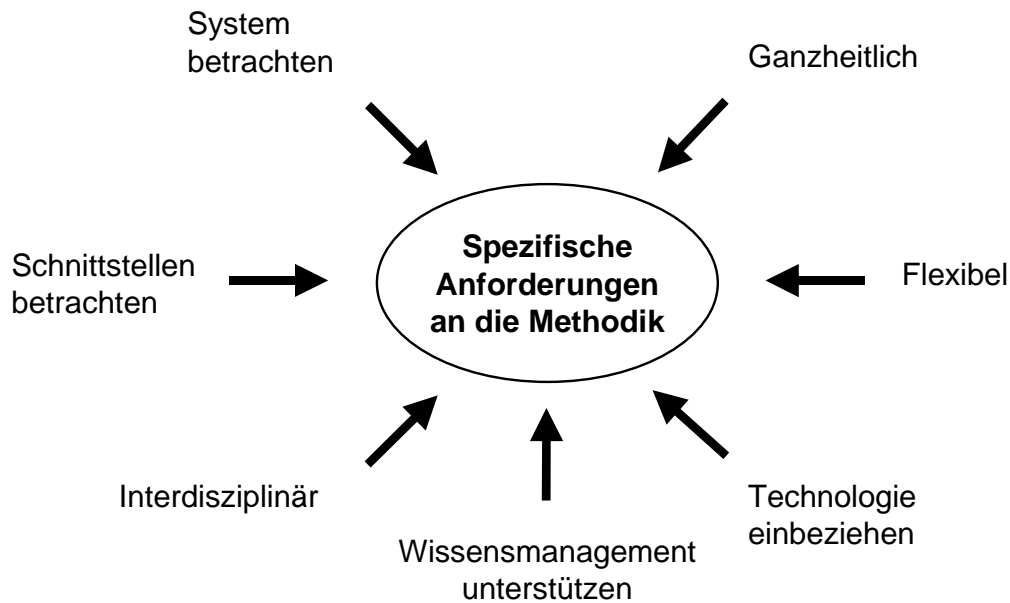


Bild 3.1: Anforderungen an die Entwicklungsmethodik

Mikrosysteme sind technische Systeme, die aus Systemsicht durch den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen charakterisiert werden können [BEITZ97, S. F2]. Deshalb ist bei ihrer Entwicklung eine **Systembetrachtung** wichtig. Die Systemfunktion muss auch unter Störeinflüssen sichergestellt, die Störung externer Systeme minimiert und vor allem auch eine Reduzierung der mit der Vermeidung von unerwünschten Einflüssen verbundenen Zeit- und Kostenaufwände [SCHRAGE94, S. 59] erreicht werden. Zur Vermeidung unerwünschter Wechselwirkungen mit der Umgebung ist eine Beachtung von z. B. EMV-Effekten während der gesamten Entwicklung notwendig. Hilfreich ist hier, wie auch bei Makrosystemen, die Berücksichtigung dieser Effekte während des gesamten Entwicklungsablaufs z. B. durch Bereitstellung genauer Modellbeschreibungen für Simulationen, aber auch eine störungsresistente Anordnung von Komponenten [KASPER94, S. 33].

In den meisten Fällen bestehen Mikrosysteme aus Subsystemen oder integrierten Komponenten, die auf Technologien verschiedener Disziplinen beruhen. Dies erfordert eine präzise **Definition der Schnittstellen** und eine sorgfältige Integration des Gesamtsystems in allen Phasen des Entwicklungsprozesses [SCHORCHT95, S. 81]. Dies umso mehr, als Mikrosysteme oft nicht reparaturfähig sind und so die Funktionsprüfung im abschließenden Systemtest eine hohe Bedeutung hat [Kasper00, S. 32].

Eine Herausforderung für die Zukunft ist die Entwicklung modularer Mikrosysteme, denen einheitliche Schnittstellen und Standards zugrunde liegen [HEINZE05, S. 34]. Dies macht einen ganzheitlichen Ansatz zur interdisziplinären Zusammenarbeit unumgänglich [SALOMON05, S. 41]. Fehlen solche ganzheitlichen Ansätze, so erfolgt die Optimierung anhand der Teilsysteme und nicht am Gesamtsystem. Damit kann ein Gesamtoptimum nur schwer erreicht werden, und es kommt zu zeitraubenden Iterationen beim Zusammenführen der Teillösungen [GAUSEMEIER00, S. 48]. Für eine effiziente Entwicklung in der Mikrosystemtechnik wird daher eine Methodik benötigt, die alle beteiligten Domänen und deren Zusammenwirken berücksichtigt [HARTMANN95, S. 674]. Klare Schnittstellendefinition und systematischer Informationsaustausch zwischen interdisziplinären Teilbereichen sind dafür wesentliche Voraussetzungen.

Die Vorgehensweise zum Systementwurf muss daher eine Systemoptimierung ermöglichen und produktübergreifend, also von vielen verschiedenen Entwicklern sowohl in Unternehmen als auch in Forschungsgesellschaften nutzbar sein. Sie muss aber auch die Integration von Komponenten, die von einzelnen Firmen entwickelt werden, ermöglichen [REICHL94, S. 4].

Enge interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordert viel mehr als in anderen Disziplinen ständige Weiterbildung der Mitarbeiter. Aufgrund der engen Verknüpfung verschiedener Disziplinen muss eine umfassende Wissensbasis schon in der Ausbildung geschaffen und später ständig aktualisiert werden, die solides und übergreifendes Grundwissen in den Teildisziplinen schafft [VDI94S. 10, VDEVDI98, S. 22, ZAPPE05, S. 37]. Die Methodik muss die Möglichkeit bieten, unterschiedliches Expertenwissen interdisziplinär zu nutzen.

Wissensmanagement spielt in der Mikrosystemtechnik eine zentrale Rolle. Ein wesentlicher Punkt ist die Speicherung von Informationen in strukturierter Form und mit der Möglichkeit des schnellen Zugriffs bei Bedarf. Ein Lösungsansatz sind z. B. Konstruktionsregeln oder Konstruktionskataloge, die Konstrukteure verschiedener Disziplinen bei der Findung passender Lösungen unterstützen und gleichzeitig eine Speicherung und erneuten Zugriff bei nachfolgenden Projekten ermöglichen.

Auch für den Aufbau eines erfolgreichen Innovationsmanagements in der Mikrosystemtechnik ist die Beschaffung und Analyse von Informationen ein wesentlicher Faktor, um im Unternehmen optimale Strukturen für in die Zukunft gerichtete Technologie- und Produktinnovationen gezielt aufbauen zu können. Eine ständig aktualisierte Wissensbasis trägt zur erfolgreichen Bewältigung von komplexen Entscheidungsprozessen bei. Durch mangelnde Informationen über aktuelle technologische Entwicklungen, aber auch über Marktpotenziale und Kooperationsmöglichkeiten, kann der Innovationsprozess erheblich verlangsamt oder gar blockiert werden [VDI94, S. 4].

Die **Technologie** spielt im gesamten Entwicklungsprozess eine große Rolle. Für Entwickler von Mikrosystemen bleiben dreimal so viele Fragen bezüglich der Herstellung zunächst unbeantwortet als im Makrobereich [KLAUBERT98, S. 90]. Durch die oftmals parallel zur Produktentwicklung stattfindende Optimierung der Herstellungstechnologie ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Produktentwickler und Technologieentwickler die Voraussetzung für eine optimale Ausnutzung der Möglichkeiten von Mikrosystemen und ihren Herstellungstechnologien. Dem Produktentwickler müssen stets aktuelle und umfassende Informationen zum Herstellungsprozess bereitgestellt werden.

Schon zu Beginn der Entwicklung sollten bei der Systemgestaltung und -aufteilung fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden, die sich aus den zur Verfügung stehenden Integrationsverfahren, Aufbau- und Verbindungstechniken, deren Prozesskompatibilitäten sowie den verwendeten Materialien ergeben [KASPER94, S. 36 ff.]. Die technologischen Realisierungsmöglichkeiten müssen bewertet und ausgewählt, Designregeln auf Basis der aktuellen Herstellungsmöglichkeiten erstellt werden.

Je kleiner Komponenten ausfallen, desto höhere Anforderungen stellen sie an Qualität und Präzision bei der Fertigung und erfordern damit auch im Produktionsbereich innovative Technologien [FESTO02, S. 80 f.]. Die Gestaltung der Produktgeometrie wird sehr stark durch die Herstellungstechnologie beeinflusst [KLAUBERT98, S. 91]. Bei der in der Mikrosystemtechnik durchaus üblichen getrennten Entwicklung von Produkt und Technologie in unterschiedlichen Unternehmen ist dies eine besondere Herausforderung [HEINZE05, S. 34], die eine enge Abstimmung erfordert. Eine integrierte Produkt- und Prozessentwicklung

ist insbesondere in einem Umfeld notwendig, das von schnellem technologischen Wandel und hohen Qualitätsanforderungen bei verschärftem internationalen Wettbewerb und hohem Kostendruck geprägt ist [SPECHT96, S. 114].

Der Entwicklungsprozess muss **flexibel** an verschiedene Arten von Entwicklungen anpassbar sein, die in der Mikrosystemtechnik üblich sind. Dazu gehört besonders auch die Unterstützung von Anpassungskonstruktionen, bei denen das Produkt bereits im Makrobereich mit gleicher Funktionserfüllung oder in einer anderen Mikrotechnologie vorhanden ist. Dieser Fall ist in der Praxis in der Mikrosystemtechnik häufig anzutreffen.

Eine einheitliche Vorgehensweise erscheint angesichts der Vielschichtigkeit der Mikrosystemtechnik, der unterschiedlichen Entwicklungsprozesse und auch der unterschiedlichen Struktur und Größe der beteiligten Unternehmen und Institute nur schwer möglich. Sie muss universeller als Methodiken für einzelne Teilbereiche sein, darf aber gleichzeitig den Bezug zum Entwurf eines Einzelsystems nicht verlieren [REICHL94, S. 5]. Eine Anpassung an die Erfordernisse der jeweiligen Entwicklungsaufgabe ist daher notwendig.

Flexibel muss der Entwicklungsprozess auch im Hinblick auf die Gestaltung der Bauelemente, z. B. hinsichtlich ihrer Geometrie oder der zu verwendenden Domäne, sein. Eine Beschränkung auf Standardformen oder vorgegebene Geometrielemente, erscheint nicht sinnvoll, wenn sie nicht von der Herstellungstechnologie vorgegeben werden. Dazu gehört auch die flexible Gestaltbarkeit in drei Dimensionen. Trotzdem ist natürlich die Wiederverwendung einmal erstellter Teile erwünscht.

Die Mikrosystemtechnik befindet sich im Spannungsfeld zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung [HEINZE05, S. 34]. Die Erforschung abstrahierter Modelle, wie sie in der Grundlagenforschung angewandt wird, führt nicht zum Ziel, weil die Randbedingungen der Herstellung unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten immer mit beachtet werden müssen [REICHL94, S. 3]. Die Trennung zwischen Forschung, Entwicklung und Herstellung wird sich damit immer mehr verwischen, da die verkürzten Entwicklungszeiten und die Interdisziplinarität zu einer produktstimulierten Forschung führen [REICHL02, S. 13]. Damit wird eine **ganzheitliche** Behandlung des Themas Forschung und

Entwicklung erforderlich, um die Komplexität von F&E-Prozessen zu beherrschen [BÜRGE96, S. 4]

Eine ganzheitliche Sicht auf den gesamten Produktlebenszyklus hilft insbesondere, die Funktion des Produktes in allen Phasen seines Lebenszyklus zu gewährleisten und Anforderungen aus verschiedenen Sichten zu sammeln. Aber auch eine ganzheitliche Betrachtung von Kosten und Umweltaspekten kann Kosteneinsparungen unterstützen und die Qualität des Produktes verbessern.

Für die Mikrosystemtechnik ist eine ganzheitliche Strategie des Innovationsprozesses wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche Entwicklungen [SCHORCHT95, S. 82]. Beginnend mit der Marktfähigkeit der Produkte und dem abgestimmten Einsatz von Technologie und Systementwicklung in Fertigung und Entwicklung reicht dies bis hin zur Lösungsoptimierung des Gesamtsystems. Die rechtzeitige und zielgerichtete Schaffung optimaler Strukturen für die Technologie- und Produktentwicklung ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor im internationalen Wettbewerb [VDI94, Vorwort; KREUZBERGER05, S. 32].

Ziel einer Entwicklungsmethodik muss es deshalb sein, eine ganzheitliche Sicht auf den Produktentwicklungsprozess und die angrenzenden Bereiche bereitzustellen. Damit kann der Produktentwicklungsprozess sowohl durch die anderen Unternehmensteile unterstützt werden als auch deren Belange berücksichtigen.

Für die Entwicklung von Mikrosystemen sollte also das komplette System mit seinen Schnittstellen interdisziplinär betrachtet werden. Weiter muss das Management des fachübergreifenden Wissens unterstützt und besonders auch die Herstellungstechnologie berücksichtigt werden. Für die Anwendbarkeit in Unternehmen ist es wichtig, dass die Vorgehensweise flexibel an deren spezielle Erfordernisse angepasst werden kann und alle Unternehmensbereiche einbezieht.

Um die Lösungsmöglichkeiten für diese sehr komplexen und sich zum Teil auch widersprechenden Anforderungen abschätzen zu können, wird im nachfolgenden Abschnitt zunächst der Stand der Technik der Entwicklung in den unterschiedlichen Bereichen der Technik dargestellt. Im Anschluss wird dann die Verwendbarkeit für die Entwicklung von Mikrosystemen untersucht.

4 Bestehende Methodiken

In vielen Bereichen der Technik haben sich methodische Vorgehensweisen bei der Entwicklung neuer Produkte zum Teil seit Jahrzehnten bewährt und sind daher heute Stand der Technik.

Die meisten Methodiken setzen sich aus zwei Bestandteilen zusammen: der Vorgehensweise, also dem Ablauf der durchzuführenden Arbeitsschritte, und den Methoden, die bei der Durchführung der Arbeitsschritte unterstützen. Insbesondere für die Vorgehensweise kann eine Methodik nur eine Anleitung liefern, die durch Anpassung an Besonderheiten in der Praxis und erforderliche iterative Entwicklungsschleifen an eine konkrete Entwicklungsaufgabe angepasst werden muss. Nur so, und nicht durch starres Abarbeiten von Entwicklungsschritten, können hochwertige Produkte entwickelt werden [KLAUBERT98, S. 17].

Mitarbeiter in Entwicklungs- und Konstruktionsbereichen geraten nicht vorwiegend durch technische Problemstellungen, sondern durch Management-, Kommunikations- und Informationsprobleme unter Kosten- und Zeitdruck [EHRENSPIEL05, S. 27 ff.]. Eine methodische Vorgehensweise bei der Entwicklung kann nicht nur Hilfestellung zur Lösungssuche und Produktinnovation bieten, sondern auch für ein effizientes Projektmanagement, für eine Arbeitsvorbereitung in der Konstruktion und für die Entwicklung modularer, kostengünstiger Produkte sorgen [EHRENSPIEL05, S. 36 f.].

Klare Entwicklungsprozesse unterstützen eine effiziente und nachvollziehbare Arbeitsweise, um die Anforderungen von Kunden wirksam in ein erfolgreiches Produkt umzusetzen und sind nicht zuletzt auch Voraussetzung für die von vielen Unternehmen angestrebte Zertifizierung des Qualitätsmanagements z. B. nach DIN EN ISO 9004 [DIN EN ISO 9004].

Daher gibt es in vielen Bereichen der Technik zum Teil seit Jahrzehnten spezifisch abgestimmte und bewährte Entwicklungsmethodiken, die zum Teil sogar in technischen Richtlinien festgeschrieben sind. Der Maschinenbau, die Systemtechnik und die Elektrotechnik beschäftigen sich seit langem mit der Struktur der Entwicklungsprozesse. Auch in neueren Disziplinen wie der Informationstechnik gibt es Vorgehensweisen für die Erstellung von Software. Die Mechatronik ist

der erste Bereich, der sich explizit mit der Vorgehensweise zur Entwicklung disziplinübergreifender Produkte beschäftigt und in dem dafür eine Richtlinie erarbeitet wurde.

Aus wissenschaftstheoretischer Sicht erscheint es sinnvoll, zunächst einmal diese bestehenden Methodiken in den verschiedensten Bereichen der Technik gegenüberzustellen und auf ihre Verwendbarkeit hin zu untersuchen. Dazu müssen ihre Voraussetzungen und ihr Anwendungszusammenhang diskutiert werden, um festzustellen, ob eine direkte oder modifizierte Übertragung auf die Erfordernisse der Mikrosystemtechnik möglich ist.

4.1 Allgemeine Lösungsprozesse

Die Lösung konstruktiver Aufgabenstellungen beruht im Allgemeinen auf Analyse- und Synthesevorgängen, die in Arbeits- und Entscheidungsschritten iterativ durchlaufen werden. Dieser elementare Denkprozess wird auch als TOTE (Test-Operate-Test-Exit)-Einheit bezeichnet [EHRENSPIEL03, S. 77; PAHL03, S. 61] und wurde ursprünglich von Miller, Galanter und Pribram [MILLER60] geprägt, Bild 4.1. Danach geht einer Handlungsoperation stets eine Prüfoperation (Test) voraus, in der die Ausgangssituation analysiert wird. Erst dann wird die gewählte Handlungsoperation (Operate) durchgeführt. Anschließend erfolgt wieder eine Überprüfung (Test), um den erreichten Zustand zu prüfen. Erst mit zufriedenstellendem Ergebnis wird der Prozess verlassen (Exit) [PAHL03, S. 61].

Um eine über längere Zeiträume laufende Entwicklung eines Produktes überschaubar und damit kontrollierbar zu halten, wird der Produktentwicklungsprozess üblicherweise in Phasen mit klar abgegrenzten Inhalten unterteilt. Diese zeitlichen Abschnitte eines Projektes sind üblicherweise mit Meilensteinen zur Überprüfung der Ergebnisse abgegrenzt [DOBBERKAU02, S. 6].

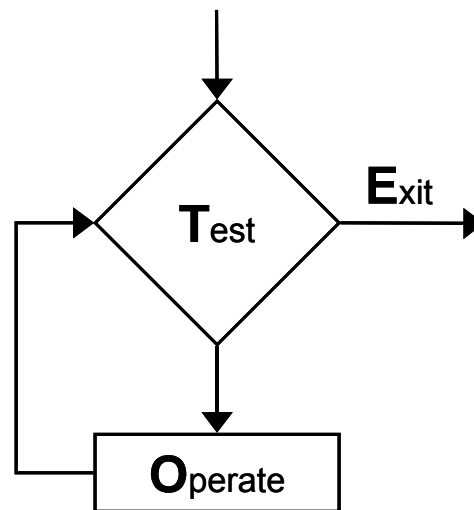


Bild 4.1: Elementarer Denkprozess [nach PAHL03, S. 61]

4.2 Entwicklungsmethodiken im Maschinenbau

Ausgangssituation

Im Maschinenbau liegen jahrzehntelange Erfahrung in Konstruktion und Produktion vor. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung konnte ein umfangreiches Erfahrungswissen angesammelt werden, auf das heute, oft mit Unterstützung durch geeignete EDV-Anwendungen, zurückgegriffen werden kann.

Bei der Konstruktion können daher zahlreiche erprobte und international genormte Bauelemente oder Werkstoffe verwendet werden. Wichtige Eigenschaften, wie z. B. Lebensdauer und Belastbarkeit, sind oft aufgrund von Erfahrungswerten oder Berechnungen bekannt. Aber auch die Form und damit z. B. die Baugröße und das Gewicht eines Bauelements sind in vielen Fällen optimiert. Für neue Teile stehen geeignete Simulations- und Berechnungsprogramme zur Verfügung, um die Eigenschaften abzusichern. Für viele Teilprobleme gibt es zahlreiche Erfahrungswerte und Lösungsmöglichkeiten. In CAD-Systemen kann auf Bauelemente oder ganze Baugruppen in Normteillibliotheken zurückgegriffen werden, die für den speziellen Anwendungsfall zusammengesetzt werden. Die weitgehende Normung der Bauelemente verringert den Konstruktionsaufwand, senkt die Kosten durch hohe Stückzahlen und eine überschaubare Lagerhaltung von Normteilen und ermöglicht einen einfachen Austausch von Teilen im Schadensfall.

Auch die Fertigungsverfahren sind hinsichtlich ihrer Grenzen und Möglichkeiten weitgehend erforscht. Dadurch existieren für die Konstruktion klare Vorgaben für herstellbare Geometrien oder Oberflächenqualitäten und für geeignete Werkstoffe. Fertigungsabläufe und damit Fertigungszeiten und -kosten sind relativ sicher zu bestimmen.

Methodiken

Im Maschinenbau gibt es eine im Vergleich zu anderen Disziplinen lange Tradition der methodischen Vorgehensweise in der Entwicklung. Der Mangel an erfahrenen Ingenieuren in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg führte zu dem Bedarf, Konstruieren „lernbar“ zu machen [BISCHOFF91, S. 17, HÖHNE02].

Die Grundlagen wurden aufbauend auf Ansätzen von unter anderem Kesselring [KESSELRING42] und Wögerbauer [WÖGERBAUER43] Anfang der 1950-er Jahre von Bischoff, Bock und Hansen zunächst bei Zeiss Jena und später an der TH Ilmenau gelegt („Ilmenauer Schule“) und mündeten in diversen Büchern [BISCHOFF53, HANSEN56].

Ab Beginn der 1970-er Jahre wurde zunächst die VDI-Richtlinie 2222 (1973) [VDI2222] und später die VDI-Richtlinie 2221 (1985) [VDI2221] erarbeitet, an der eine ganze Reihe von Autoren aus Deutschland beteiligt waren. Ergänzend beschäftigt sich die VDI-Richtlinie VDI 2223 [VDI2223] speziell mit dem Entwurf technischer Systeme. Diese Richtlinien können mit zwischenzeitlichen Überarbeitungen heute als Standard für die Entwicklung im Maschinenbau angesehen werden.

Die VDI-Richtlinie 2222 beschreibt einen Vorgehensplan und Methoden zum Konzipieren technischer Produkte mit einem Schwerpunkt auf der Entwicklung neuer Produkte. Die VDI-Richtlinie 2221 schlägt ein generelles Vorgehen zum Entwickeln technischer Produkte mit einem breiten Anwendungsbereich vom Maschinenbau über die Feinwerktechnik und Softwaretechnik bis hin zu verfahrenstechnischen Anlagen vor [PAHL03, S. 21].

Der Ablauf der Entwicklung mechanischer Produkte beruht danach auf dem in der VDI 2221 festgelegten Phasenmodell, das ursprünglich von Pahl und Beitz

aus der Vorgehensweise in der Praxis abgeleitet wurde und heute allgemein anerkannt ist. Gegenüber früheren Modellen, gerade auch in der internationalen Literatur [DIXON66, JOHNSON78], legen Pahl/Beitz einen besonderen Schwerpunkt auf die frühen Phasen, indem sie Methoden für die Generierung von Konzepten bereitstellten [KLAUBERT98, S. 20].

Der Vorgehensplan der VDI 2221 sieht sieben grundlegende Arbeitsschritte vor, Bild 4.2, die nach Pahl/Beitz in die groben Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten eingeordnet sind, Bild 4.2 [PAHL03, S. 169 ff.]. Die einzelnen Schritte können bei Bedarf auch iterativ wiederholt werden [PAHL03, S. 169].

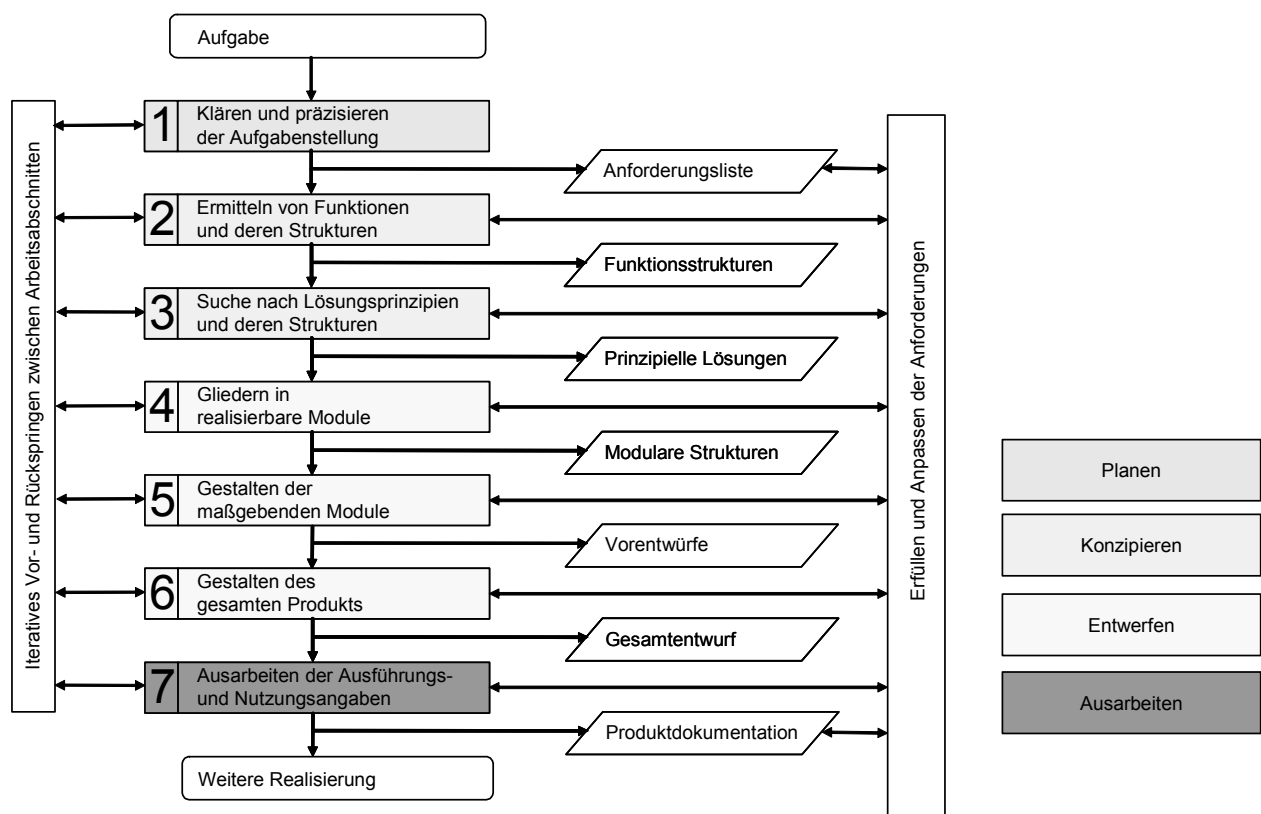


Bild 4.2: Vorgehen beim Entwickeln technischer Produkte [nach VDI2221, S. 28]

Das **Klären der Aufgabe** dient dem Verständnis der Problemstellung und der Randbedingungen der Entwicklung. Dazu werden Anforderungen in einer Anforderungsliste gesammelt, die in einer klaren Aussage zum Kernproblem der Entwicklungsaufgabe münden.

Das **Konzipieren** beschäftigt sich mit der Sammlung, Bewertung und Auswahl von Ausgangsideen für ein Lösungskonzept. Dazu erfolgt zunächst eine systematische Analyse der geforderten Funktionen und ihres Zusammenhangs in Form einer Funktionsstruktur. Darauf aufbauend werden Lösungsprinzipien gesucht, die in Form von ersten Skizzen, groben Ideen und grundlegenden Funktionsprinzipien zur Lösung der Aufgabenstellung beitragen.

Das **Entwerfen** umfasst das Erstellen von konkreteren Entwürfen der Konzepte und ihre erste Detaillierung. Dazu wird die prinzipielle Struktur in realisierbare Module gegliedert und diese werden entworfen. Es entstehen maßstäbliche Darstellungen des Produktes, Festlegungen zu den groben Abmessungen und die Umsetzung und Optimierung konkreter Funktionsprinzipien.

Durch das abschließende **Ausarbeiten** der Produktdokumentation werden die endgültige Gestalt des Produktes festgelegt, funktionale und wirtschaftliche Berechnungen durchgeführt und insbesondere die Voraussetzungen für die Herstellung geschaffen.

Hauptvorteil dieser Vorgehensweise ist die Vorgabe eines einfach abzuarbeitenden Vorgehensmodells, das von erfahrenen Ingenieuren intuitiv angewandt wird, aber auch von weniger erfahrenen Ingenieuren ohne Probleme nachzuvollziehen ist. Durch die genaue Definition des Problems in Form einer Anforderungsliste, die umfassende Lösungssuche zu Beginn und die systematische Selektion der besten Lösung entstehen abgesicherte Lösungen.

Neben der VDI-Richtlinie 2221 werden von einer Reihe von Autoren Vorgehensmodelle beschrieben, die aber von der grundsätzlichen Vorgehensweise her ähnlich sind, Tabelle 4.1.

Roth [ROTH94A] bezeichnet seine Vorgehensweise als „Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen“ [ROTH71, S. 338]. Sie entspricht denen in VDI-Richtlinie 2221, von Pahl/Beitz und eigenen Ansätzen. Roth ergänzt die gestaltende Phase um den Einsatz von Konstruktionskatalogen, von denen er auch zahlreiche Beispiele liefert [ROTH94B]. Er empfiehlt algorithmierbare Einzelschritte mit dem Ziel einer starken Integration des Rechners in den Entwicklungsprozess [ROTH71, S. 338].

VDI 2221/2222	Roth	Pah/Beitz	Koller	Rodenacker
<p>Planen eines Produktes Konzipieren (Klären der Aufgabenstellung, Erstellung der Anforderungsliste, Ermittlung der Gesamtfunktion, Strukturieren in Teilfunktionen, Kombination, Variation, technische wirtschaftliche Bewertung)</p>	<p>Stellung der Aufgabe Aufgabenformulierungsphase (Formulierung der Aufgabenstellung, Funktionssätze, Anforderungsliste)</p> <p>Funktionelle Phase (Entwicklung einer allgemeinen, physikalischen und logischen Funktionsstruktur)</p>	<p>Stellung der Aufgabe Klären der Aufgabe (Erstellung der Anforderungsliste)</p> <p>Konzipieren (Ermittlung der Funktionsstruktur und Lösungsprinzipien, technische wirtschaftliche Bewertung)</p>	<p>Planen eines Produktes Klären der Aufgabenstellung Funktionsstruktursynthese (Ermittlung der Gesamtfunktion, Funktionsstruktur, Elementarfunktionsstruktur, Grundoperationsstruktur, technisch-wirtschaftliche Bewertung)</p>	<p>Stellung der Aufgabe Festlegung der wesentlichen Merkmale (Ermittlung und Auswahl logischer, physikalischer, konstruktiver Wirkzusammenhänge)</p>
<p>Entwerfen (Entwerfen eines maßstäblichen Entwurfes, technisch-wirtschaftliche Bewertung, Optimierung)</p>	<p>Gestaltende Phase (Formgestaltung: geometrisch-stoffliche Produktgestaltung, Struktur-Gestaltung, Kontur-Gestaltung, technische wirtschaftliche Bewertung)</p>	<p>Entwerfen (Gestaltung, Feingestaltung, Bewertung)</p>	<p>Qualitative Synthese (Erarbeitung von Effektivvarianten, Effekträgervarianten, Prinzipvarianten, Gestaltvarianten der Bauteile, Baugruppen und Systeme, technisch-wirtschaftliche Bewertung)</p>	<p>Festlegung der Gesamtkonstruktion (Festlegung der Forderungen an die Gesamtkonstruktion, Erfüllung der Forderungen durch Komponenten, Vereinigung von Kern und Komponenten zur Gesamtkonstruktion, Festlegung der Gesamtkonstruktion)</p>
<p>Ausarbeiten / Detaillieren (Einzelteile gestalten, Kosten überprüfen, Gestaltung des Produktes, Produktdokumentation)</p>	<p>(Herstellungsgestaltung: herstellungstechnische Produktgestaltung, fertigungs-, montage-, transport-, recyclinggerechte Gestaltung, technisch-wirtschaftliche Bewertung, Erstellung von Vorschriften)</p>	<p>Ausarbeiten (Vervollständigen der fertigungstechnischen Unterlagen, Verfassung der Montage- und Transportvorschriften, Prüfung der Unterlagen)</p>	<p>Quantitative Synthese (Durchführung von Berechnungen, Dimensionierungen, Bemaßungen, technisch-wirtschaftliche Bewertung, Erprobung, Freigabe, Erstellung des endgültigen Entwurfes, Detaillierung, Erstellung aller Fertigungsunterlagen)</p>	

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung von Vorgehensmodellen für den Maschinenbau

Pahl/Beitz [PAHL03], die an den VDI-Richtlinien maßgeblich mitgearbeitet haben, stellen in ihren Ausführungen eine „Konstruktionslehre für alle Phasen des Produktplanungs-, -entwicklungs- und -konstruktionsprozesses für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau“ dar. Wesentliche Elemente sind eine systemorientierte Vorgehensweise und eine starke Einbindung von Methoden in die einzelnen Entwicklungsphasen.

Auch Koller [KOLLER94A] orientiert sich an den Phasen nach Pahl/Beitz. Er betont den Zusammenhang zwischen den Funktionen der Funktionsstruktur und den dazugehörigen Effekten für die Realisierung, die dann in einer abschließenden Phase quantitativ ausgestaltet und in konkrete Bauelemente umgesetzt werden. Koller zerlegt die Gesamtfunktion in nicht weiter gliederbare Elementarfunktionen mit dem Ziel eines stark algorithmierten Arbeitsablaufs.

Rodenacker [RODENACKER76] gliedert seine Vorgehensweise in drei Arbeitsschritte, die er mit den Begriffen „Funktion“ „Physik“ und „Konstruktion“ bezeichnet [CLAUSSEN98, S. 37]. Die in der Aufgabenstellung geforderten Wirkzusammenhänge werden schrittweise durch logische, physikalische und konstruktive Wirkzusammenhänge erfüllt. Rodenacker vergleicht die Arbeitsweise des Ingenieurs mit der Arbeit des Naturwissenschaftlers und leitet daraus die einzelnen Arbeitsschritte oder Konkretisierungsebenen ab. Der Naturwissenschaftler betreibt danach Analyse, indem er von der Betrachtung der Wirklichkeit ausgeht und abstrakte Gesetze sucht. Der Ingenieur geht den umgekehrten Weg mit dem Ziel der Synthese, indem er von der abstrakten Forderung in Form der Funktion ausgeht und konkrete Lösungen sucht [MATTHIESEN02, S. 11]. Ausgehend von den festgelegten wesentlichen Merkmalen nutzt Rodenacker dann bekannte Wirkprinzipien für die Umsetzung in konkrete Lösungen [RODENACKER76, S. 184].

Auch in der internationalen Literatur finden sich Vorschläge für Vorgehensweisen, die aber meist weniger umfassend sind und grundsätzlich auf der gleichen Vorgehensweise beruhen. Beispielhaft seien hier die Vorgehensmodelle von Hatamura [HATAMURA99, S. 4] aus Japan und Roozenburg [ROOZENBURG95, S. 88] aus den Niederlanden aufgeführt. Auch sie unterscheiden sich in der grundsätzlichen Vorgehensweise nicht von der nach VDI-Richtlinie 2221.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die bisher dargestellten Vorgehensmodelle im Maschinenbau in ihrem grundsätzlichen Aufbau der Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 2221 entsprechen.

Darüber hinaus wurden eine Reihe weiterer Modelle entwickelt, die aber grundsätzlich auf den gleichen Ansätzen beruhen und diese weiterführen. So verfolgt Lindemann einen Ansatz, der die Vorgehensweise flexibler gestaltet, Bild 4.3.

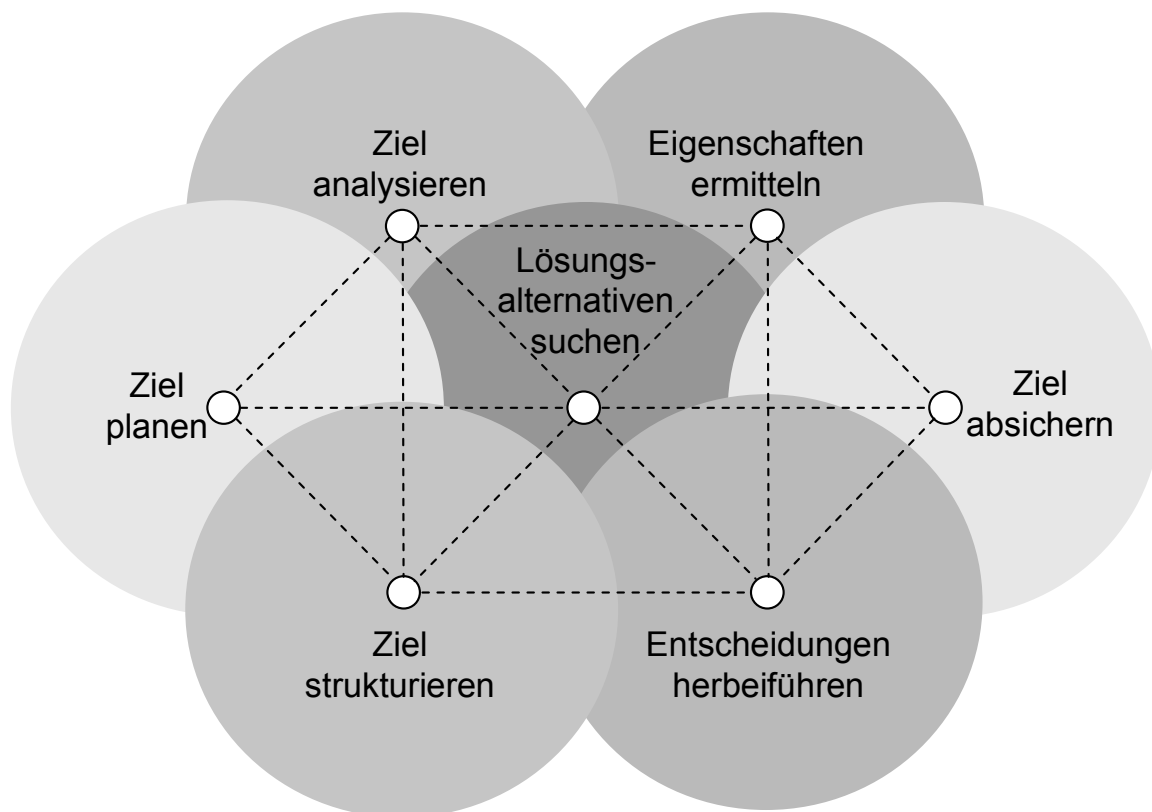


Bild 4.3: Münchener Vorgehensmodell [nach LINDEMANN04, S. 40]

Das Münchener Vorgehensmodell wurde auf Basis bekannter Vorgehensmodelle, diverser Forschungsprojekte und unter Einbindung der industriellen Anwendung entwickelt [LINDEMANN04, S. 39].

Der Hauptunterschied zu vorher bestehenden Modellen ist der Aufbau in Form eines Netzwerks. Damit bildet das Modell den sprunghaften Verlauf realer Entwicklungsprozesse besser ab. Das Element „Ziel planen“ enthält die Analyse der Situation und vorhandener Produkte mit dem Ziel der Vorbereitung der Produkt- und Prozessplanung. Konkrete Anforderungen an das neue Produkt werden unter „Ziel analysieren“ geklärt. „Ziel strukturieren“ steht für die Zerlegung in Teil-

probleme und die Ableitung konkreter Entwicklungsziele. Die „Suche nach Lösungsalternativen“ besteht aus der Ermittlung von Teillösungen und deren Kombination zu einer möglichst optimalen Gesamtlösung. „Eigenschaften ermitteln“ dient der Analyse von Lösungsalternativen zur Vorbereitung des Elementes „Entscheidungen herbeiführen“. Zur Verminderung von Risiken erfolgt eine „Zielabsicherung“, um mögliche Risiken zu erkennen und zu minimieren. Der flexible Aufbau des Modells ermöglicht den Einsatz sowohl in der Planung, als auch zur Orientierung in und zur Reflexion von Prozessen [LINDEMANN04, S. 40 ff.].

Übertragbarkeit auf die MST

Im Unterschied zur Mikrosystemtechnik werden im Maschinenbau in der Regel weniger interdisziplinäre Fragestellungen gelöst. Dadurch reduziert sich die Schnittstellenbetrachtung oft auf mechanische Verbindungen, und bei der Systembetrachtung haben Signal- und Informationsfluss eine geringere Bedeutung. Auch Störeinflüsse spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die Produktgestaltung erfolgt insgesamt eher geometrie- und weniger funktionsorientiert als in der Mikrosystemtechnik. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen in der Entwicklung sind für viele technische und technologische Fragestellungen allgemein zugängliche Lösungen oder gar Normteile vorhanden. Herstellungstechnologien sind in der Regel ausgereift und ihre Grenzen allgemein bekannt. Damit liegen im Maschinenbau andere Voraussetzungen als in der Mikrosystemtechnik vor, und es werden andere Anforderungen an eine Entwicklungsmethodik gestellt. Insbesondere der Aspekt der Interdisziplinarität fehlt in den maschinenbauspezifischen Entwicklungsmethodiken weitgehend, obwohl die Bedeutung des Systemzusammenhangs heutzutage auch bei komplexen Maschinen gestiegen ist. Daher ist zwar die grundsätzliche Vorgehensweise in den verwendeten Phasen übertragbar, aber wesentliche Besonderheiten der Mikrosystemtechnik können nur unzureichend berücksichtigt werden.

4.3 Entwicklungsmethodiken der Elektrotechnik

Ausgangssituation

Die Elektrotechnik ist der Bereich der Technik, der sich mit allen Aspekten der Elektrizität befasst. Grundsätzlich unterschieden werden die Bereiche Energietechnik (Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie), Antriebstechnik (Elektrische Maschinen), Automatisierungstechnik (Steuer-, Regelungs- und Messtechnik), Nachrichtentechnik (Informations- und Kommunikationstechnik) und Elektronik (Herstellung elektronischer Bauelemente).

In der konventionellen Elektrotechnik werden Systeme aus diskreten Bauelementen aufgebaut, die meist elektrisch verbunden sind. Das Spektrum der Bauelemente ist sehr vielfältig und reicht von Generatoren und Motoren bis zu Kondensatoren, Widerständen oder Transistoren. Unabhängig von der Größe, die bis in den Bereich von wenigen Millimetern hinuntergeht, werden aber immer mehrere klar getrennte Bauelemente benötigt, um ein funktionsfähiges System zu erstellen.

Die Mikroelektronik als Teilbereich der Elektronik beruht auf der Integration und der Miniaturisierung elektronischer Schaltkreise. Die Abmessungen der verwendeten Bauelemente sind meist sehr klein und liegen mit modernen Fertigungsverfahren deutlich unter $1\ \mu\text{m}$. Bei der Fertigung werden auf einem Substrat, meist aus monokristallinem Silizium, verschiedene Arten von Transistoren, Widerständen, Kondensatoren oder Halbleiterbauelementen erzeugt. Die Hauptvorteile so erzeugter Bauelemente liegen in ihrer platzsparenden und betriebssicheren Arbeitsweise zu einem günstigen Preis.

Zur Herstellung werden Halbleiterfertigungsverfahren verwendet, die sehr spezialisiert und auf die Erfordernisse der Mikroelektronik zugeschnitten sind. Typische Verfahren beruhen auf der Festlegung der gewünschten Strukturen durch Fotolithographie und der anschließenden Strukturierung mit verschiedenen physikalischen oder chemischen Prozessen. Auf einem Silizium-Wafer werden meist mehrere solcher integrierter Schaltkreise (Chip) gleichzeitig hergestellt (Batch-Fertigung) und nach der Trennung in Gehäuse eingebaut (Packaging). Die elektrische Kontaktierung der Chips mit den äußeren Anschlüssen des Gehäuses er-

folgt in der Regel über Bonden mit Aluminium- oder Golddrähten oder mit Flip-Chip-Techniken. Die so erzeugten integrierten Schaltungen werden oft mit anderen elektronischen Bauelementen auf Platinen zu komplexen Schaltungen verbunden.

Typische Anwendungsgebiete der Mikroelektronik liegen insbesondere in der Informations- und Kommunikationstechnik, aber auch in der Automatisierungstechnik und den anderen Teilgebieten der Elektrotechnik. Mikroelektronische Bauelemente sind heute aus vielen Bereichen der Technik und des Alltags nicht mehr wegzudenken.

Die Mikroelektronik hat insbesondere durch ähnliche Strukturen und Herstellungstechniken eine relativ enge Verwandtschaft zu Teilen der Mikrosystemtechnik. Sie ist allerdings auf in der Regel quasi zweidimensionale Strukturen und elektronische Funktionen beschränkt. Ein typisches Merkmal der Mikroelektronik ist, dass alle Bauelemente aus wenigen grundlegenden Funktionselementen wie z. B. Transistoren aufgebaut sind, deren Eigenschaften klar definiert sind. Aufgrund zunehmender Miniaturisierung und Integration nimmt die Zahl von Funktionselementen pro Flächeneinheit ständig zu, so dass mittlerweile mehrere Hundert Millionen Transistoren auf einer Chipfläche von wenigen mm^2 untergebracht werden.

Die Weiterentwicklung von mikroelektronischen Bauelementen ist gekennzeichnet von einer immensen Anzahl von Funktionselementen in einem Chip, stark ansteigender Komplexität, der Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszeiten und ständig wachsenden Anforderungen. Die Entwicklung ist daher nicht von Hand zu bewältigen, so dass in der Regel für den Entwurf integrierter Schaltungen vollautomatisierte Entwurfssysteme eingesetzt werden.

Elektronische und mikroelektronische Systeme unterscheiden sich in drei Merkmalen von mechanischen Systemen [KLAUBERT98, S. 23]: Zunächst einmal gibt es keinen direkten Zusammenhang der Funktion einerseits und der Geometrie oder auch Fertigung auf der anderen Seite. Dies führt dazu, dass in einem elektronischen Schaltkreis relativ einfach ein Bereich ausgeschnitten und durch einen anderen Bereich ersetzt werden kann, der sogar räumlich anders angeordnet sein kann, wenn eine elektrische Verbindung möglich ist. Damit sind ein ein-

facher Austausch und eine Weiterverwendung bereits vorhandener Schaltungsteile problemlos möglich. So kann ein neuer Chip relativ schnell aufgebaut und Entwicklungszeit gespart werden, wenn er auf einem alten Modell basiert.

Ein zweiter Aspekt ist der Aufbau von größeren Schaltungen, die immer aus sich wiederholenden Grundsaltungen zusammengesetzt sind, deren Funktion sich eindeutig beschreiben lässt. So kann ein komplexes System in Teilsysteme zerlegt werden, die wiederum aus Subsystemen bestehen. Diese Eigenschaft ermöglicht eine Top-Down Strategie bei der Entwicklung, also die Gesamtschaltung mit einem Blockschaltbild zu beginnen, indem die einzelnen Funktionsblöcke sowie deren grobe Verbindungen und Datenpfade eingezeichnet werden. Anschließend wird jeder einzelne Block weiter unterteilt und auf die gleiche Weise verfahren, bis die unterste Ebene erreicht ist.

Die Vorteile dieses Vorgehens liegen darin, dass so am Anfang das Gesamtsystem betrachtet wird und in kleinere, unabhängige und vor allem übersichtliche Subsysteme aufgeteilt wird. So kann ein ASIC (Application Specific Integrated Circuit) z. B. auch im Team von mehreren Mitarbeitern parallel entwickelt, synthetisiert und getestet werden. Über diese Vorgehensweise vom Großen zum Kleinen (Top-Down) werden schließlich Funktionselemente erreicht, deren Aufbau und Verhalten als Block bekannt ist und die daher problemlos realisiert werden können. Aus diesen Elementen lässt sich dann im umgekehrten Weg vom Kleinen zum Großen (Bottom-Up) über den Zwischenschritt „Teilsysteme“ ein passendes Gesamtsystem zusammensetzen.

Die dritte Besonderheit elektronischer Systeme ist, dass sie nicht wie mechanische Systeme intuitiv erfasst werden können. Die Komplexität der Systeme und die mangelnde Vorstellbarkeit von Elektronen, ihren Flüssen und Funktionen führen dazu, dass einmal erstellte Schaltungsblöcke für bestimmte Funktionen sehr oft wiederverwendet werden. Dadurch bauen neue Entwicklungen auf bereits vorhandenen Schaltungen für Teilaufgaben auf. Neue Schaltungen sind dann zwar oft nicht optimiert, aber aus bewährten und funktionierenden Teilsystemen zusammengesetzt.

Methodiken

Unter diesen Bedingungen entwickelte sich für die Mikroelektronik, insbesondere bei Logikschaltungen, eine stark an vorgegebenen Blöcken orientierte und durch CAD-Programme unterstützte Vorgehensweise, die einen schnellen und sicheren Schaltungsentwurf bei gleichzeitig steigender Komplexität ermöglicht, Bild 4.4.

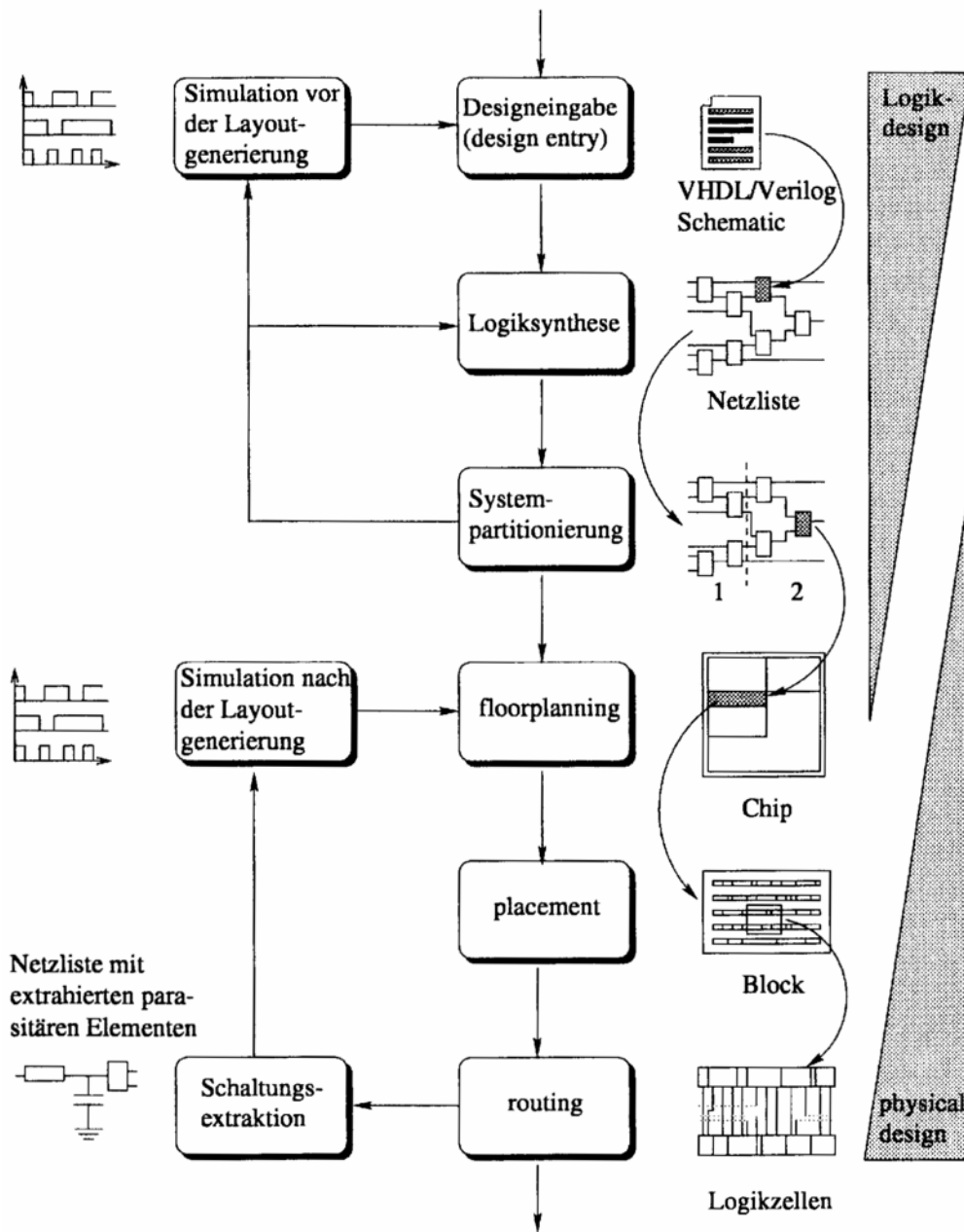


Bild 4.4: Entwicklungsprozess in der Mikroelektronik [SMITH97, S. 17]

Bei analogen und mixed-Signal-Schaltkreisen muss zusätzlich die Übertragungsfunktion optimiert werden, was speziellen Entwicklungsaufwand erfordert und zu Einschränkungen bei der Verwendung von Bibliotheken sowie bei der Geometrie führt.

In der Spezifikation wird zunächst die Aufgabenstellung auf Ebene des Gesamtsystems erfasst und dann in eine Beschreibung des anzustrebenden Verhaltens der Schaltung umgesetzt.

Nächster Schritt für einen Entwurf ist die Beschreibung des gewünschten Systemverhaltens in einer Hardwarebeschreibungssprache wie z. B. VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) oder Verilog oder eine symbolische Eingabe bereits existierender größerer Blöcke (schematic entry). Erfolgt die Designeingabe über eine Hardwarebeschreibungssprache, so hat diese die Form eines beschreibenden Textes. Diese Beschreibung kann sich auf das Verhalten der Schaltung, also auf die Abstraktionsschichten der Verhaltensebene oder aber auf die Strukturebene der Schaltung beziehen. Wird als Ausgangspunkt der schematic entry vorgezogen, so werden größere Einheiten aus einer Bibliothek entnommen und als Symbol in das Design eingefügt. Von diesen Einheiten sind Informationen über die Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie Modelle zur späteren Systemsimulation vorhanden. Durch die Logiksynthese für VHDL-Modelle wird eine Netzliste generiert, die aus Logikbausteinen und deren Verbindungen untereinander besteht. Das Gesamtsystem lässt sich nun in Subsysteme partitionieren oder wird direkt als Ganzes simuliert, um vor der Layouterzeugung noch Änderungen oder Anpassungen vornehmen zu können. Nach der erfolgreichen Simulation wird die Netzliste einem „Floorplanning“ unterzogen. Hierbei wird die topologische Anordnung der einzelnen Logikbausteine auf Flächennutzung und kurze Signalwege optimiert. Der „Routing-Prozess“ generiert schließlich die Lage der Verbindungsleitungen und die gesamte Schaltung wird einer letzten Simulation unterzogen, um das Zeitverhalten aller Subsysteme auf seine Richtigkeit hin zu überprüfen.

Bemerkenswert an dieser Top-Down-Strategie ist der kontinuierliche Wechsel zu tieferen Abstraktionsebenen innerhalb einer CAD-Umgebung. Neben der Verhal-

tens- und Layoutebene spielt aber in der Mikrosystemtechnik auch die Strukturebene eine wichtige Rolle.

Im Unterschied zum Maschinenbau gibt es in der Elektrotechnik kein allgemeines oder standardisiertes Vorgehen in Richtlinien analog zu den VDI-Richtlinien, sondern eher eine Orientierung an den Vorgaben des verwendeten CAD-Systems.

In einem anderen Teilbereich der Elektrotechnik, der Steuer- und Regelungstechnik, hat sich die in Bild 4.5 dargestellte Vorgehensweise bewährt.

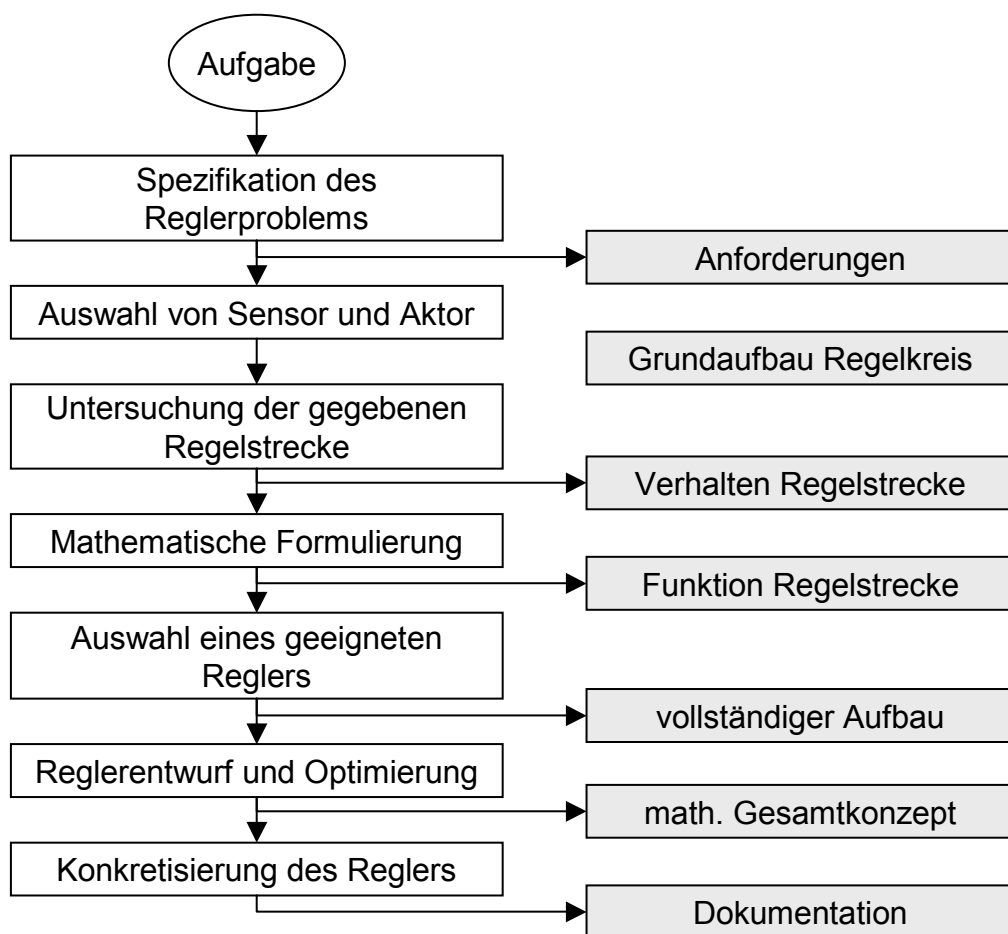


Bild 4.5: Vorgehensweise in der Steuer- und Regelungstechnik [nach KALLMEYER98, S. 42]

Das Regelproblem besteht im Normalfall aus einem Aktor, der auf Basis der Signale eines Sensors geregelt wird. Die zugrunde liegenden regelungstechnischen Probleme lassen sich in der Regel durch einen mathematischen Zusammenhang der Regelgrößen darstellen. Die Entwicklung beruht auf einer Umset-

zung dieses Zusammenhangs durch einen entsprechenden Regler mit zu bestimmenden Kennwerten. Ähnlich wie in der Elektronik ist auch hier die Vorgehensweise geprägt von vorgegebenen Blöcken, die geeignet kombiniert und bezüglich ihrer Kennwerte optimiert werden.

Übertragbarkeit auf die Mikrosystemtechnik

Der Entwicklungsablauf in der Mikroelektronik wird von einigen Autoren auch für die Mikrosystemtechnik vorgeschlagen. Bei genauerer Betrachtung unterscheidet sich die Mikroelektronik in einigen für den Entwurf wesentlichen Punkten von der Mikrosystemtechnik, Tabelle 4.1.

Kriterium	Mikroelektronik	Mikrosystemtechnik
Komponenten	standardisiert	vielgestaltig
Entwurf	automatisiert, basierend auf Blöcken	heterogen mit geringer Entwurfsunterstützung
Fertigung	standardisiert	aufgabenspezifisch
Stückzahlen	$10^5 \dots 10^8$	$10^2 \dots 10^6$
Anwendungen	elektronisch	mechanisch, elektronisch, fluidisch, ...
Strukturdimension	zweidimensional	dreidimensional

Tabelle 4.1: Vergleich typischer Eigenschaften von Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, aufbauend auf [GERLACH97, S. 14]

In der Mikroelektronik werden allerdings in erster Linie standardisierte Blöcke zu Schaltungen kombiniert. Während mikroelektronische Schaltungen aus wenigen vorgegebenen Bauelementen zusammengesetzt werden, gibt es eine Vielfalt an Möglichkeiten zur Realisierung z. B. sensorischer Funktionen in der Mikrosystemtechnik. Das Fehlen von Elementbibliotheken wie in der Mikroelektronik wurde schon 1994 beschrieben [SCHNAKENBERG94, S. 114 f.] und die Erstellung in Form einer generellen System-Designsoftware erscheint für die frühen Entwicklungsphasen zu umfangreich und deshalb nicht machbar [VDI94, S. 185]. Eine weitgehende Rechnerunterstützung in diesem Bereich konnte bis heute nicht nennenswert vorangetrieben werden, da der Entwurf in der Mikrosystemtechnik deutlich heterogener ist als in der Mikroelektronik. So fehlen in der Mikrosystemtechnik die entsprechenden Schnittstellen und genormten Bauelemente. Speziell

die Lösungsräume z. B. der mechanischen oder optischen Teilsysteme lassen sich nicht ausreichend standardisieren, ohne die Kreativität der Lösungen weitgehend einzuschränken.

Auch die Fertigung ist in der Mikroelektronik sehr stark standardisiert und wird daher im Gegensatz zur Mikrosystemtechnik in der Produktentwicklung praktisch überhaupt nicht berücksichtigt.

Weiter ist die Betrachtungsweise in der Mikroelektronik streng monodisziplinär, wodurch auch die Simulation im Rechner deutlich erleichtert wird. Da im Wesentlichen Informations- bzw. Signalflüsse betrachtet werden, sind die verwendeten Grundgeometrien relativ einfach, quasi zweidimensional, und können auch sehr flexibel optimiert werden.

Bei Mikrosystemen spielt die Gestaltung der Geometrie auch eine bedeutende funktionale Rolle und ist sowohl durch den ebenfalls auftretenden Stofffluss als auch durch die im Regelfall vorhandene dritte Dimension erheblich komplexer. Im Unterschied zu Chip-Entwurfssystemen müssen Entwurfswerkzeuge für Mikrosysteme in der Lage sein, dreidimensionale Strukturen, die zusätzlich noch aus verschiedenen Disziplinen integriert werden, abzubilden und zu optimieren [REICHL94, S. 3]. Simulations- und CAD-Werkzeuge sind daher auch i. A. nicht ohne Weiteres übertragbar.

Da mikromechanische Komponenten zum Teil analoger Natur sind, lässt sich die Hardwarebeschreibungssprache zum Entwurf digitaler Schaltungen nicht uneingeschränkt auf die Mikrosystemtechnik anwenden. Daher kann die Vorgehensweise in der Mikroelektronik nur für Teilbereiche der Entwicklungsaufgaben in der Mikrosystemtechnik verwendet werden.

Auch die Vorgehensweise in der Steuer- und Regelungstechnik ist speziell auf die Erfordernisse dieser Disziplin abgestimmt. Obwohl grundsätzliche Analogien zur Mikrosystemtechnik bestehen, weil Signale aufgenommen, verarbeitet und für Steuerungs- oder Regelungsaufgaben ausgegeben werden, ist der Entwicklungsablauf zu spezifisch und zu sehr auf vorgegebene Elemente fixiert. Eine Übertragung ist daher nicht möglich.

4.4 Entwicklungsmethodiken der Mechatronik und anderer Bereiche

Ausgangssituation

In der Mechatronik ergeben sich durch die Kombination mehrerer technischer Disziplinen, hier speziell der Mechanik, Elektronik und Informationstechnik, ähnliche Fragen wie in der Mikrosystemtechnik. Im Gegensatz zur Mikrosystemtechnik sind mechatronische Systeme in der Regel auf Basis eines mechanischen Systems aufgebaut, das dann um Elektronik und Informationstechnik ergänzt und dadurch in seiner Funktionalität wesentlich erweitert und optimiert wird. Allerdings ist das System grundsätzlich aus einzelnen Komponenten der Teildisziplinen zusammengesetzt. Daher gehen auch die Ansätze für Entwicklungsmethodiken in der Mechatronik von einer traditionellen Entwicklung der Komponenten aus, die dann in einem weiteren Schritt zu einem mechatronischen System kombiniert werden [ISERMANN03, S. 25 ff.].

Methodiken

VDI-Richtlinie 2422

Eine „Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik“ wird in der VDI-Richtlinie 2422 [VDI2422] vorgeschlagen. Da sie bereits 1994 veröffentlicht wurde, ist sie nicht explizit auf die Mechatronik ausgerichtet. Inhaltlich beschäftigt sich die Richtlinie aber mit Geräten, die aus Mechanik, Elektronik und Software bestehen [VDI2422, S. 3] und feinmechanische Aufbauten enthalten. Der Entwicklungsablauf ist klar nach diesen Komponenten gegliedert, Bild 4.6.

Von den grundsätzlichen Arbeitsphasen her orientiert sich die Richtlinie an der Vorgehensweise im Maschinenbau. Aufbauend auf einer präzisierten Aufgabenstellung wird zunächst ein Konzept für das gesamte Gerät entwickelt, das dann in Entwurf und Ausarbeitung getrennt nach den Teilbereichen weiterverfolgt wird. In der anschließenden Erprobungsphase wird dann die Funktion der Einzelkomponenten und schließlich das Gesamtgerät überprüft. Eine iterative Wie-

derholung der Arbeitsschritte ist ausdrücklich vorgesehen [VDI2422, S. 16]. Die Verbindung der Teilgebiete erfolgt, indem ausgehend vom Benutzerdialog die Teilaufgaben der Softwareentwicklung und dann darauf aufbauend die Teilaufgaben für die Schaltungsentwicklung jeweils mit ihren erforderlichen Schnittstellen festgelegt werden.

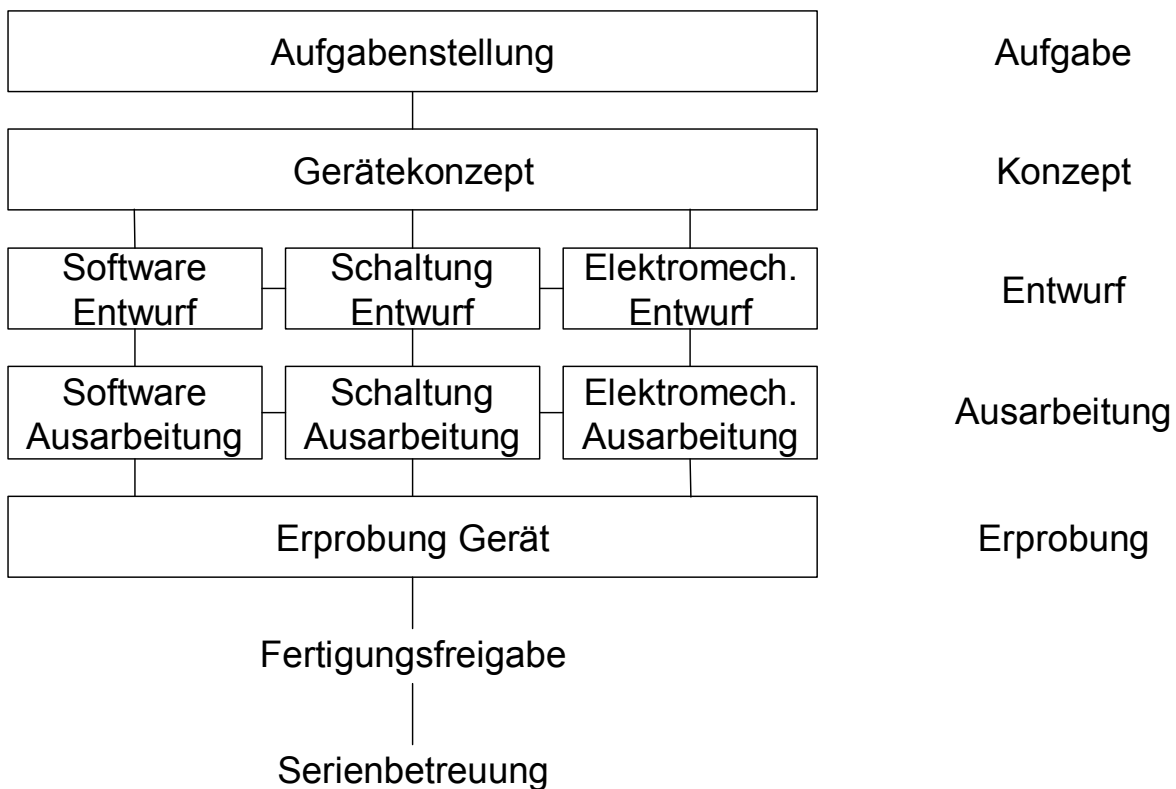


Bild 4.6: Vorgehensplan für die Entwicklung von Geräten mit Steuerung durch Mikroelektronik [VDI2422, S. 15]

VDI-Richtlinie 2206

Die grundsätzlich an den Teilsystemen orientierte Vorgehensweise bei der Entwicklung ist auch in die VDI-Richtlinie VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206] eingeflossen. Die Richtlinie beschreibt eine Vorgehensweise, die auf dem V-Modell der Informationstechnik beruht und dieses für mechatronische Systeme anpasst und wesentlich erweitert. Kleinster Baustein ist ein Problemlösungszyklus als „Mikrozyklus“, der den Produktentwickler vor allem „bei der Bearbeitung vorhersehbarer und damit planbarer Teil-

aufgaben, aber auch bei der Lösung plötzlich auftretender Probleme“ [VDI2206, S. 19] unterstützt (Bild 4.7).

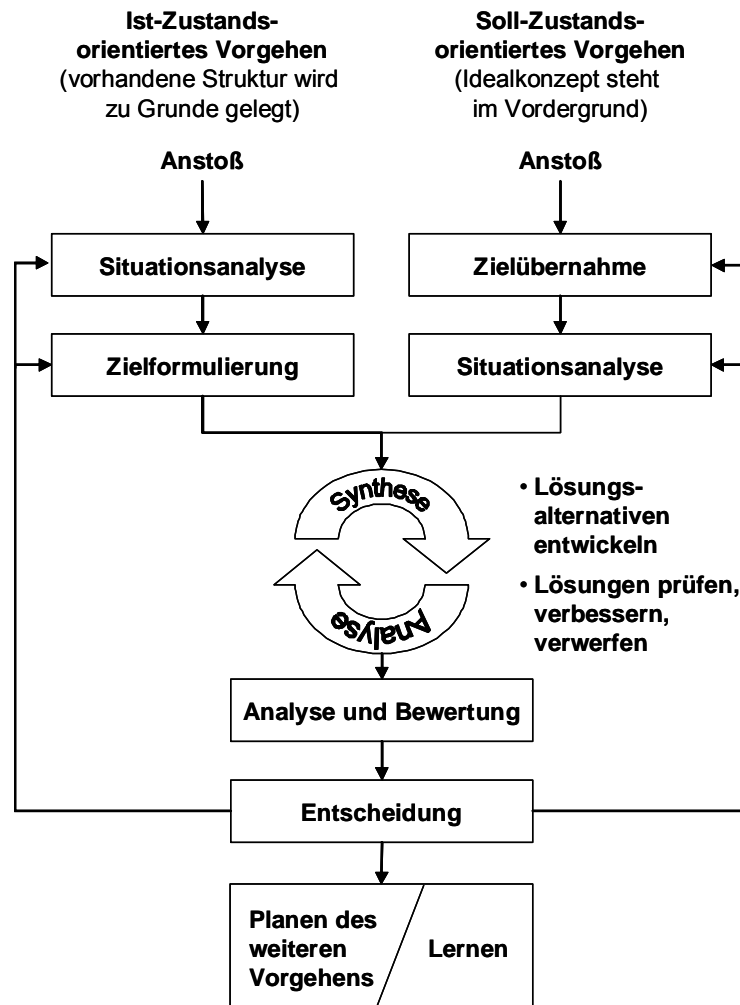


Bild 4.7: Mikrozyklus (Problemlösungszyklus) in der Mechatronik [VDI2206, S. 20]

Der Mikrozyklus unterscheidet ein Ist-Zustands- und ein Soll-Zustands-orientiertes Vorgehen gefolgt von iterativen Synthese- und Analyse-Schritten. Abschließend erfolgt eine Bewertung und eine Entscheidung für ein Ergebnis oder ein Rückspringen zum Anfang. Im Anschluss an die Entwicklung ist ausdrücklich eine Lernphase vorgesehen.

Das grundsätzliche Vorgehen in Form einer logischen Abfolge wesentlicher Teilschritte beschreibt das V-Modell der Mechatronik, Bild 4.8, das als Makrozyklus bezeichnet wird [VDI2206, S 22.]. Es empfiehlt einen Ablauf, der bei der Anwendung in der Praxis von der logischen Reihenfolge abweichen kann, um z. B.

kritische Teilsysteme zur Minimierung des Entwicklungsrisikos zeitlich vor davon abhängigen komplexen Gesamtsystemen zu entwickeln [VDI2206, S. 19].

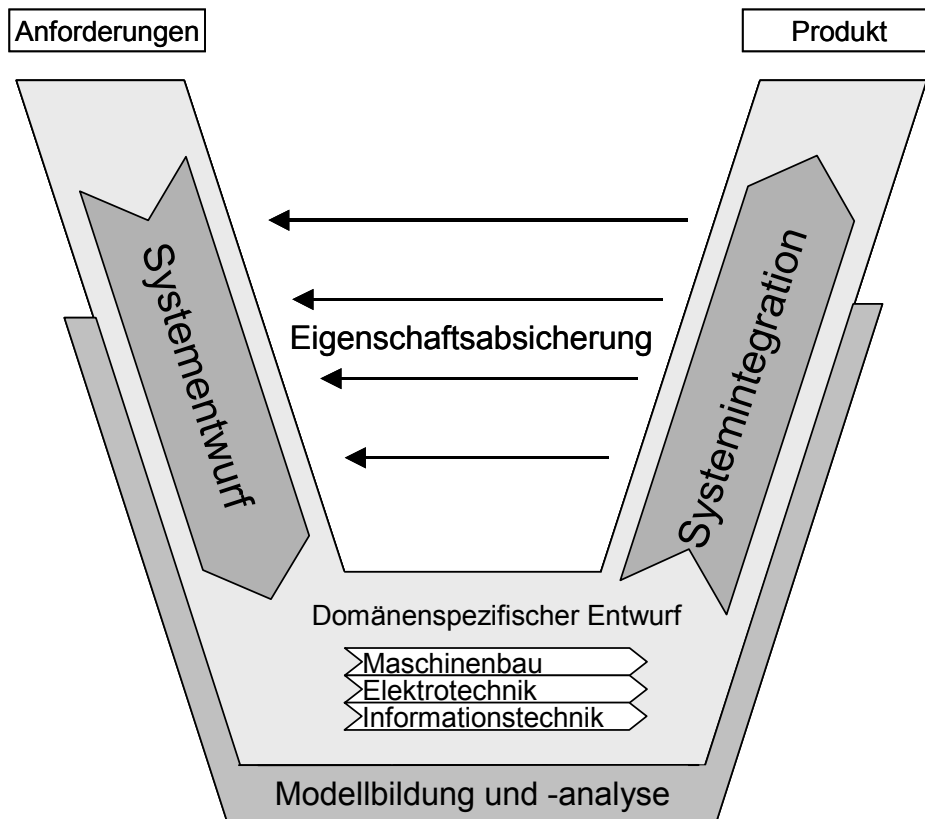


Bild 4.8: V-Modell der Mechatronik [VDI2206, S. 22]

Ausgehend von Anforderungen an das System wird zunächst die Gesamtfunktion des Systems in wesentliche Teilfunktionen zerlegt. Diesen werden geeignete Strukturen zugeordnet, die dann im Systemzusammenhang überprüft werden. Auf diese Weise wird das System entworfen und ein domänenübergreifendes Lösungskonzept festgelegt. Die weitere detaillierte Konkretisierung erfolgt meist getrennt in den beteiligten Domänen und nach den dort üblichen Vorgehensweisen; die Ergebnisse werden anschließend integriert. Der Entwurfsfortschritt wird fortlaufend anhand der Anforderungen überprüft und mittels Modellen und rechnergestützten Werkzeugen unterstützt. Ergebnis ist ein Produkt, worunter auch das Ergebnis von Zwischenstufen der Entwicklung, wie z. B. Labormuster oder Vorserienprodukte, verstanden wird. Das V-Modell wird damit schleifenartig und mit zunehmendem Reifegrad bis hin zum Serienprodukt mehrfach durchlaufen, Bild 4.9 [VDI2206, S. 19 ff.].

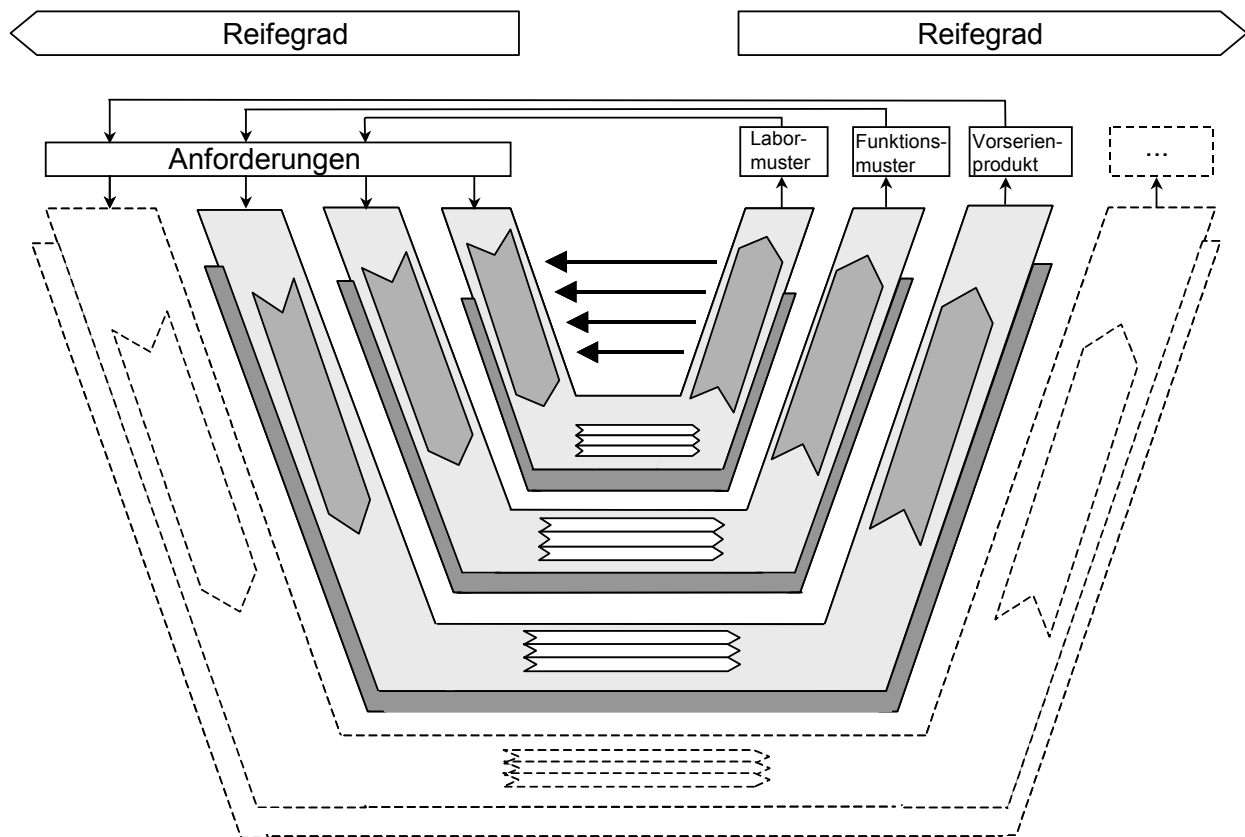


Bild 4.9: Durchlaufen mehrerer Makrozyklen mit zunehmendem Reifegrad [VDI2206, S. 23]

Ein weiteres Problem ist die grundsätzlich unterschiedliche Denkweise der Bereiche Maschinenbau und Elektrotechnik. Der Zusammenhang zwischen Funktion und Geometrie unterscheidet sich zwischen diesen Bereichen und beeinflusst den Entwicklungsprozess [KLAUBERT98, S. 101]. Mechanikingenieure arbeiten gestaltsorientiert, Elektro- und Regelungstechnikingenieure funktionsorientiert [GAUSEMEIER00, S. 50].

Die getrennte Entwicklung führt zu von Ehrlenspiel „geistige Mauern“ genannten Barrieren zwischen Abteilungen [EHRENSPIEL05, S. 29], wodurch die Entwicklung domänenübergreifender Systeme erheblich erschwert wird.

Übertragbarkeit auf die Mikrosystemtechnik

Die Vorgehensweise in der Mechatronik beruht zwar grundsätzlich auf einem interdisziplinären Ansatz, der aber auf die drei Domänen Mechanik, Elektrotechnik

und Informationstechnik beschränkt ist und die Domänen erst nach Fertigstellung der Teilmodule integriert.

Die VDI-Richtlinie 2422 ist technisch auf dem Stand der 1980er oder frühen 1990er Jahre, was aus den beschriebenen Programmiersprachen, dem diskreten Aufbau der elektronischen Schaltungen und der verwendeten Literatur erkennbar wird [VDI2422, S. 19 ff., S. 63 f.]. Für die Mikrosystemtechnik ist dieser Ansatz daher nicht verwertbar.

Nach VDI-Richtlinie 2206 erfolgt die Entwicklung der Komponenten unabhängig voneinander nach dem Vorgehen der Domänen und aufbauend auf deren Herstellungstechnologie. Dabei werden Entwicklung und Fertigung getrennt betrachtet, weil die Herstellungstechnologien in den Teildomänen in der Regel ausgereift sind. Ein Entwicklungsmodell für die Mikrosystemtechnik müsste hier offener für verschiedene Domänen gestaltet sein und zusätzlich technologische Fragestellungen frühzeitig mit einbeziehen. Die grundsätzliche Vorgehensweise in der Mechatronik erscheint aber am geeignetsten als Basis für die Mikrosystemtechnik, weil sie schon in Ansätzen interdisziplinär ist und eine Erweiterung möglich erscheint.

4.5 Entwicklungsmethodiken der Softwaretechnik

Ausgangssituation

Die Entwicklung von Software erfolgt stark in Modulen, die keinerlei geometrischen und herstellungstechnischen Vorgaben unterliegen. Begrenzend wirken hier bestenfalls die Möglichkeiten der Programmiersprachen. Es erfolgt in der Regel eine klare Abgrenzung mit definierten Schnittstellen, so dass eine getrennte Entwicklung der Module erfolgen kann. Diese können dann im Idealfall einfach zur Gesamtsoftware zusammengesetzt werden. Da der Gesamtumfang der Software sehr groß werden kann, ist oft eine Feinabstimmung des Gesamtpaketes notwendig.

Methodiken

In der Softwaretechnik gibt es eine Reihe von Modellen, die einen groben Rahmen für den Ablauf eines Software-Projektes darstellen. In einigen Organisationen sind entsprechende Prozessmodelle vorgeschrieben. Eine einheitliche Vorgehensweise existiert nicht, so dass in der Praxis auch eher Produkte als Prozesse wieder verwendet werden [Münch99, S. 6].

Ein Beispiel für ein einfaches Modell ist das Wasserfallmodell der Informatik. Es zeigt eine kaskadenförmige Anordnung der einzelnen Arbeitsschritte mit der Möglichkeit des Vor- und Rückspringens bei Bedarf, Bild 4.10.

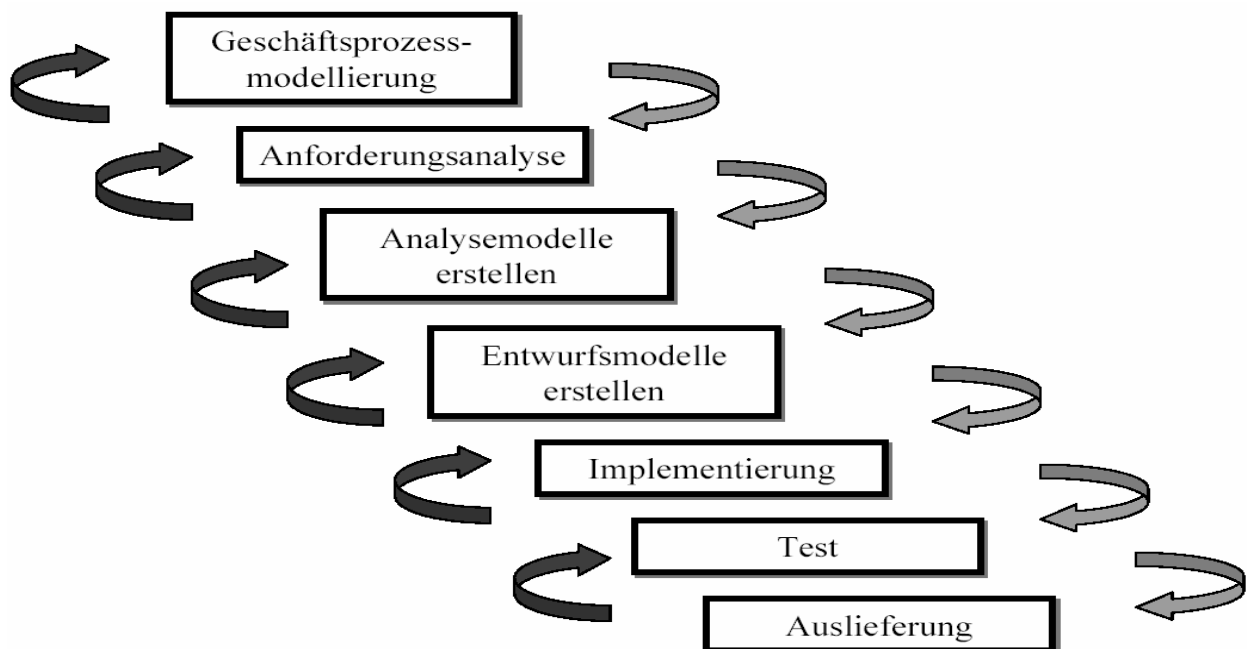


Bild 4.10: Wasserfallmodell der Informatik [nach GUMM00, S. 644]

Die Erstellung von Software erfolgt, abgesehen von z. B. CAE-Systemen im Bereich der Ingenieurwissenschaften, in vielen Bereichen, um Geschäftsprozesse abzubilden und durch Rechneranwendung zu unterstützen. Am Anfang der Entwicklung steht dann eine rechnergerechte Modellierung der Geschäftsprozesse mit einer sich daran anschließenden Anforderungsanalyse. Die Umsetzung in Software beruht sehr stark auf Modellen, die nach dem Wasserfallmodell als Analyse- und Entwurfsmodelle in den nächsten Schritten erstellt werden. Erst nach der anschließenden Implementierung, also der Umsetzung in den eigentlichen Programmcode, kann die Software getestet und abschließend ausgeliefert

werden. In vielen Fällen wird eine umfangreiche Aufgabe auch auf mehrere Informatiker verteilt, so dass Schnittstellen zu beachten sind, damit nach dem Zusammensetzen des Programmcodes die einzelnen Programmteile reibungslos zusammenarbeiten. Der Ablauf ist geprägt von Iterationen, die ausschließlich zwischen direkt aufeinander folgenden Arbeitsschritten und der vollständigen Bearbeitung der einzelnen Phasen ablaufen. Deshalb stellt das Wasserfallmodell ein sehr vereinfachtes Modell dar, weil in der Praxis die sequenzielle Abfolge kaum umzusetzen ist.

Wesentlich konkreter ist eine umfassende Erweiterung des Wasserfallmodells, das V-Modell der Softwaretechnik, das ursprünglich für Software-Entwicklungen des Bundesverteidigungsministeriums entwickelt und mehrfach erweitert wurde. Seit 1997 ist es aber auch für einige andere Bundesbehörden vorgeschrieben, findet außerdem Einsatz im Banken- und Versicherungswesen und wird zunehmend zu einem Industriestandard für Softwareerstellung. Es soll bei umfangreichen Softwareprojekten helfen, diese zielgerecht, strukturiert und produktiv umzusetzen. Die neueste Version ist das V-Modell XT (eXtreme Tailoring), bei dem die Anpassbarkeit an projektspezifische Probleme verbessert werden soll [V-MODELL05, S. 1-4].

Das sehr umfangreiche und komplexe V-Modell besteht grundsätzlich aus drei Ebenen, Bild 4.11:

- Die Vorgehensebene wird über das **Vorgehensmodell** beschrieben
- Die Methodenebene behandelt die **Methodenzuordnung**
- Die Werkzeugebene steht für **funktionale Werkzeuganforderungen**

In vier Submodellen regelt das V-Modell das Konfigurationsmanagement, das Qualitätsmanagement, das Projektmanagement und die eigentliche Softwareerstellung. Letztere ist im Vorgehensmodell genauer beschrieben, das die Form eines „V“ besitzt und dem Modell den Namen gibt.

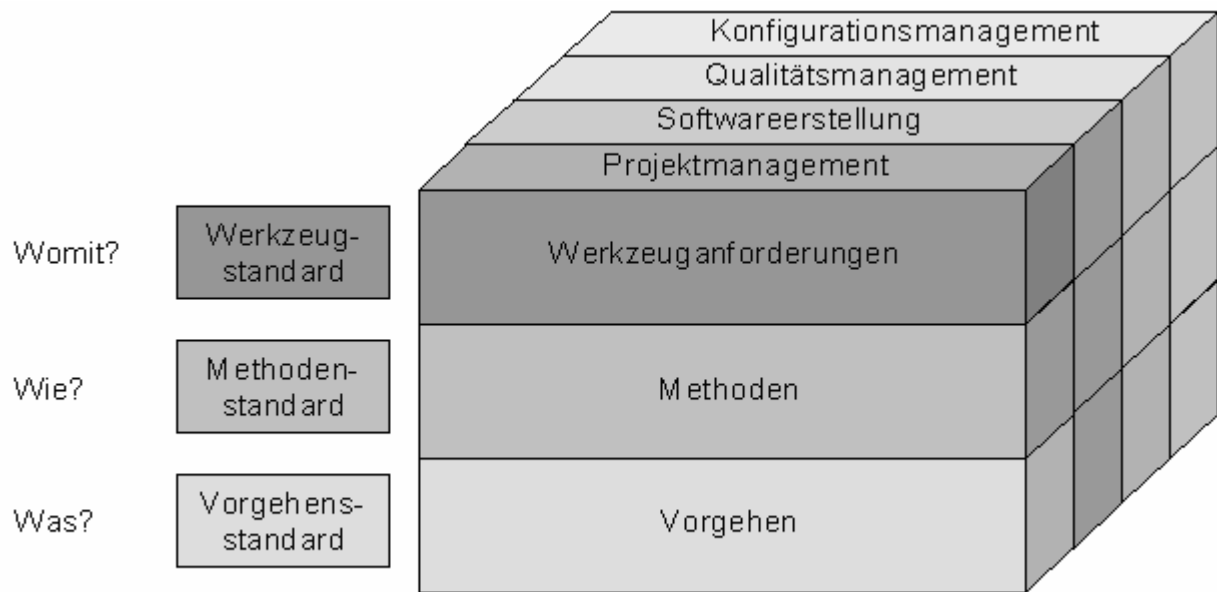


Bild 4.11: Struktur des Standardisierungskonzepts, nach [STANIEROWSKI02, Folie 25]

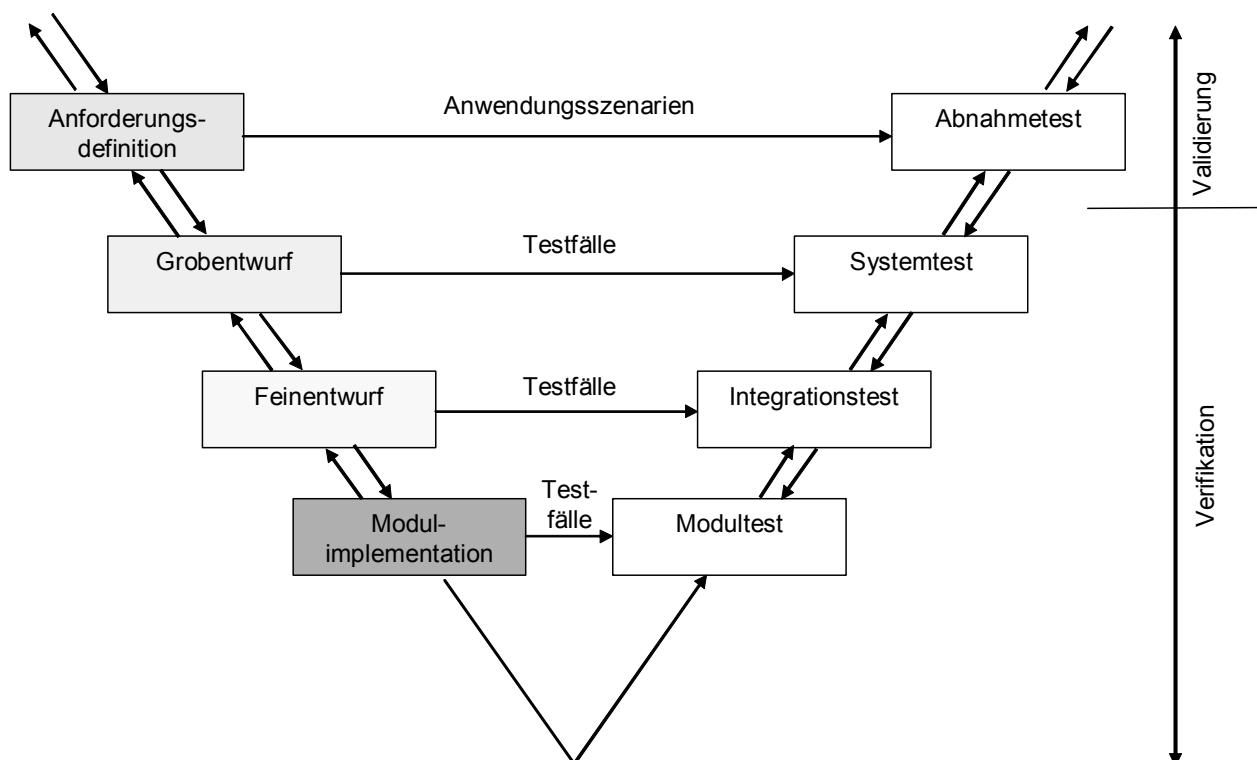


Bild 4.12: V-Modell der Informatik [BALZERT98, S. 101]

Das V-Modell beruht auf einer Top-Down-Vorgehensweise und geht von der Definition der Anforderungen an die Gesamtsoftware aus. Der Grundgedanke des

Vorgehensmodells ist es, das System in seiner Gesamtheit zu planen (Grobstruktur) und Schnittstellen für Teilabschnitte festzulegen. Diese werden dann im Feinentwurf zunächst genauer spezifiziert und detailliert. Die konkrete Softwareerstellung erfolgt dann in Form von Modulen, die unabhängig voneinander realisiert werden (Modulimplementation). Von der untersten Ebene der getesteten und fertigen Module ausgehend werden diese wieder zusammengefasst (Integration) und dann schließlich als Gesamtsystem realisiert und fertiggestellt. Der aufsteigende Ast des V-Modells enthält die Verifikation („Entspricht die Software der Spezifikation?“) auf Basis der bei der Zerlegung festgelegten Testfälle für alle Ebenen vom Modul bis hin zum abnahmefähigen Gesamtsystem, das dann validiert wird („Ist die Software für den Einsatzzweck geeignet?“). Zwischen den einzelnen Stufen sind jeweils Iterationen möglich. Das Gesamtmodell ist erheblich umfangreicher, weil es zusätzliche Modelle für die anderen Submodelle vorschreibt.

Durch seinen hohen Detaillierungsgrad und das eingebundene Projekt- und Qualitätsmanagement lassen sich mit diesem Modell auch umfangreiche Softwareprojekte gut steuern, allerdings bei hohem Aufwand und sehr starr vorgegebenen Ablaufschritten.

Übertragbarkeit auf die Mikrosystemtechnik

Da die Vorgehensweise auf eine Disziplin beschränkt ist, die völlig andere Vorgaben als die Mikrosystemtechnik erfordert und noch dazu zu keinerlei materiellen Produkten mit entsprechenden Technologieanforderungen führt, erscheint eine Übertragung auf die Mikrosystemtechnik grundsätzlich nicht möglich.

4.6 Zusammenfassung der Bewertung

Die Beurteilung der Eignung der dargestellten Methodiken aus unterschiedlichen Fachgebieten für die Mikrosystemtechnik erfolgt anhand der Anforderungen aus Kapitel 3. Zusammengefasst ergibt sich das in Bild 4.13 dargestellte Ergebnis.

Legende:		System betrachten	Störeinflüsse berücksichtigen	Schnittstellen-betrachtung	Interdisziplinär	Wissensmanagement	Technologie einbeziehen	Flexibel	Ganzheitlich
Maschinenbau	VDI 2221 und Varianten	●	○	○	○	○	○	●	●
	Lindemann	●	○	○	○	○	○	●	●
Elektrotechnik	Mikroelektronik	●	○	●	○	○	●	○	○
	Steuer- / Regelungstechnik	●	○	○	○	○	○	○	○
Software-technik	Wasserfallmodell	●	○	○	○	○	○	○	○
	V-Modell	●	○	●	○	○	○	●	●
Mechatronik	VDI 2422	●	○	○	●	○	○	○	○
	VDI 2206	●	○	●	●	○	○	●	●

Bild 4.13: Eignung der vorgestellten Methodiken für die Mikrosystemtechnik

Die domänenspezifischen Vorgehensmodelle sind von den Abläufen her unterschiedlich gestaltet und die einzelnen Arbeitsschritte stark an die jeweiligen Disziplin angepasst. Sie sind daher nicht ohne Modifikationen auf die Mikrosystemtechnik übertragbar. Eine einfache parallele Vorgehensweise in den verschiedenen Disziplinen wird den hohen Anforderungen an die Integration in der Mikrosystemtechnik nicht gerecht und ist daher auch nicht möglich. Eine im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methodik für die Mikrosystemtechnik sollte allen diesen Anforderungen gerecht werden.

Aus den beschriebenen Defiziten der bestehenden Ansätze ergibt sich der folgende Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Methodik für die Entwicklung von Mikrosystemen:

- Entwicklung eines Modells für die Vorgehensweise zur Entwicklung von Mikrosystemen. Dieses Modell muss vorrangig die unterschiedlichen Disziplinen integrieren und zusätzlich die parallele Entwicklung der Technologie angemessen berücksichtigen.
- Entwicklung von angepassten Methoden, um den Entwickler bei der Entwicklung von Mikrosystemen angemessen zu unterstützen.

5 Eine Methodik für die Mikrosystemtechnik

Eine einheitliche Methodik für alle Entwicklungsaufgaben in der Mikrosystemtechnik ist, allein schon aufgrund der vielfältigen Anforderungen und der unterschiedlichen Rahmenbedingungen nicht möglich. Daher kann die nachfolgend beschriebene Methodik nur einen Rahmen liefern, der den Entwicklungsablauf führt und an geeigneten Stellen unterstützt.

5.1 Grundsätzlicher Aufbau

Die hier vorgeschlagene Methodik beruht auf vier Elementen, die ineinandergreifen und eine flexible Vorgehensweise ermöglichen, Bild 5.1.

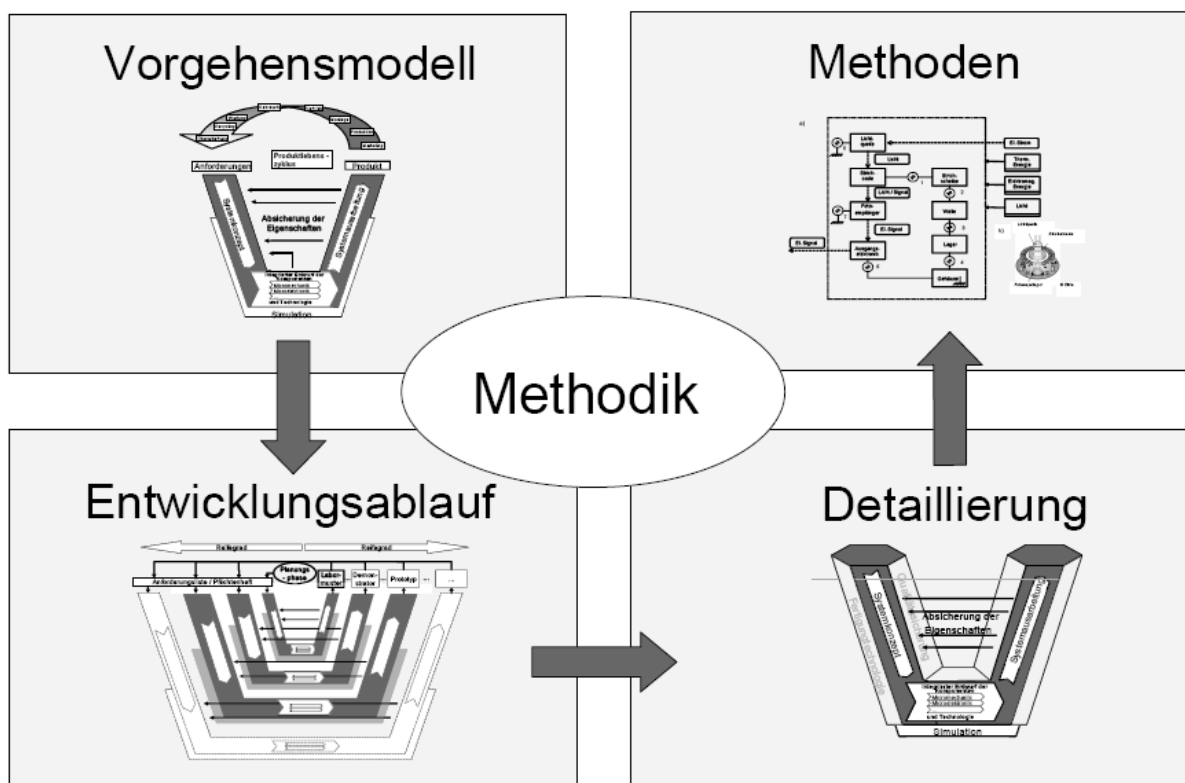


Bild 5.1: Basiselemente der Methodik

- Das **Vorgehensmodell** ist in Form eines “V” gestaltet und beruht auf der Vorgehensweise in der Softwaretechnik bzw. der Mechatronik. Es ist aber an die speziellen Erfordernisse der Mikrosystemtechnik angepasst und beschreibt das Vorgehen bei der Konzepterstellung und dem Entwurf von

Mikrosystemen. Dieses Vorgehensmodell wird während des Entwicklungsablaufs mehrfach durchlaufen, wobei die Ergebnisse dem Endergebnis der Entwicklung, im Normalfall einem Serienprodukt, immer näher kommen.

- Der **Entwicklungsablauf** gibt dafür einen übergeordneten allgemeinen Rahmen vor. Dieser besteht aus einer Reihe von Entwicklungsschleifen, die jeweils die Form des Vorgehensmodells haben und nacheinander mit zunehmender Produktreife iterativ durchlaufen werden.
- Eine isolierte Durchführung der Produktentwicklung ohne Berücksichtigung anderer Unternehmensaufgaben ist in der Mikrosystemtechnik, wie auch in anderen Disziplinen, nicht sinnvoll. Eine weitere Detaillierung des V-Modells durch die Einführung von verschiedenen **Sichten** auf den Gesamtablauf von der Produktidee bis zum fertigen Produkt unterstützt die Einbeziehung und Berücksichtigung anderer Bereiche des Unternehmens, z. B. die parallele Entwicklung der Herstellungstechnologie.
- Zur Lösung von konkreten Problemstellungen im Entwicklungsablauf sind **Methoden** hilfreich. Neben disziplinübergreifenden Methoden werden auch solche beschrieben, die bei spezifischen Problemen der Entwicklung von Mikrosystemen Unterstützung bieten.

Die ersten drei Elemente werden nachfolgend betrachtet, die Methoden in Kapitel 6.

5.2 Vorgehensmodell

Begrifflich werden für organisatorische Leitfäden für Entwicklungsprozesse zwei Modelle unterschieden: Das Phasenmodell und das Vorgehensmodell. Ersteres beschränkt sich lediglich darauf, eine Abfolge von einzelnen Schritten im Entwicklungsprozess zu beschreiben. Bezieht ein Modell zusätzlich noch die Technik als solche mit ein und bietet den Projektbeteiligten damit eine umfassende Hilfe für die Durchführung ihrer Tätigkeiten, so spricht man von einem Vorgehensmodell [HESSE92, S. 39]. Ein Vorgehensmodell für die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik schlägt folglich einen organisatorischen Rahmen vor,

um die Reihenfolge der Arbeitsschritte festzulegen. Zusätzlich definiert es Zwischenergebnisse, die dann im Projektverlauf durch vorher festgelegte Kriterien überprüft werden.

Für die generelle Vorgehensweise bietet das in der Softwareentwicklung [BALZERT98; V-MODELL05] und in der Mechatronik [VDI2206] verwendete V-Modell (Vorgehensmodell) eine gute Grundlage. Wie in der Mechatronik kann auch in der Mikrosystemtechnik das V-Modell nur eine Basis für die Vorgehensweise liefern, die dann für konkrete Aufgabenstellungen angepasst werden muss. So kann eine sehr weitgehende Entwicklung eines Teilsystems zur genaueren Überprüfung z. B. der Herstellbarkeit sinnvoll sein, bevor dann die Entwicklung des Gesamtsystems erfolgt. Darüber hinaus muss das V-Modell um einige Aspekte ergänzt werden, die in den bestehenden Modellen nur unzureichend berücksichtigt werden. Dazu zählt z. B. eine umfassendere Berücksichtigung der interdisziplinären Zusammenarbeit und der technologischen Aspekte.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell für die Mikrosystemtechnik ist in Bild 5.2 dargestellt.

Nach der Festlegung der Produktidee und der Freigabe zur Entwicklung erfolgt in einem ersten Arbeitsschritt des Entwicklungsprozesses die Planung und Präzisierung der Aufgabenstellung.

Um eine Entwicklung zielgerichtet und erfolgreich durchführen zu können, sind zu Beginn klare Anforderungen unabdingbar [LEYER63, S. 8]. Anforderungen an ein zu entwickelndes System, die sich in der Regel aus der Aufgabenstellung oder dem Entwicklungsauftrag ergeben, werden aus externen und internen Quellen zusammengetragen. Sie legen die gewünschten Eigenschaften eines Systems fest und präzisieren die Aufgabenstellung. Gleichzeitig dienen sie als Ausgangsbasis für die weiteren Entwicklungsschritte, geben Entwicklern Zielvorgaben und bilden einen Maßstab für eine spätere Beurteilung des entwickelten Produktes.

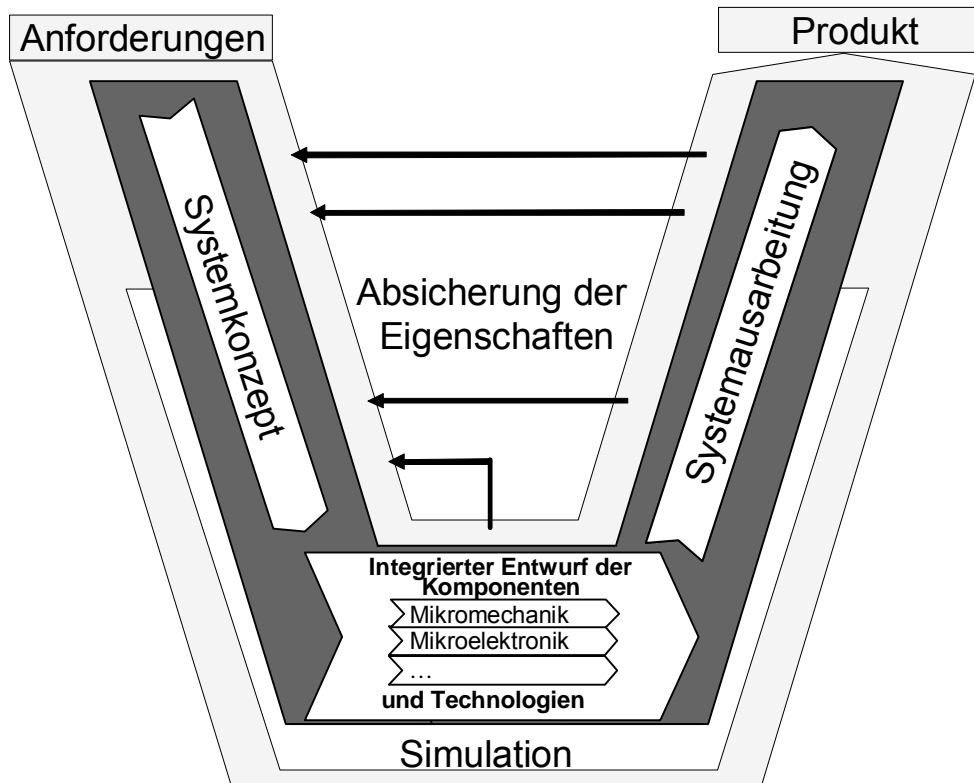


Bild 5.2: Vorgehensmodell für die Mikrosystemtechnik

Fehlende, unklare oder unvollständige Anforderungen führen, auch nach Aussage befragter Unternehmen, im weiteren Ablauf zu Fehlern und vermeidbaren Schleifen. Aufgrund der Erfassung in einer sehr frühen Phase der Entwicklung und ihrer in der Praxis häufigen Unvollständigkeit müssen Anforderungen oft im Verlauf der Entwicklung auf ihre Gültigkeit überprüft und gegebenenfalls aktualisiert und ergänzt werden. Damit stehen sie zwar formal am Beginn des Vorgehensmodells, begleiten aber den kompletten Ablauf bis hin zum fertigen Produkt.

Die Potenziale der Mikrosystemtechnik werden nur dann voll genutzt, wenn z. B. eine MID-Lösung von Beginn an im Vordergrund der Entwicklung steht, Bild 5.3. Steht eine konventionelle Lösung im Vordergrund oder gibt sie die Rahmenbedingungen vor, so wird das Bauteil nicht in vollem Umfang MID-gerecht entwickelt, und es werden z. B. Bauraum, Design- oder auch wirtschaftliche Ziele nicht voll erreicht.

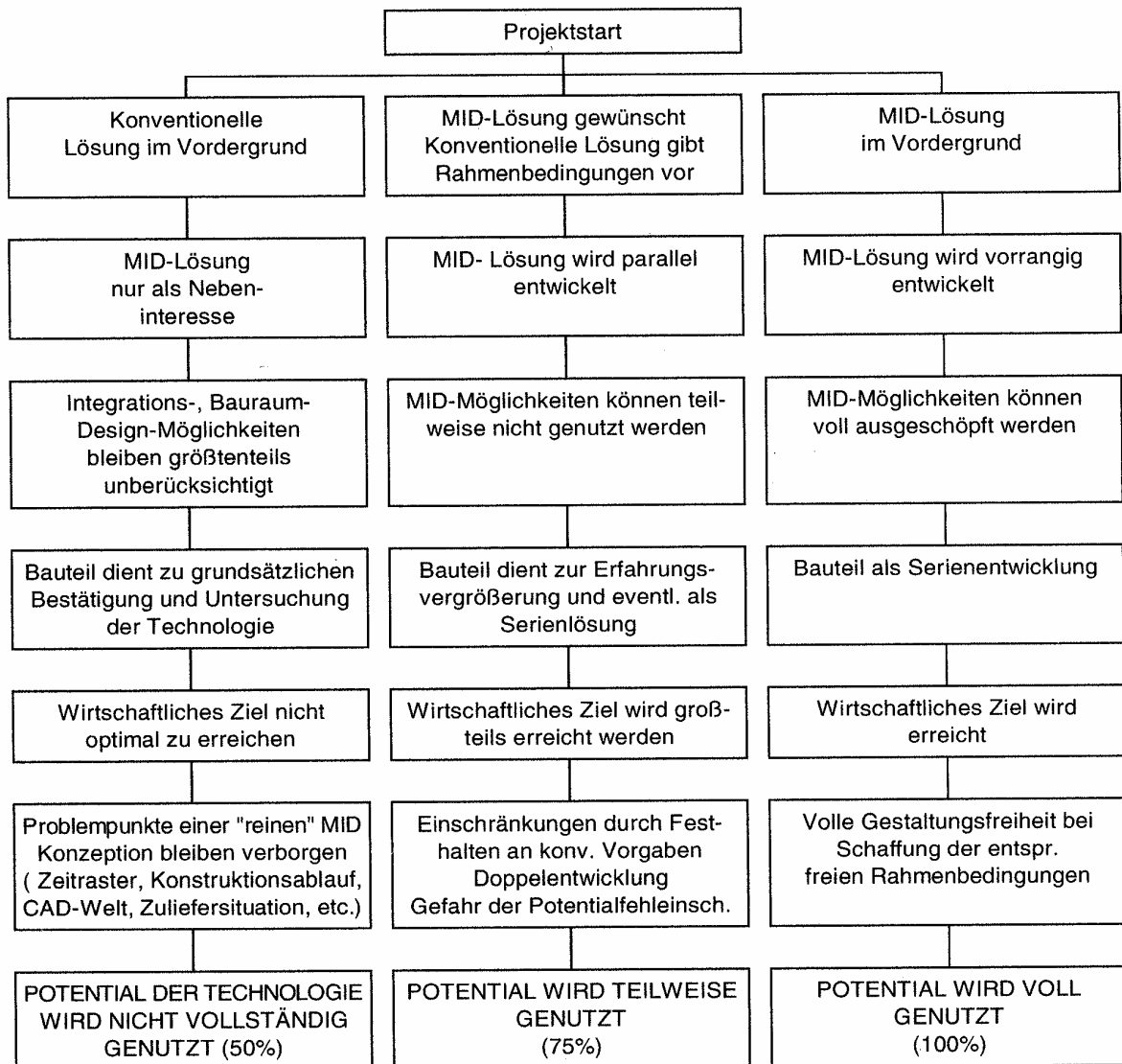


Bild 5.3: Potenzialausschöpfung in Abhängigkeit von der Vorgehensweise
[KRIEBITZSCH02, S. 21]

Wie zahlreiche Projekte gezeigt haben, ist daher die direkte Überführung einer klassischen Lösung in ein MID-Bauelement oft nicht optimal. Daher ist es sinnvoll, die Systemaufgabe und die Systemumgebung zunächst genau zu analysieren, um auf dieser Basis die Entscheidung für eine Technologie zu treffen. Ein abstraktes Problem ist daher ein idealer Ausgangspunkt für die Entwicklung, da keine vorgegebene Lösung die Denkansätze beschränkt. Auch die Integration in die Umgebung ist so am besten möglich. Allerdings wird für die Entwicklung Klarheit über die Realisierbarkeit der Herstellungstechnologie benötigt.

Aufbauend auf den Anforderungen wird zunächst ein Konzept für das Gesamtsystem erstellt, Bild 5.4.

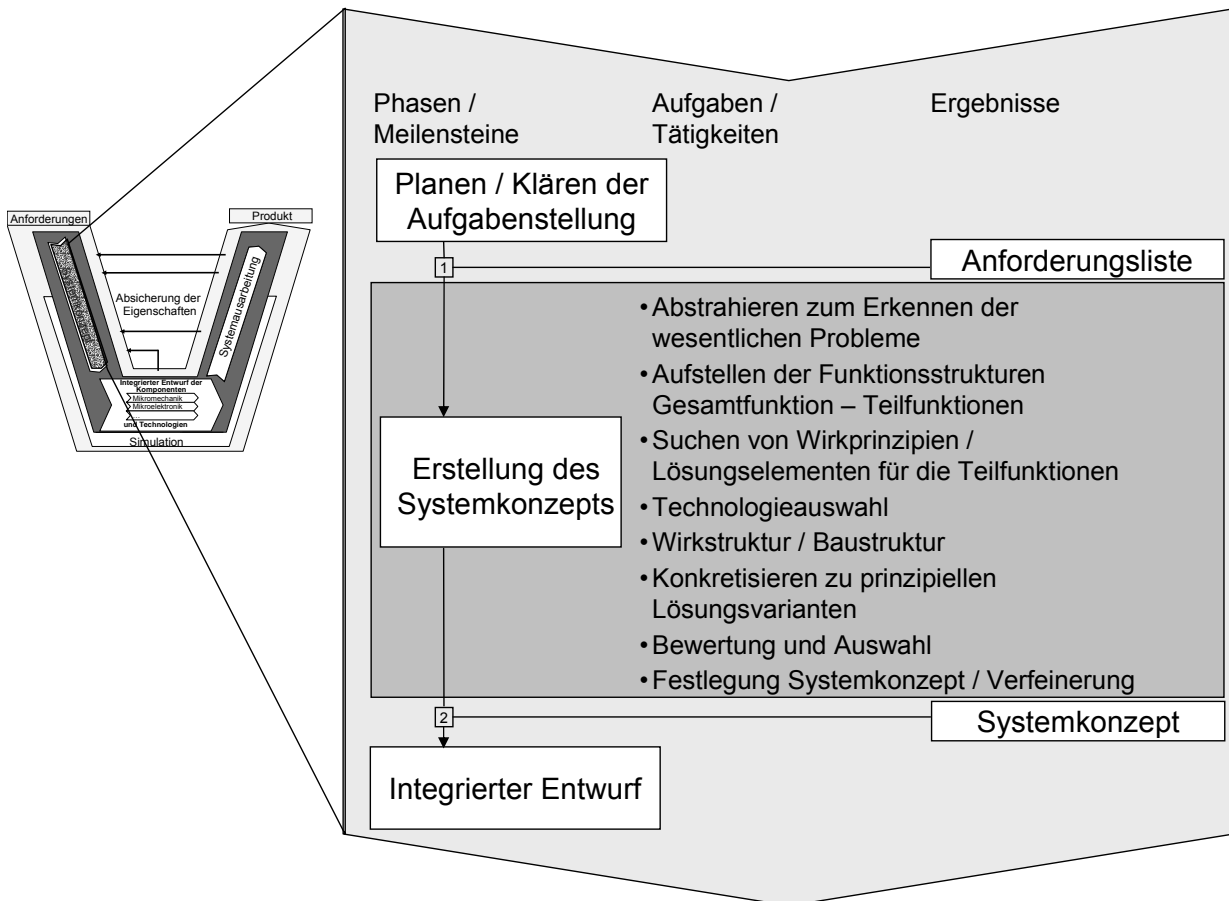


Bild 5.4: Erstellung des Systemkonzepts [nach VDI2206, S. 32]

Ziel der Konzeptphase ist die „prinzipielle Festlegung einer Lösung“ [PAHL03, S. 171], die für Mikrosysteme in einem domänenübergreifenden Lösungskonzept besteht, das Wirkungsweise und Verknüpfung der Teilsysteme beschreibt.

Eine Verallgemeinerung der Aufgabenstellung mittels Abstraktion macht die Gesamtfunktion und die wesentlichen Bedingungen für ihre Erfüllung erkennbar, ohne schon einen Lösungsweg festzulegen. Dadurch wird eine Vorfixierung vermieden und das Wesentliche hervorgehoben. Ziel ist es, die Problemstellung so allgemein wie möglich zu formulieren und durch diese systematische Erweiterung breite Lösungsmöglichkeiten zu eröffnen sowie möglichst wenige Voraussetzungen berücksichtigen zu müssen. In der Mikrosystemtechnik entfällt diese Phase bisher oft, weil bestehende Systeme z. B. mit anderen Herstellungstechnologien umgesetzt werden, um Kosten zu sparen.

Die Funktionsstruktur stellt lösungsneutral den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems dar. Dies geschieht in Form einer

Blockdarstellung der Gesamtfunktion in Form von Stoff-, Energie- und Signalumsätzen innerhalb der geeignet gewählten Systemgrenzen. Für komplexere Aufgabenstellungen, die in der Regel bei Mikrosystemen vorliegen, wird die Gesamtfunktion weiter auf die Ebene der Teilfunktionen aufgegliedert, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten und die Lösungssuche zu erleichtern. Teilfunktionen von Mikrosystemen sind z. B. Messen, Steuern, Regeln oder Wandeln. Diese Teilfunktionen werden über Stoff-, Energie und Signalflüsse zur Funktionsstruktur verknüpft.

Die bauelementneutrale Darstellung in Form von Funktionen dient dazu,

- eine Vorfixierung und damit eine Einengung des Lösungsraumes zu vermeiden (Funktionensynthese) und
- die Übersichtlichkeit bei der Beschreibung eines technischen Systems zu erreichen (Funktionsanalyse).

Das in dieser Form entstehende Gesamtbild des Systems dient auch für eine erste Analyse von Lösungsansätzen hinsichtlich Schnittstellen und Inkonsistenzen zwischen den Teildisziplinen.

Darauf aufbauend werden dann Wirkprinzipien und Lösungselemente für Teilfunktionen gesucht. Die Wirkstruktur beschreibt die Kombination der Wirkprinzipien zur Erfüllung von Funktionen durch geeignete physikalische, chemische oder biologische Effekte sowie entsprechende geometrische und stoffliche Merkmale. Sie definiert alle Elemente, die das funktionale Verhalten beeinflussen [MATTHIESEN02, S. 51].

Das Wirkprinzip umfasst klassisch den Wirkort, an dem der Effekt seine Wirkung entfaltet, die Wirkgeometrie, die durch die Anordnung von Wirkflächen, -linien oder -punkten beschrieben wird, die Wirkbewegung und prinzipielle Werkstoffeigenschaften [PAHL03, S. 51 f.]. An dieser Stelle wird eine Übertragung und Erweiterung auf die Mikrosystemtechnik notwendig. In vielen Anwendungen in Mikrosystemen ist für die Funktion entscheidend, dass nicht ein (eindimensionaler) Wirkort vorhanden ist, sondern ein (dreidimensionaler) Wirkraum. Dies ist z. B. für Anwendungen von elektromagnetischen Wirkprinzipien wichtig. Darüber hinaus spielen in der Mikrosystemtechnik nicht nur erwünschte Wirkungen eine

Rolle, sondern auch unerwünschte Störeinflüsse, die im Rahmen der Wirkstruktur mit betrachtet werden müssen. In der Mikrosystemtechnik ist dieser Arbeitsschritt für die meisten Problemstellungen umfassender als in den herkömmlichen Disziplinen, weil die erforderlichen Effekte weniger erforscht und oft noch nicht in Anwendungen erprobt sind.

Die Wirkstruktur wird durch Umsetzung mit realen Bauelementen zu prinzipiellen Lösungsvarianten konkretisiert. Die Ausarbeitung mehrerer Lösungsvarianten trägt zu einem vielfältigeren Lösungsraum bei, aus dem dann durch Bewertung der Varianten eine Festlegung auf ein Systemkonzept erfolgt.

In der Mikrosystemtechnik ist es wichtig, schon in der Konzeptphase die Technologie zu berücksichtigen. Wenn die Technologie nicht schon aufgrund vorhandener Produktionsanlagen vorgegeben ist, müssen mögliche Herstellungstechnologien möglichst früh ausgewählt und parallel zur Entwicklung des Produktkonzepts mit betrachtet werden, damit es in der gewählten Technologie umsetzbar ist.

Abschließend werden die möglichen Lösungskonzepte bewertet, und es wird möglichst ein weiter zu verfolgendes Systemkonzept ausgewählt. Die einzelnen Komponenten dieses Konzeptes, die für die Realisierung der Teilfunktionen benötigt werden, müssen integriert und interdisziplinär werden, Bild 5.5.

Dazu wird das Systemkonzept zunächst in gestaltungsbestimmende Hauptkomponenten strukturiert, die interdisziplinär grobgestaltet werden, um einen Überblick über benötigte Elemente und den benötigten Platzbedarf zu erhalten.

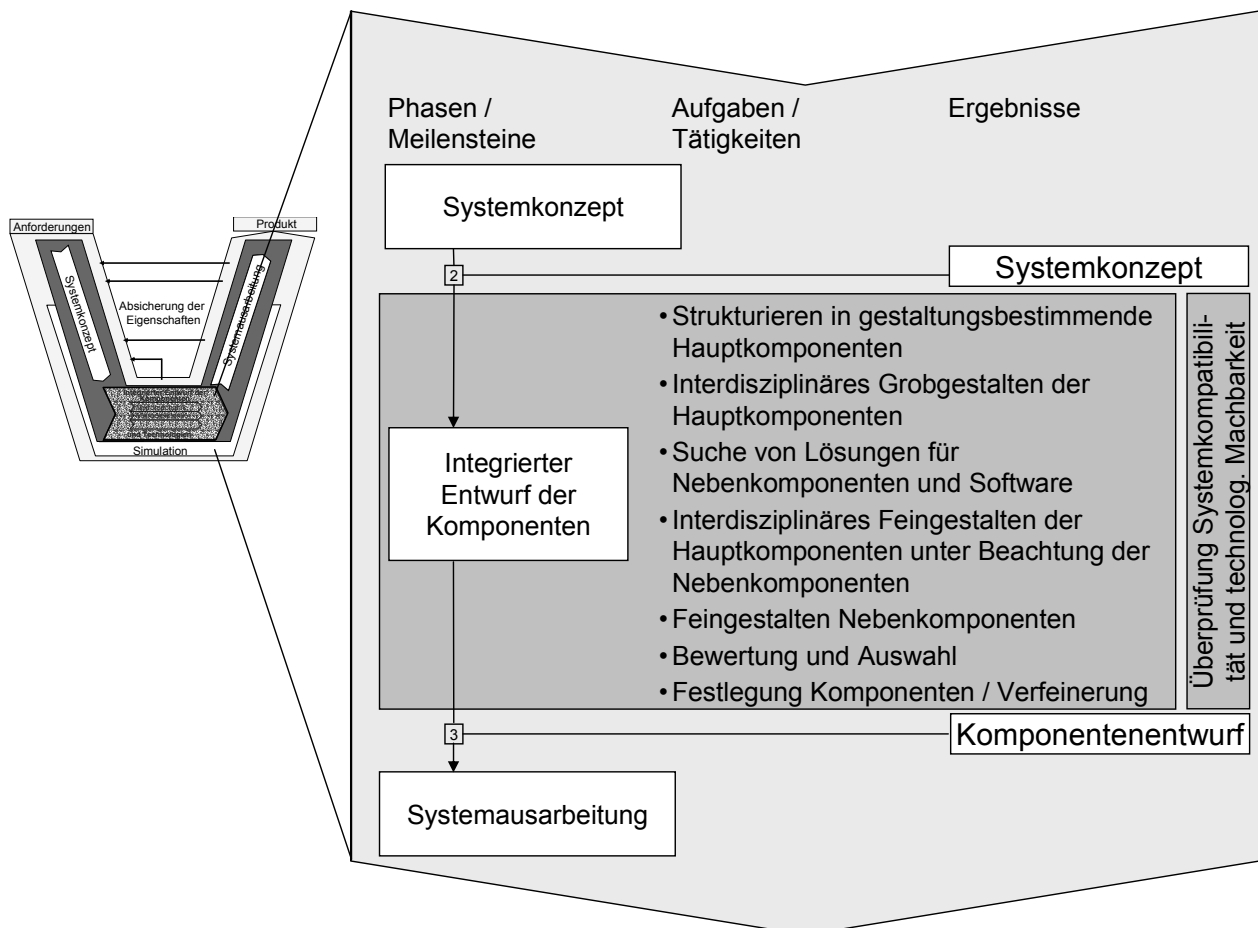


Bild 5.5: Integrierter Entwurf der Komponenten

Für die Gestaltung empfiehlt es sich, gegebenenfalls in Teilen auf die Vorgehensweisen der einzelnen Disziplinen zurückzugreifen, um Teile z. B. für eine mechanische Beanspruchung oder optische Nutzung geeignet zu gestalten. Lösungen für Nebenkomponenten und auch Software können dann basierend auf den Hauptkomponenten gesucht werden. Im Anschluss werden die Hauptkomponenten feingestaltet, wobei sowohl Wechselwirkungen der Hauptkomponenten untereinander als auch mit den Nebenkomponenten beachtet werden müssen. Abschließend werden die Nebenkomponenten und damit das Gesamtsystem feingestaltet. Das Ergebnis sollte auf seine Übereinstimmung mit den Anforderungen hin bewertet werden, im Falle von mehreren Varianten kann darauf basierend die beste Variante ausgewählt werden. Während der gesamten Phase des integrierten Entwurfs der Komponenten muss stets parallel der Systemzusammenhang mit betrachtet werden. Hier empfiehlt sich eine methodische Unterstützung, z. B. durch die in Kapitel 6.6 beschriebene Wirkstruktur. Zusätzlich

spielt die technologische Herstellbarkeit eine entscheidende Rolle. Sie sollte fortlaufend überprüft werden und z. B. durch Gestaltungsrichtlinien (Kapitel 6.7) gewährleistet werden. Anschließend wird das Gesamtsystem ausgearbeitet, Bild 5.6.

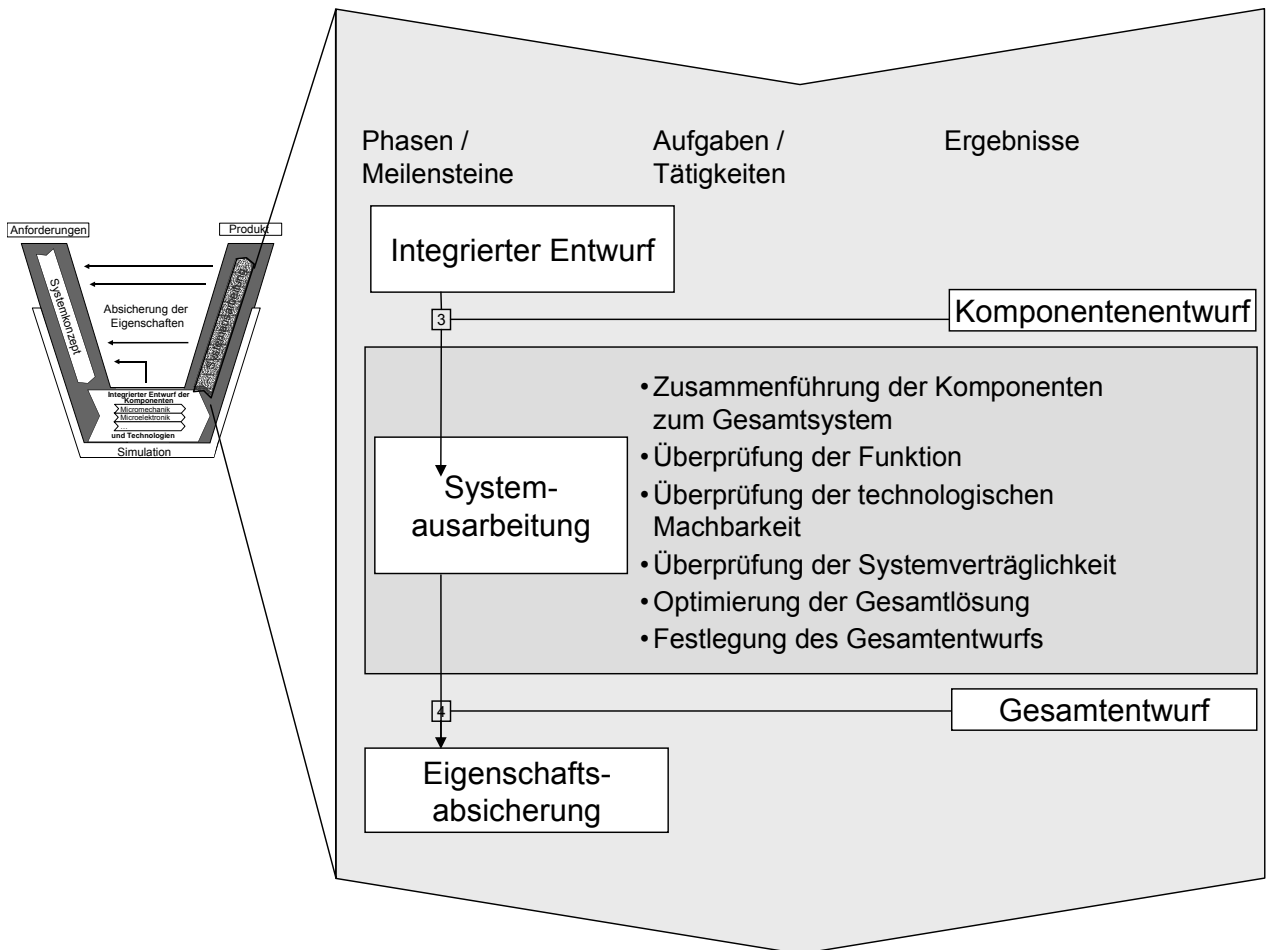


Bild 5.6: Systemausarbeitung [nach VDI2206, S. 37]

Ziel ist es, die Komponenten abschließend im Gesamtsystem zu integrieren und aufeinander abzustimmen. Dazu werden die Komponenten zunächst zum Gesamtsystem zusammengeführt. Das Ergebnis wird in mehrfacher Hinsicht überprüft, um Funktion und Herstellbarkeit zu gewährleisten.

Von der Erstellung des Systemkonzepts bis zur Systemausarbeitung ist eine begleitende Simulation und Absicherung von Eigenschaften durch Versuche und Messungen hilfreich, um Fehlfunktionen schnell zu erkennen und zu beheben, damit abschließend ein den Anforderungen entsprechendes Produkt entsteht, Bild 5.7.

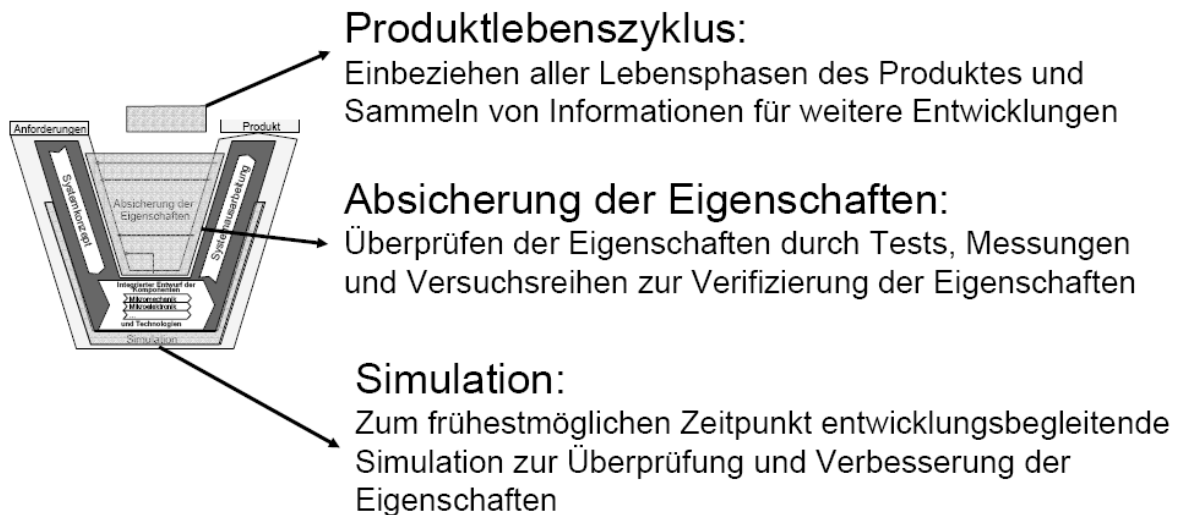


Bild 5.7: Simulation und Eigenschaftensicherung

Die Verwendung von Modellen und die Simulation im Rechner ist mittlerweile in vielen Bereichen der Technik ein übliches Werkzeug. Auch beim Entwurf von Mikrosystemen spielen Modellbildung und Simulation schon seit längerem eine zentrale Rolle [KLAABEN94, S. 35].

Typisch für Mikrosysteme ist die notwendige Einbeziehung verschiedener physikalischer Domänen und Abstraktionen in der Simulation [SCHWARZ96, S. 121]. Daher müssen nicht nur einzelne Komponenten getrennt simuliert, sondern auch zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden [SALOMON00, S. 47]. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Beschreibungs- und Abstraktionsebenen; zusätzlich müssen Temperaturverteilungen oder störende Felder mit berücksichtigt werden [KLAABEN94, S. 35].

Zahlreiche internationale Forschungsarbeiten zeigen, dass die Theorien und Berechnungsmethoden der klassischen Mechanik mit Modifikationen auch im Mikrobereich anwendbar sind [NEUL98; ZAMAN99; NEUL02; LUEDECKE03; KUIJK05]. In Mikrosystemen spielen allerdings auch Besonderheiten eine Rolle, die in der klassischen Mechanik ohne Relevanz sind. Die enge Verkoppelung von Design und Funktion, die mechanischen Eigenschaften der Basiswerkstoffe, Verwendung von Mehrschichtsystemen, Verspannungen durch Aufbau- und Verbindungstechnik oder starke Wechselwirkungen mechanischer und anderer (z. B. elektrischer oder magnetischer) Felder müssen deshalb bei der Simulation mit berücksichtigt werden [DÖTZEL94, S. 87 f.] und erfordern Werkzeuge, die auch

komplexe heterogene Systeme modellieren und simulieren können [GERLACH97, S. 16].

Der Entwicklungsprozess muss immer in den gesamten Lebenszyklus des Produktes eingebettet sein, aus dem wichtige Informationen für die Entwicklung kommen, Bild 5.8. Die Entwicklung endet damit auch nicht mit dem Übergang in die Serienfertigung, sondern setzt sich mit dem Sammeln von Informationen für folgende Produktgenerationen fort.

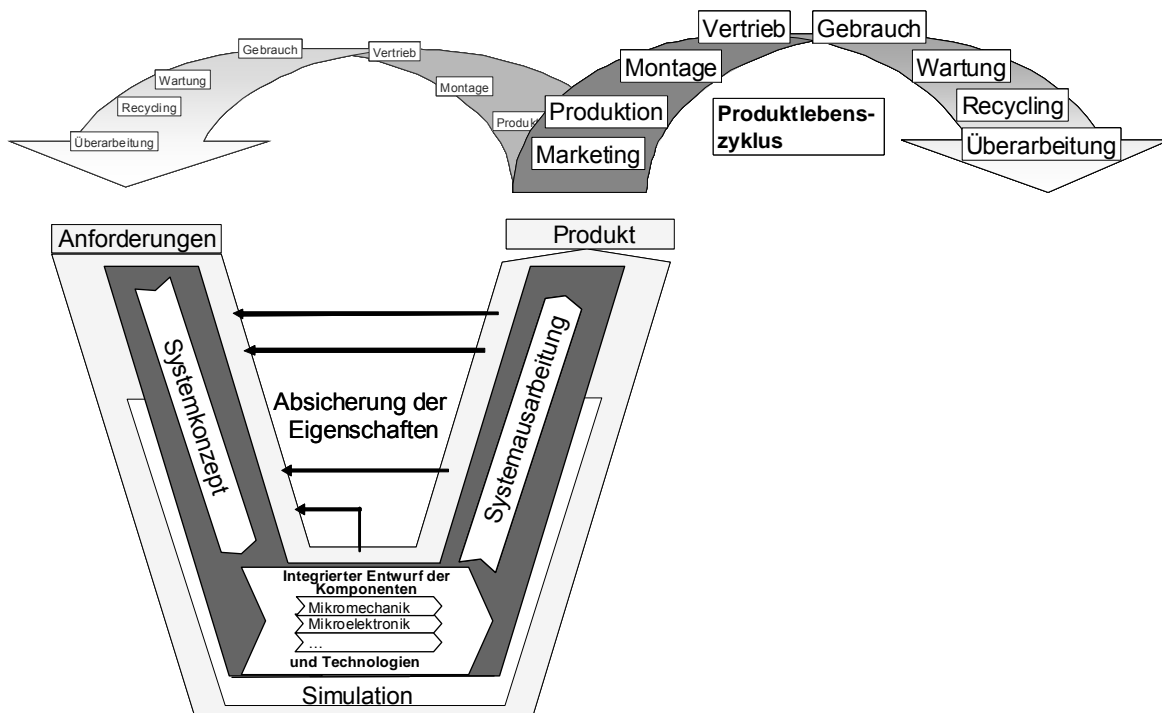


Bild 5.8: Einbettung in den Produktlebenszyklus

Sowohl technische Phasen wie die Produktion, Montage oder das Recycling, als auch eher betriebswirtschaftlich orientierte Phasen wie das Marketing müssen berücksichtigt werden, um ein vollständiges Bild der Anforderungen an das Produkt zu bekommen. Darüber hinaus geben aber beispielsweise der Gebrauch und die Wartung des Produktes ebenfalls wichtige Impulse für die Produktentwicklung.

Bei den für die Evaluation befragten Unternehmen stellte sich heraus, dass eine komplette Neuentwicklung oder aber auch grundlegende Veränderung eines Produktes vorliegen kann, die in ein neues „V“ übergeht. Dieser Fall tritt in der Mikrosystemtechnik insbesondere dann auf, wenn sich die Geometrie eines

Produktes so verändert, dass für die Herstellung verwendete Produktionsmittel, z. B. Spritzgussformen, verändert werden.

Bei weniger gravierenden Änderungen werden die Produkte in Teilbereichen mit weniger weitreichenden Auswirkungen überarbeitet, wie es im Makrobereich im Rahmen eines „Facelifting“ geschieht. Dann würde, wie im Bild schwächer schattiert dargestellt, im Grunde eine weitere Schleife im gleichen Entwicklungsablauf basierend auf den schon vorhandenen Daten folgen.

5.3 Entwicklungsablauf

Ein komplexes System entsteht in der Regel nicht in einem Durchlauf des V-Modells. Auch die Praxis zeigt, dass oft mehrere Durchgänge erforderlich sind, wie in Bild 5.9 dargestellt. Dazu werden mehrere Vorgehensmodelle ineinander geschachtelt. Der Entwicklungsprozess beginnt dabei innen mit der Planungsphase, die der Organisation des Gesamtablaufs dient. Mit zunehmendem Reifegrad werden dann die äußeren V-Modelle durchlaufen, bis am Ende das fertige Serienprodukt steht.

Bei vielen Entwicklungsaufgaben ist es sinnvoll, zunächst einmal grundsätzlich die Funktionsweise des angedachten Wirkprinzips zu überprüfen. Dazu dienen in der Regel Labormuster oder Demonstratoren, mit denen entsprechende Tests und Überprüfungen durchgeführt werden können. Die Aufbauten dazu enthalten in der Regel nur Teile von Lösungen, die für die Funktion des Systems entscheidend sind.

Der Konkretisierungsgrad und mit ihm die Vollständigkeit des Systems nimmt nach außen hin zu, so dass ein Prototyp z. B. voll funktionsfähig, aber von den Abmessungen noch größer als das Endprodukt ist oder die elektronische Schaltung zur Auswertung noch aus diskreten Bauelementen aufgebaut ist. Auch die oft parallel entwickelte Herstellungstechnologie wird konkreter und ausgefeilter, je näher der Entwicklungsablauf sich dem Endprodukt nähert.

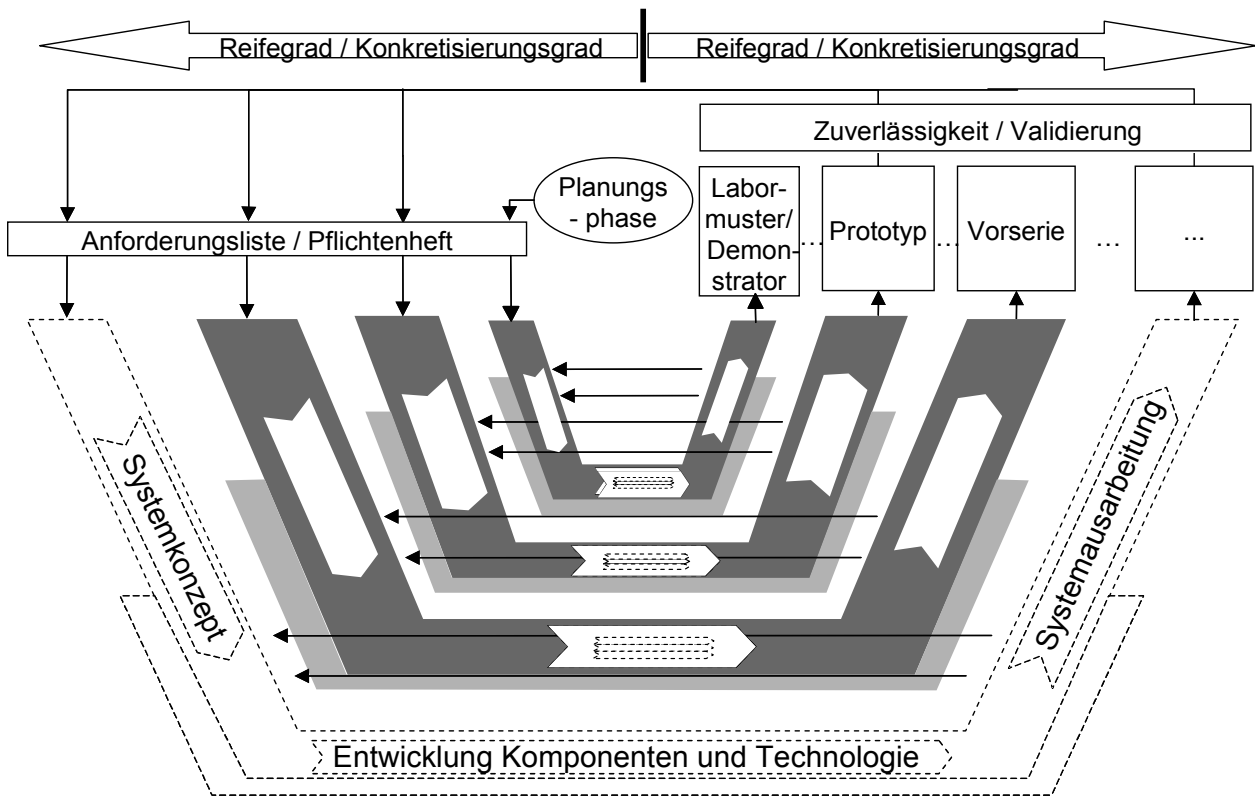


Bild 5.9: Grundsätzliche Vorgehensweise [nach VDI2206, S. 31]

5.4 Sichten auf den Gesamttablauf

Die Produktentwicklung kann nicht losgelöst von anderen Unternehmensbereichen stattfinden. Es müssen eine Reihe von Einflussgrößen mitbetrachtet werden, von denen einige beispielhaft in Bild 5.10 dargestellt sind.

Die relevanten Einflüsse sind abhängig von der konkreten Entwicklungsaufgabe und müssen deshalb zu Beginn einer Entwicklung identifiziert werden.

Die Fertigungstechnologie hat in der Mikrosystemtechnik immer eine große Bedeutung, da die Herstellungstechnologien (noch) in einer ständigen Weiterentwicklung sind. Aber auch die Qualitätssicherung spielt, insbesondere bei den aktuellen Bestrebungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, eine große Rolle. Zusätzlich müssen Montageaspekte bzw. die Aufbau- und Verbindungstechnik und betriebswirtschaftliche Einflüsse in jeder Phase der gesamten Entwicklung berücksichtigt werden.

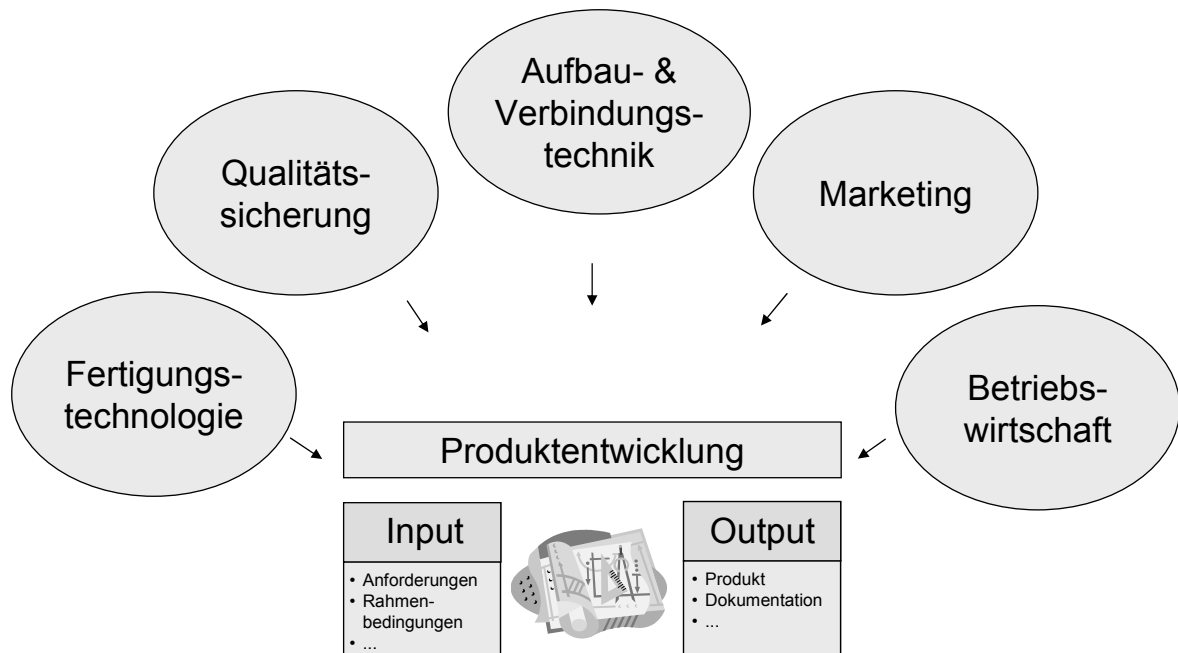


Bild 5.10: Einflüsse auf die Produktentwicklung

Dieser Entwicklungsprozess im engeren Sinne kann überlagert werden von einer Sichtweise aus verschiedenen Blickwinkeln, z. B. aus Sicht der Fertigungstechnologie oder der Betriebswirtschaft, Bild 5.11. Das zweidimensionale V-Modell geht dadurch über in eine dreidimensionale Gestalt, die diese verschiedenen Sichten unterstützt.

In der Abwicklung ist jede Seite des V-förmig gebogenen hexagonalen Prismas mit der Sicht auf einen Teilaspekt belegt, der für die Entwicklung eines Produktes von Bedeutung ist. Betrachtet werden hier für die Mikrosystemtechnik neben dem Entwicklungsprozess im engeren Sinne noch die Fertigungstechnologie, die Betriebswirtschaft, das Marketing, die Aufbau- und Verbindungstechnik und die Qualität/Zuverlässigkeit. Mit einem Schnitt durch den Körper können zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der verschiedenen Bereiche voneinander dargestellt werden. Einige Wechselwirkungen sind hier beispielhaft eingetragen.

So wirkt sich der Entwicklungsprozess im dargestellten Schnitt auf die Aufbau- und Verbindungstechnik aus und hat darüber hinaus wechselseitige Abhängigkeiten mit der Fertigungstechnologie, aber auch mit der Betriebswirtschaft und der Qualität/Zuverlässigkeit.

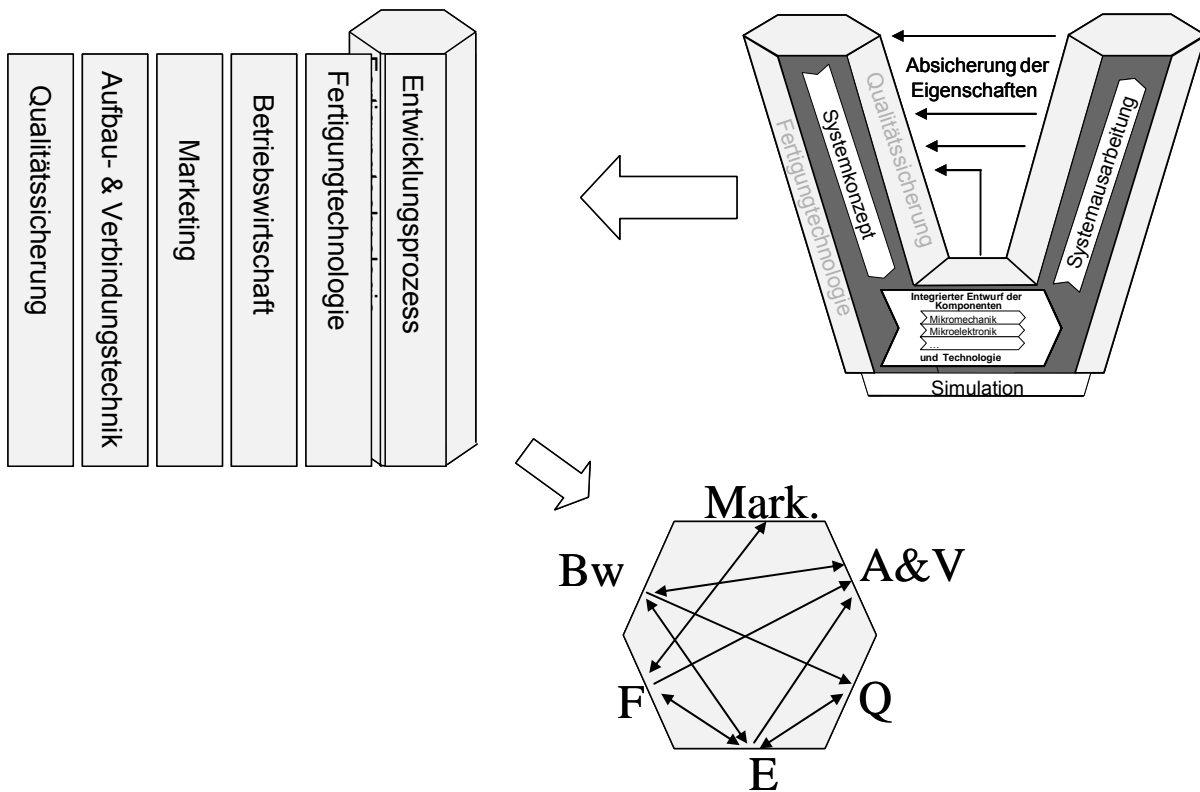


Bild 5.11: Unterstützung verschiedener Sichten

Allgemeingültige Abhängigkeiten können hier nicht angegeben werden, da sie z. B. von der Unternehmensstruktur oder der Art des Produktes abhängen.

Die Verknüpfungen bei einer parallelen Betrachtung der Fertigungssicht zum Entwicklungsablauf ist in Bild 5.12 dargestellt.

Fertigungsaspekte haben zu allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eine große Bedeutung. Beispielsweise erfordert die Vielfalt der eingesetzten MID-Herstellungsverfahren und ihrer Varianten eine sorgfältige Planung des Herstellungsprozesses und eine fundierte Auswahl der eingesetzten Technologien [Cu103, S. 40]. Darüber hinaus müssen die Eigenschaften der Herstellungstechnologie auch im Entwicklungsprozess ständig berücksichtigt werden.

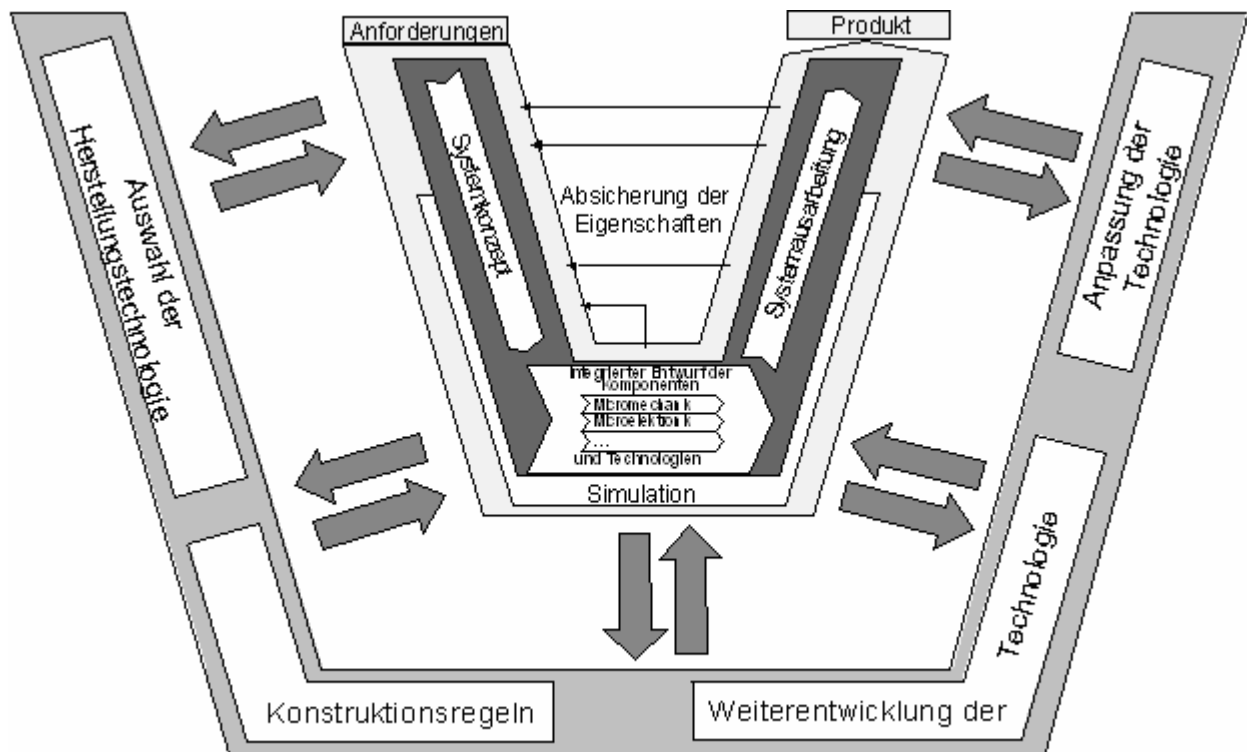


Bild 5.12: Fertigungssicht

Der parallele Ablauf der Entwicklung von Produkten einerseits und der Entwicklung bzw. Verbesserung der Herstellungstechnologien andererseits verursacht daher wechselseitige Einflüsse, die in beiden Bereichen beachtet werden müssen. Dies erfordert eine Berücksichtigung von Fertigungsaspekten während des gesamten Entwicklungsablaufs [KASPER94; S. 164 ff.], z. B. an folgenden Stellen:

- Auswahl einer geeigneten Herstellungstechnologie zu Beginn des Entwicklungsprozesses und ständige Hinterfragung während der Entwicklung.
- Gestaltungsrichtlinien, die Möglichkeiten und Grenzen des Herstellungsprozesses bei der Erstellung der Bauelemente berücksichtigen.
- Ständige Beachtung der Wechselwirkungen zwischen Entwicklung und technologischen Fortschritten.
- Anpassung der Herstellungsprozesse an das fertig entwickelte Produkt.

Darüber hinaus besteht ein enger Zusammenhang zwischen Fertigungstechnologie und Betriebswirtschaft, speziell Kostenaspekten, und der Qualität/Zuverlässigkeit der Produkte. Diese Sichtweise erweitert die üblicherweise verwendete zweidimensionale Darstellung und ermöglicht so die ganzheitlichere und in der Realität notwendige Betrachtung der Produktentwicklung über den Produktentwicklungsprozess hinaus.

Nur wenn diese Zusammenhänge während des Entwicklungsablaufes einbezogen werden, entsteht am Ende ein am Markt konkurrenzfähiges Produkt. Im Anhang (A.2) ist als weiteres Beispiel die Qualitätssicht enthalten.

5.5 Darstellung der Vorgehensweise

Für die Darstellung des Vorgehensmodells müssen die einzelnen Schritte des Entwicklungsablaufs und deren Zusammenhang sowie die dazugehörigen Methoden und Hilfsmittel graphisch veranschaulicht werden. In verschiedenen Bereichen der Technik wurden dafür Modellierungssprachen entwickelt. Für dynamische Prozessabläufe werden z. B. Petri-Netze [Petri62, aus Gerhards] oder die GRAI-Methode [Grai85, aus Gerhards] eingesetzt. Für Materialflüsse und Fertigungsprozesse ist IMMS [Tran90, Brandenburg] üblich, für die Analyse technischer Systeme wird z. B. das Prozessmodell Heidemann empfohlen [SCHNEIDER01, S. 40 f.] . Diese und weitere Modellierungsmethoden werden in [Weng96, S. 59 f.] ausführlich erörtert.

Für die in dieser Arbeit verfolgten Ziele ist es wichtig, dass die Darstellung funktionsorientiert ist und insbesondere den Informationsfluss berücksichtigt. Dazu und im Zusammenhang mit Entwicklungsmethodiken hat sich die SADT-Methode (Structured Analysis and Design Technique) [Ross77b] bewährt, die ursprünglich für die Abbildung von Zusammenhängen bei Systemen mittlerer Komplexität eingesetzt wurde [Ross77a, S. 6 ff., Ross77b, S. 16 ff.]. Sie wurde von Wengler um unterstützende Methoden und Hilfsmittel erweitert und bereits mehrfach [Brandenburg, Gerhards] für die Illustration von Entwicklungsmethodiken eingesetzt.

Die Modellierung beruht auf einer hierarchischen Gliederung des Betrachtungssystems, Bild 5.13.

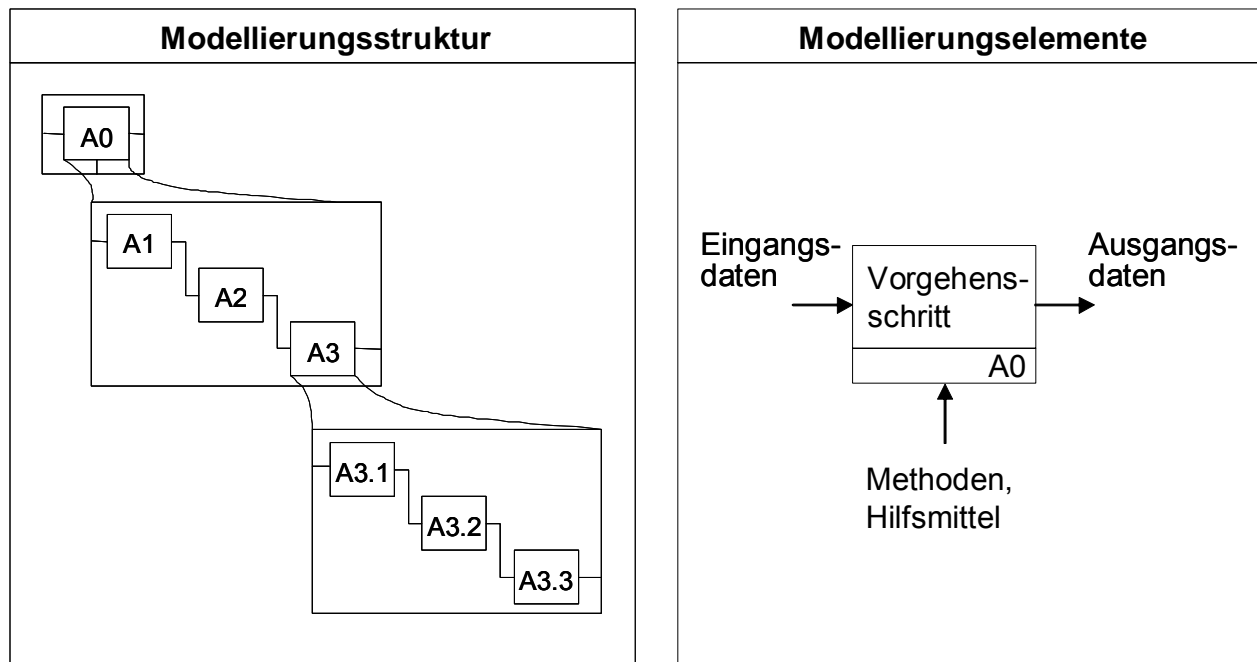


Bild 5.13: Modellierungssprache zur Darstellung der Methodik, [nach Brandenburg, S. 55]

Die Modellierungssprache basiert auf einer hierarchischen Darstellung, bei der Entwicklungsphasen in immer kleinere Teilphasen unterteilt werden. Einzelne Ablaufschritte werden mit Rechtecken dargestellt, deren Zusammenhang mit Pfeilen hergestellt wird, die Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen repräsentieren. Unterstützende Methoden oder Hilfsmittel werden ebenfalls mit Pfeilen symbolisiert. Dadurch wird eine einfache Kombination von Elementen und ihrer Verknüpfung möglich. Unternehmensspezifische Änderungen und Ergänzungen sind so einfach möglich und übersichtlich darstellbar.

Bild 5.14 zeigt die Umsetzung anhand des Ablaufschrittes A2 „Planen und Klären der Aufgabenstellung“, der aus vier Vorgehensschritten besteht. Als Eingangsdaten der „Analyse der Aufgabenstellung“ werden z. B. Produktinformationen benötigt. Nach der Verarbeitung, bei der z. B. Wettbewerbsanalysen unterstützend eingesetzt werden, ergeben sich ein Entwicklungsziel und die Problemstruktur als Ausgangsdaten, die im nächsten Vorgehensschritt als Eingangsdaten verwendet werden. Nach Bearbeitung aller Teilschritte erfolgt abschließend die Freigabe zum Konzipieren.

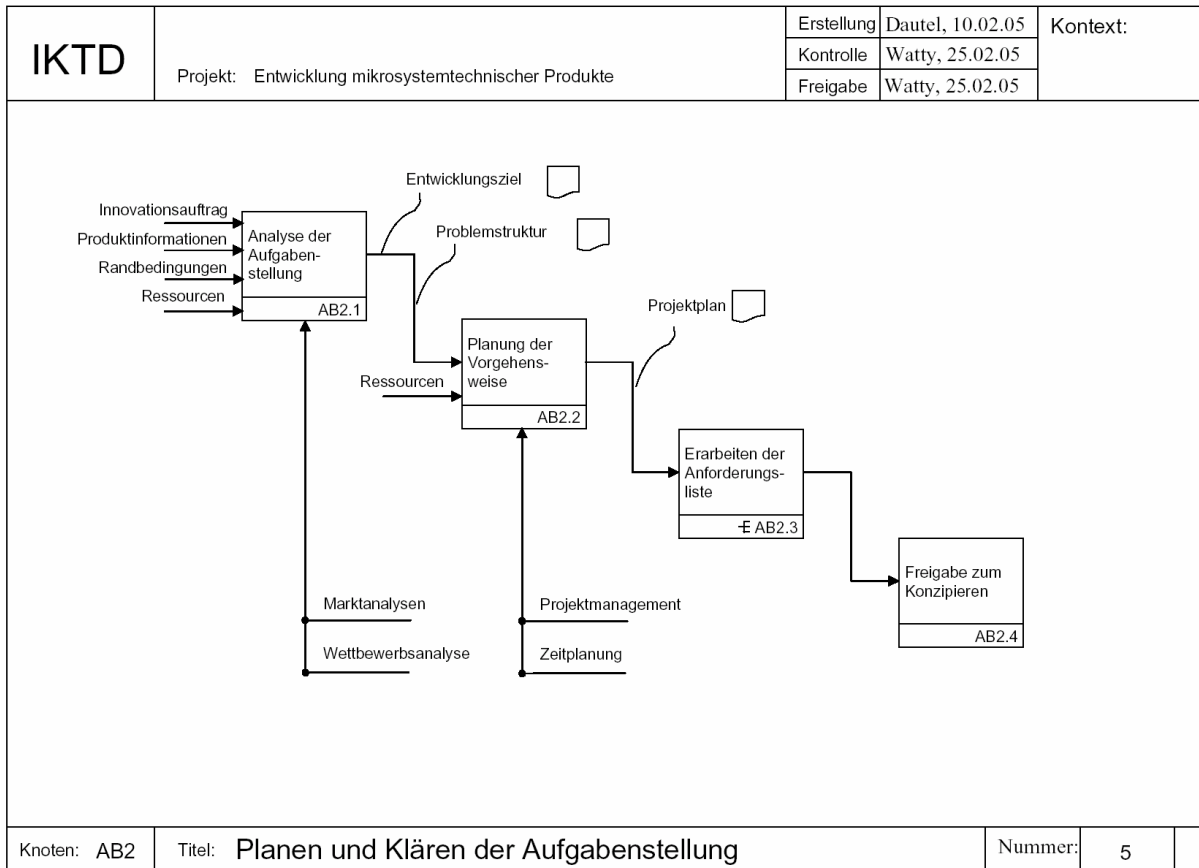


Bild 5.14: Beispiel zur Modellierungssprache

In Anhang A.1 ist ein ausführliches Beispiel für einen kompletten Entwicklungsablauf enthalten, auf dem der Ablauf der Evaluierungsprojekte beruht.

6 Methodenunterstützung

Eine systematische Vorgehensweise in der Produktentwicklung wird durch die Anwendung von Methoden unterstützt [GRABOWSKI97, S. 88.; SPATH01, S. 180; VDI2221, S. 32].

Methoden unterstützen den Entwicklungsablauf in mehrfacher Hinsicht [VDI2222, S. 22 ff.]:

- Der Methodeneinsatz bewirkt ein strukturiertes Vorgehen und führt zu strukturierten Ergebnissen. So wird eine **Systematik** im Ablauf erreicht.
- Methoden bewirken **Transparenz**. Strukturen werden überschaubar, verwendete Begriffe verständlicher und Ergebnisse nachvollziehbar und ggf. wieder verwendbar.
- Die Vorgehensweise in der Produktentwicklung wird nach bestimmten Mustern vereinheitlicht, so dass eine **Standardisierung** der Vorgehensweise erfolgt.

Einführung und Anwendung von Methoden müssen für eine erfolgreiche Verwendung systematisch erfolgen. Bei ihrer Einführung muss eine Methode in die Produktentwicklung eines Unternehmens integriert werden, indem Mitarbeiterqualifikation, Ablauforganisation und Aufbauorganisation beachtet werden. Für die Anwendung sollen Methoden ausgehend von der Analyse der Aufgabenstellung ausgewählt und ggf. angepasst und kombiniert werden, damit der Einsatz erfolgreich ist [VIERTELBÖCK00, S. 47]. Ein Einsatz von Methoden zum Selbstzweck ist sinnlos. Zweckmäßig ist ein System von Methodenbausteinen, um für den jeweiligen Einsatzfall geeignete allgemeine Methoden zusammenzustellen [VDI2221, S. 32]. Darüber hinaus sollen nachfolgend besonders Methoden vertieft vorgestellt werden, die für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik abgewandelt und zum Teil neu erstellt wurden. Eine Übersicht gibt Bild 6.1.

- Allgemein: Zuordnung von Methoden für die einzelnen Entwicklungsphasen
- Hauptmerkmalsleitlinie und erweiterte Anforderungsliste zur Ermittlung von Anforderungen
- Werkstoff-Auswahlmatrix
- Technologie-Auswahlmatrix
- Katalog mit Sammlung physikalischer Effekte
- Wirkstruktur zur Erkennung von Wechselwirkungen
- Ordnungsschemata / Konstruktionskataloge
- Gestaltungsrichtlinien
- System-FMEA

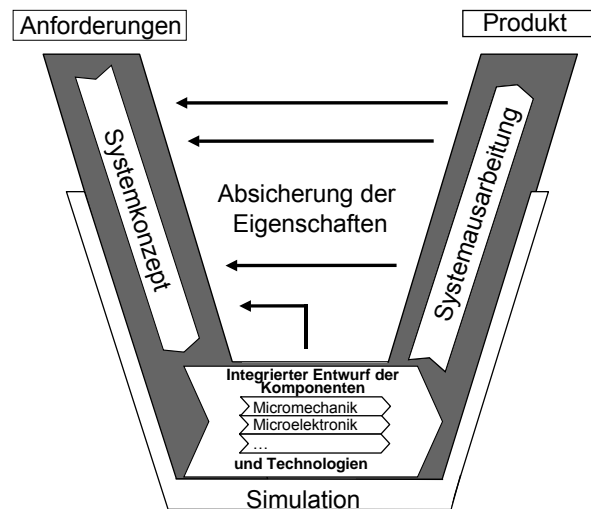


Bild 6.1: Methoden für die Mikrosystemtechnik

Die dargestellten Methoden werden nachfolgend näher erläutert.

6.1 Allgemeine Methoden

In Entwicklungsprozessen können eine Reihe von Methoden unabhängig von der Disziplin an verschiedenen Stellen und für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden. Eine Methodensammlung in Form einer Matrix, die Methoden zu den verschiedenen Arbeitsgebieten zuordnet, kann helfen, mögliche Methoden für bestimmte Arbeitsphasen oder Teilaufgaben des Entwicklungsprozesses auszuwählen [VDI2221, S. 33]. Eine komplette Darstellung dieser allgemein verwendbaren Methoden würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb sei hier auf die einschlägige Literatur verwiesen, in der sich Tabellen mit Methoden für die einzelnen Entwicklungsphasen und z. T. eine ausführliche Beschreibung der Methoden finden [PAHL03, S. 741 ff.; VDI2221, S. 33 ff.; LINDEMANN04, S. 217 ff.]. Für die erfolgreiche Anwendung ist eine intensive Beschäftigung mit den aufgeführten Methoden bzw. eine entsprechende Schulung zu empfehlen.

6.2 Ermittlung von Anforderungen

Eine der Hauptursachen für Fehler, die zu Problemen im Entwicklungsablauf oder in der Fertigung, zu Funktionsstörungen oder im schlimmsten Fall zum Ausfall von mikrosystemtechnischen Bauelementen führt, sind falsche, unzureichende oder zu spät erkannte Anforderungen. Eine gründliche und umfassende Erfassung der Anforderungen an ein mikrosystemtechnisches Produkt ist daher ein wesentlicher Qualitätsfaktor, birgt aber auch Potenzial für Einsparungen, denn gerade Festlegungen in den ersten Phasen des Entwicklungsprozesses haben weitreichende Folgen für Entwicklungs- und Produktionszeiten und die damit verbundenen Kosten. Trotzdem wird zu Beginn des Entwicklungsprozesses die strukturierte und systematische Erfassung von Anforderungen oft vernachlässigt. Paradoxerweise werden eher große Geldbeträge für die Fehlerbehebung und nachträgliche Änderungen ausgegeben als für den Aufbau eines effektiven Anforderungsmanagements und seine konsequente Anwendung. So werden Anforderungen, die eigentlich frühzeitig hätten erkannt und berücksichtigt werden sollen, oft erst während der Produktion oder gar dem Gebrauch eines Produktes entdeckt und erfordern dann nachträglich aufwändige Änderungen mit hohen Kosten, aber auch dem Risiko, die Kundenzufriedenheit aufs Spiel zu setzen.

Zur Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung zu Beginn der Entwicklung leistet die Anforderungsliste einen wichtigen Beitrag. In der Anforderungsliste werden die Zielvorstellungen aller Beteiligten an das zu entwickelnde Produkt geordnet und lösungsneutral zusammengestellt. Dies umfasst die Formulierung des Zweckes, zu dem das Produkt entwickelt wird, aber auch eine Reihe von Randbedingungen und Restriktionen, die zu beachten sind, Bild 6.2.

Dazu gehören Anforderungen an die Systemfunktion, marktbedingte Anforderungen wie Gebrauchseigenschaften und Kosten, aber auch Anforderungen, die sich aus den Produktlebensphasen ergeben sowie gesellschaftliche und gesetzliche Restriktionen. Neben expliziten, also klar erkennbaren Anforderungen, müssen auch implizite, unausgesprochen als selbstverständlich vorausgesetzte Anforderungen berücksichtigt und möglichst genau quantifiziert werden.

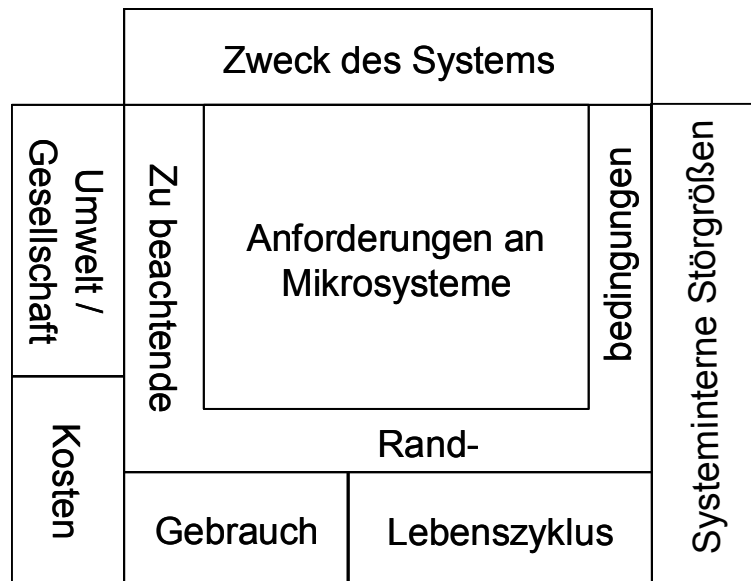


Bild 6.2: Anforderungen an Mikrosysteme

Über die Dokumentation dieser Erwartungen und Anforderungen des Kunden hinaus müssen besonders bei mikrosystemtechnischen Produkten auch die Erfordernisse der beteiligten Disziplinen beachtet und im Laufe der Entwicklung ständig abgestimmt und aktualisiert werden.

Anforderungen müssen für das System und seine Bestandteile formuliert, zusätzlich aber aufgrund der parallelen Entwicklung der Herstellungstechnologie auch aus Sicht der Fertigungseinrichtungen betrachtet werden. Dies umfasst wechselseitige Anforderungen von Produkt und Fertigung aneinander.

Damit die Anforderungsliste als Arbeitsgrundlage für die Entwicklung und Konstruktion nutzbar ist, müssen die Angaben eindeutig, klar verständlich und vollständig sein.

Für das Erstellen von Anforderungslisten haben sich in der Praxis zwei Methoden bewährt:

- Die Nutzung von **Leitlinien**: Hauptmerkmale mit vorgegebenen Beispielen als Assoziationsbegriffe unterstützen bei der Sammlung von Anforderungen. Die Anforderungen, die an ein Produkt zu stellen sind, hängen stark von der Herstellungstechnologie und den späteren Einsatzgebieten ab. Hauptmerkmalsleitlinien, die sich als wertvolles Hilfsmittel z. B. im Maschinenbau [PAHL03, S. 193 f.] bewährt haben, müssen damit immer be-

reichsspezifisch erstellt werden. Eine als Beispiel erstellte spezifische Leitlinie für die Anforderungen an mikrosystemtechnische Sensoren ist in Bild 6.3 dargestellt. Sie orientiert sich an den für Sensoren spezifischen Merkmalsgruppen, wie z. B. den zu messenden Werten, den Eigenschaften des Sensors oder Anforderungen an die elektronischen Daten. Nur so können spezielle Anforderungen z. B. an medizintechnische Produkte berücksichtigt werden.

Überschriften	Beispiele
Messgröße	Nennmessbereich, Richtung, Frequenz, Abtastrate, Geschwindigkeit, Wiederholgenauigkeit, Auflösung, Messgenauigkeit
Verbindung zum Messobjekt	Verbindung, Anordnung, Verformung, Steifigkeit, Entfernung, Beeinflussung der Messgröße, Reibung, Abnutzung, Schnittstellen
Geometrie / Zuverlässigkeit	Gewicht, Werkstoffe, Lebensdauer, Volumen, Höhe, Breite, Länge, Durchmesser, Anzahl, Form, Platzbedarf, Geräuschentwicklung, Hitzeentwicklung, Elektromagnetismus, beteiligte Disziplinen, Zuverlässigkeit
Betriebsbedingungen	Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Elektromagnetische Einflüsse, Licht, Schwingungen, Schutzklasse, vorgeschriebene Werkstoffe, Fehlfunktionen
Elektrische Daten	Spannungsversorgung, Verbindungsart, Stromstärke, Wirkungsgrad, Leistung, Linearität, Ausgangssignal, Signalbearbeitung, Signalspeicherung, Schnittstellen
Ergonomie	Bedienungsablauf, Erkennbarkeit des Layouts, Anzeigen, Ästhetik

Bild 6.3: Hauptmerkmalsleitlinie für Sensoren (Auszug, vollständig in A.3)

- Das Arbeiten mit der **Szenariotechnik** (z. B. [GAUSEMEIER97]): Der gesamte Lebenszyklus des Produktes wird betrachtet und nach lebensphasenrelevanten Anforderungen gefragt.

Eine Konkretisierung der Anforderungen durch die Integration einer speziellen Werteskala parallel zur Anforderungsliste hat sich bewährt, Bild 6.4. Die von Schneider [SCHNEIDER01] entwickelte Anforderungsliste integriert Anforderungsliste und Beurteilungssystem in einer Liste und skaliert Merkmale nach drei Werten:

- Der **Ausschuss-** bzw. **Grenzwert** gibt den Grenzwert an, ab dem eine Eigenschaft nicht mehr erwünscht ist, also 0 Punkte auf der Werteskala nach [VDI2225, S. 4] erreicht.
- Der **Zielwert** entspricht dem Erfüllungsgrad, der bei einem guten Produkt erreicht werden soll. Nach [VDI2225, S. 4] erreicht ein gutes Produkt in der Werteskala 3 von max. 4 Punkten.
- Der **optimale Wert** steht für die ideale Erfüllung einer Produkteigenschaft mit 4 Punkten auf der Werteskala nach [VDI2225, S. 4].




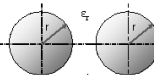
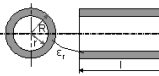

Nummer des Dokumentes		Projektnummer oder Bezeichnung	Verantwortlicher für Erstellen und Pflege des Dokumentes	Datum der letzten Änderung	Versionsnummer	Blatt Nr. / von Gesamtzahl		
Nummer		Projekt	Bearbeiter	Datum	Version	Blatt		
Anforderungsliste für								
F	W	Nr.	Merkmal	Optimalwert	Zielwert	Ausschluss- bzw. Grenzwert	Verwendungsbereich	Verantw./ Quelle

Bild 6.4: Anforderungsliste mit Werteskala nach [SCHNEIDER01, S. 110]

Durch die Integration von Anforderungsliste und Werteskala steigt die Aussagekraft der Anforderungsliste und es wird eine Grundlage für die spätere Bewertung von Lösungen geschaffen. Forderungen müssen bei der Entwicklung umgesetzt werden, Wünsche sollen nach Möglichkeit Berücksichtigung finden. Die zusätzliche Priorisierung der Wünsche (hohe, mittlere und geringe Bedeutung nach [Pahl03, S. 189]) erleichtert die Lösungsbewertung ebenfalls. Im Anhang (A.4) ist die Anforderungsliste mit Ausfüllanleitung enthalten.

6.3 Sammlung physikalischer Effekte

Insbesondere bei disziplinübergreifenden Aufgabenstellungen ist es wichtig, Informationen zu physikalischen Effekten, ihren Eingangs- und Ausgangsgrößen und den verwendeten Werkstoffen verfügbar zu haben. Dazu sind Sammlungen physikalischer Effekte, wie z. B. in [WELP04, S. 100 f.] vorgeschlagen, ein wirksames Hilfsmittel. Bild 6.5 zeigt ein Beispiel für den physikalischen Effekt der elektrischen Kapazität.

Anordnung		Kapazität	Variable
Parallele Platten		$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$	ϵ_r, A, d
Einzelne Kugel		$C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon_r R$	ϵ_r, R
Konzentrische Anordnung		$C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{R \cdot r}{R - r}$	ϵ_r, r, R
Zwei Kugeln		$C = 2\pi \epsilon_r \frac{d^3 + d^2 r - r^3}{d(d^2 - r^2)}$ für $d \gg r$	ϵ_r, d, r
Koaxiale Anordnung		$C = 2\pi \epsilon_r \frac{l}{\ln(R/r)}$	ϵ_r, r, R
Parallele Leitungen		$C = \pi \epsilon_r \frac{l}{\ln(d/r)}$ für $d \gg r$	ϵ_r, l, d, r

Quellen:

- Meschede, D.: Gerthsen Physik. Springer Verlag, Heidelberg, 2004
- Berber, J., Kacher, H., Langer, R.: Physik in Formeln und Tabellen. Teubner Verlag, Stuttgart, 2003

Bild 6.5: Sammlung physikalischer Effekte (Beispiel)

Durch Sammlungen physikalischer Effekte können Entwickler systematisch auch Lösungsmöglichkeiten aus anderen Disziplinen suchen und Lösungsvarianten durch Variation z. B. geometrischer Parameter ausarbeiten.

6.4 Konstruktionskataloge

Für eine Wiederverwendung von Konstruktionswissen ist es sinnvoll, die erarbeiteten Informationen strukturiert abzulegen. Dadurch wird auch die Abhängigkeit vom Wissen des einzelnen Konstrukteurs gelöst [VDI2222, S. 2] und besonders auch bei fachübergreifenden Problemstellungen Wissen allgemein zugänglich gemacht.

Nach Pahl/Beitz [PAHL03, S. 122 ff.] können Ordnungsschemata in tabellarische Lösungssammlungen mit unverbindlichen und Konstruktionskataloge mit verbindlichen Anforderungen an Inhalt, Aufbau und Vollständigkeit unterteilt werden.

Ordnungsschemata sind ein bewährtes Hilfsmittel zur Lösung dieser Problemstellung, um außer physikalischen Effekten, Bild 6.5, auch Lösungsprinzipien für häufig auftretende Teilfunktionen zu strukturieren oder Lösungen durch Variation einzelner Merkmale gezielt zu suchen. Ebenso kann die Werkstoffauswahl durch Kataloge erleichtert werden. Da sie disziplinunabhängig sind, bietet sich ihre Verwendung bei multidisziplinären Aufgabenstellungen in der Mikrosystemtechnik an [LOPEZ05, S. 3].

Dadurch wird eine systematische Sammlung von Prinziplösungen zur Konstruktion von Mikrosystemen ermöglicht, wie sie z. B. für die Entwicklung von Produkten im Maschinenbau [KOLLER94B] bereits existiert. Auch konkrete Lösungen für Teilfunktionen können in Konstruktionskatalogen gespeichert werden [ROTH94A; ROTH94B; SCHNEIDER86]. Auch für die Mikrosystemtechnik gibt es bereits erste Kataloge für Teilbereiche, wie z. B. Mikroaktuatoren [KALLENBACH94, S. 78]. Ein Beispiel für ein Ordnungsschema zur systematischen Variation von Parametern für die Erfassung von Drehwinkeln ist im Anhang (Bild A.7.) enthalten.

Entscheidend für einen schnellen Zugriff auf das gespeicherte Wissen ist der Aufbau des Kataloges. Ein Gliederungsteil ordnet die Lösungen und baut eine Systematik auf. Im Hauptteil sind die eigentlichen Inhalte aufgeführt. Der Zugriffsteil enthält die Eigenschaften der Objekte und ein Anhang kann ergänzende Anmerkungen enthalten [PAHL03, S. 130 f.].

Ansätze zu einer Klassifizierung von Mikrobauerelementen sind in DIN 32563 [DIN32563] enthalten. Die Norm unterscheidet nach geometrischen und Werkstoffmerkmalen, verzichtet aber auf eine Einbeziehung funktionaler Eigenschaften, die für den Ausbau von Konstruktionskatalogen von Bedeutung ist. Die Erstellung und die Eingliederung von Katalogen in den Konstruktionsprozess ist in [VDI2222, S. 4 ff.] ausführlich beschrieben. Sie bietet sich firmenspezifisch und aufgrund des hohen Aufwandes für die Erstellung besonders dann an, wenn oft genutzte Informationen erfasst werden sollen. Aber auch firmenunabhängige Lösungssammlungen bieten deutliche Rationalisierungseffekte, um den hohen Zeitaufwand für die Sammlung von Informationen in der Mikrosystemtechnik [KLAUBERT98, S. 90] zu verringern.

6.5 Auswahlmatrix für Material und Herstellungstechnologie

Die Entscheidung für eine geeignete Herstellungstechnologie beruht auf einer Analyse der Anforderungsliste und des Systemkonzepts. Sie muss möglichst früh im Entwicklungsablauf getroffen werden, weil sie Einfluss auf die weitere Entwicklung des Produktes hat. Wichtig für die Entscheidung sind neben Werkstoffeigenschaften, Stückzahlen, Kosten und der benötigten geometrischen Form auch der vorhandene oder bevorzugte Maschinenpark für die Herstellung, Bild 6.6 [GERLACH97, S. 16].

Einflussfaktoren für die Auswahl des Herstellungsverfahrens

Herstellung	Gebrauch	Wirtschaftlichkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Benötigte Werkzeuge • Bearbeitungszeit • Geometrie • Grenzen der Technologie • 2-/3-dimensional • Stückzahl 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Wärmeleitung • Betriebsspannung • Betriebsstrom • Umweltbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Losgröße • Versionsanzahl • Materialkosten • Herstellungskosten • Montagekosten • Verkaufspreis

Bild 6.6: Einflussfaktoren auf die Auswahl der Herstellungstechnologie


Die vielfältigen Einflüsse bei der Auswahl der Herstellungstechnologie erschweren die Auswahl und erzeugen beim Entwickler in der Mikrosystemtechnik erheblich mehr Informationsbedarf als im Makrobereich [KLAUBERT98, S. 90]. Hilfreich können dafür auch Auswahlmatrizen sein, die mehrere Verfahren im Vergleich gegenüberstellen, Bild 6.7.

	Heißprägen	Masken- strukturierung	Laser- strukturierung	Zweikomponenten- spritzguss	Folienhinter- spritzen
Gestaltungsfreiheit	-	o	o	+	o
Flexibilität bei Layoutänderungen	o	o	+	-	+
Eignung für EMV- Abschirmung	-	+	+	+	-
Investitions- / Werkzeugkosten	+	o	o	-	o
Durchkontaktierung mit / ohne Zusatzmaßnahmen	mit	ohne	ohne	ohne	ohne
Eignung für dekorative Oberflächen	+	-	-	+	+
Effizienz des Herstellungsprozesses	+	-	-	+	+
Flexibilität des Schichtaufbaus	o	+	+	+	o
Eignung für feine Leiterbahnen	-	+	+	-	+
Umweltbelastung	+	o	o	o	+
Multilayerfähigkeit	-	-	-	-	+
+ sehr gut o mittel - schlecht					

Bild 6.7: Technisch-wirtschaftliche Möglichkeiten der MID-Herstellungsverfahren [FVMID04, S. 151, PÖHLAU98, S. 63 ff.]

Nützlich für die Auswahl von Herstellungsverfahren und zugleich für die Vorgabe von Gestaltungsregeln sind auch Datenblätter mit aktuellen Grenzen der Herstellungsverfahren, Bild 6.8.

Diese Datenblätter geben für verschiedene Herstellungsverfahren Zahlenwerte für technologische Daten an. Sie können als Informationsspeicher dienen, müssen aber aufgrund der schnellen Weiterentwicklung der Technologie stets auf dem aktuellen Stand gehalten werden.



Institut für Konstruktionstechnik
 und Technisches Design
 Universität Stuttgart

Gestaltungsregeln	Beschichtung	
MID		Wa 02/2005

	2K-Spritzguss	Heißprägen	Masken-Strukturierung	Laser-Strukturierung	Folienhinterspritzen
Cu-Schichtdicke min. [µm]	1	12	5	9	15
max. [µm]	50	150	70	50	70
Oberflächenrauigkeit min. [µm]	Ni 1	Ni 1	Ni 1	Ni 3	Ni 1
max. [µm]	Au 0.1	Au 0.1	Au 0.1	Au 0.1	Au 0.1
Beschichtungsfläche max. [cm ²]	12	0.8	5	2	12
Tiefenausdehnung max. [mm]	begrenzt d. Haftung		2500	400	75% der Folienfläche
Leiterbahnbreite min. [µm]	200	200	125	80	100
Leiterbahnabstand min. [µm]	250	300	125	40	100

Bild 6.8: Grenzen der Herstellungsverfahren (nach: FVMID98, S. 3-2)

6.6 Wirkstruktur

Der Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik ist stark von Iterationen geprägt, die aufgrund von Auswirkungen von technologischen Weiterentwicklungen oder Problemen auftreten. Durch Simulation des Systems oder Vorüberlegungen zu Wechselwirkungen zwischen Elementen können Systemeigenschaften vorhergesagt und Iterationen minimiert werden.

Wichtig dafür ist eine Betrachtung des Gesamtsystems, denn die Funktion der einzelnen Komponenten ist sozusagen nur die notwendige, aber nicht die hinreichende Bedingung für die Leistungsfähigkeit des Systems. Dafür fehlen bisher leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge und -methoden, die den Zusammenhang der Komponenten im Gesamtsystem betrachten [MSTONLINE05B]. Geeignete Werkzeuge müssen den Entwickler darin unterstützen, Zusammenhänge, insbesondere Kopplungen und Wechselwirkungen, zu erkennen und anschließend zu beseitigen.

Ausgehend von funktionellen Anforderungen, aber auch Randbedingungen für das System, die sich z. B. aus der Sicht der Fertigung ergeben, erfolgt die Entwicklung eines Mikrosystems in der Regel mit zunehmendem Konkretisierungsgrad, Bild 6.9. Dieser Prozess wird durch verschiedene Modelle unterstützt, die eine Strukturierung in den einzelnen Phasen der Produktentwicklung ermöglichen.

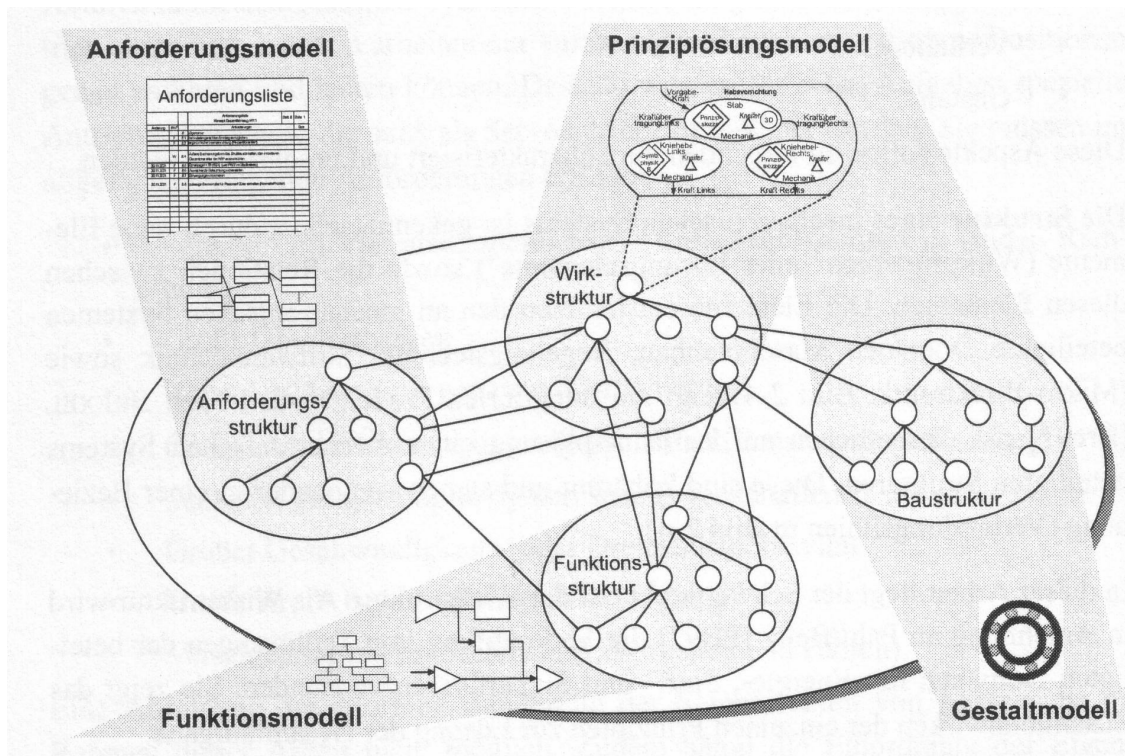


Bild 6.9: Unterstützung der Produktentwicklung durch Modelle [KÖCKERLING04, S. 14]

Das Verhalten eines Systems beruht auf den von ihm erfüllten Funktionen [KÖCKERLING04, S. 15]. Technische Funktionen beschreiben die Einwirkung des Systems auf den Zustand von Stoff-, Energie- und Signalflüssen [MÜLLER90, S. 59], insbesondere den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen sowohl eines Gesamtsystems als auch seiner Teilsysteme. Die abstrakte und lösungsneutrale Formulierung von Teilfunktionen und ihrem funktionellen Zusammenhang liefert einen wichtigen Beitrag zum Definieren und Überprüfen der gewünschten Gesamtfunktion in der Funktionsstruktur.

Realisiert werden Teilfunktionen im mechanischen Bereich in der Regel durch physikalische Effekte, die auch als physikalische Wirkprinzipien bezeichnet werden, wenn sie konkret einer Teilfunktion zuzuordnen sind [BEITZ97, S. F3].

Das Wirkprinzip wird in die Einflussgrößen Geometrie (Wirkort, Wirkflächen, Wirkbewegungen), Stoff (Werkstoff) und Betriebsparameter (interne und externe Einflüsse) gegliedert [JUNG91, S. 29 f.], Bild 6.10.

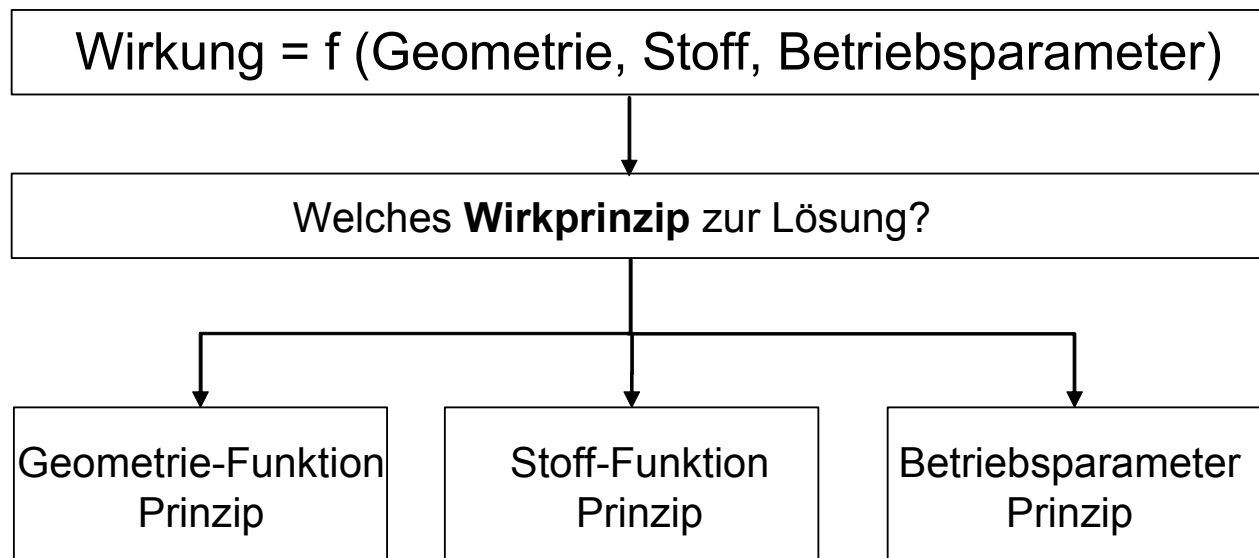


Bild 6.10: Einflussfaktoren auf die Wirkstruktur [nach JUNG91, S. 29]

Das verwendete Wirkprinzip und der Zusammenhang zwischen Bauelementen sind entscheidend für die Funktion aller technischen Produkte, so dass Verhalten und Struktur eines Systems eng miteinander verknüpft sind [KÖCKERLING04, S. 16]

Für mechanische Systeme wird dieser Wirkzusammenhang der Bauelemente durch die Wirkstruktur beschrieben. Die Wirkstruktur wird dabei verstanden als „Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion“ [PAHL03, S. 751]. Sie nimmt eine zentrale Stellung für ein integriertes Produktmodell ein, weil sie Anforderungsmodell, Funktionsmodell, Prinziplösungsmodell und Gestaltmodell verbindet, Bild 6.9. Auch in der Mechatronik erfolgt die Produktentwicklung von der Funktionsstruktur über die Wirkstruktur zur Baustruktur [GAUSEMEIER02, S. 8; KÖCKERLING04, S. 14]. Damit bietet die Wirkstruktur eine Möglichkeit, funktionsentscheidende Zusammenhänge darzu-

stellen und den Übergang von der abstrakten Funktion zur konkreten Umsetzung in der Konzeptphase zu unterstützen.

In den aktuellen Anwendungsbereichen wird der Begriff der Wirkstruktur vorwiegend für den geometrischen und mechanisch-funktionalen Zusammenhang in technischen Systemen benutzt und ausschließlich in der Konzeptphase verwendet. Für die Mikrosystemtechnik sind aber Zusammenhänge zwischen den Wirkelementen von Bedeutung, die in Art und Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren darüber hinaus gehen. So spielen zusätzlich z. B. optische oder elektrische Effekte eine wichtige Rolle, bei denen auch ein Wirkraum berücksichtigt werden muss, der die eigentliche Bauelementgeometrie überlagert. Da insbesondere unerwünschte Wirkungen physikalischer Effekte und externe Einflussgrößen auch über die Konzeptphase hinaus von Bedeutung sind, ist eine Verwendung der Wirkstruktur auch in der Gestaltungsphase wünschenswert. Zusätzlich wäre die Erleichterung der Einbindung von Simulationsprogrammen und anderen CAx-Anwendungen sinnvoll.

Für eine Verwendung zur Unterstützung der Systementwicklung in der Mikrosystemtechnik muss die Wirkstruktur im klassischen Sinne also ergänzt und angepasst werden. Die nachfolgend dargestellte Erweiterung für die Mikrosystemtechnik beruht auf zwei Elementen: einer erweiterten Wirkstruktur und einer Wirkstrukturmatrix, die externe und wechselseitige interne Einflussfaktoren berücksichtigt und rechnergestützt ausgewertet werden kann.

Eine Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik erfordert die in Bild 6.11 dargestellten Elemente.

Bauelemente des Mikrosystems, die als Wirkelemente eingesetzt werden, müssen in der Wirkstruktur dargestellt werden, im Idealfall mit ihren geometrischen Abmessungen, um den Bauraum überprüfen zu können.

Der geometrische Aufbau des Gesamtsystems und die Lage der Bauelemente zueinander liefern weitere wichtige Informationen zu wechselseitigen Einflüssen der Bauelemente aufeinander, die aufgrund der hohen Integration in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle spielen. Die Freiheitsgrade für die mechanische Verknüpfung der Bauelemente oder z. B. ihre Befestigung auf einem Gehäuse

oder einer Bodenplatte sind entscheidend für die Wahl einer geeigneten Verbindungsart und sollen deshalb ebenfalls dargestellt werden.

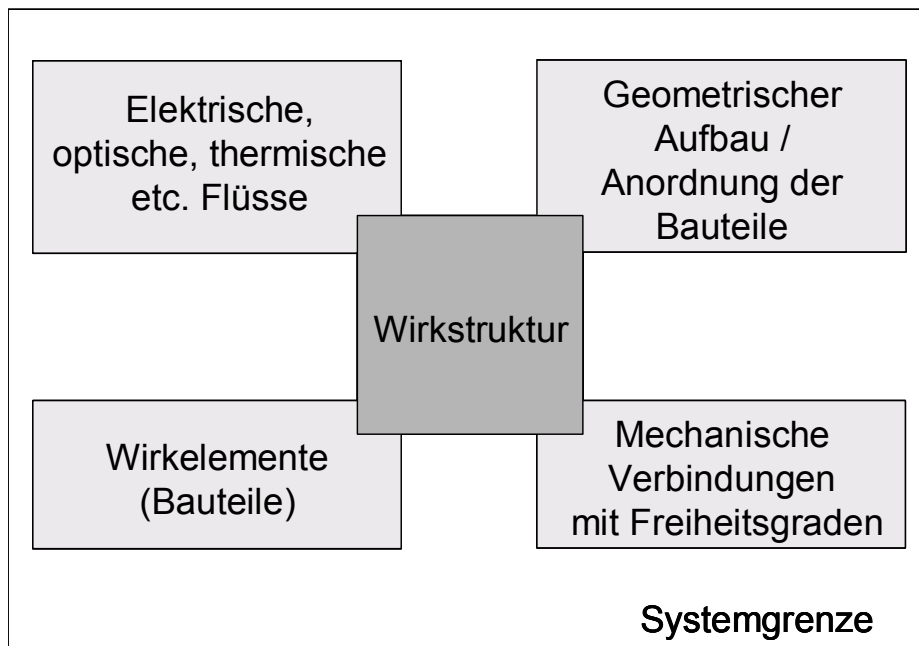


Bild 6.11: Elemente einer Wirkstruktur für Mikrosysteme

Weit über die Bedeutung in der (makro)mechanischen Technik hinaus spielen verschiedenste Flüsse, z. B. elektrischer, optischer, thermischer oder nuklearer Natur, in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle. Zu unterscheiden sind Operanden, auf die zielorientiert einzuwirken ist, und Operatoren, die Träger der erforderlichen Einwirkung sind [MÜLLER90, S. 6]. Operanden können von Natur gegeben und / oder technisch erzeugt sein und sind stofflicher, energetischer oder informatorischer Natur, z. B. als Eingangssignal für einen Sensor. Operatoren werden technisch bereitgestellt und sind stofflicher oder energetischer Natur, z. B. elektrische Energie für eine Stoffumwandlung, während informatorische Operanden eines (energetischen oder stofflichen) Trägers bedürfen. Die technische Funktion des Wirkelementes besteht in der Veränderung, Verarbeitung oder Speicherung des Operanden. Erwünschte Operanden und Operatoren müssen im vorgesehenen Einflussbereich geleitet werden. Interne und externe Störfaktoren müssen durch eine funktionsfähige Abschirmung an einer Störung der Systemfunktion gehindert werden.

Aufbauend auf diesen Anforderungen wurde eine erweiterte Wirkstruktur erarbeitet, die speziell für Mikrosysteme das Verständnis des Systemzusammenhangs fördern soll, aber auch auf andere Bereiche übertragen werden kann. Die Darstellung der erforderlichen Elemente baut auf den in Bild 6.12 dargestellten Symbolen auf.

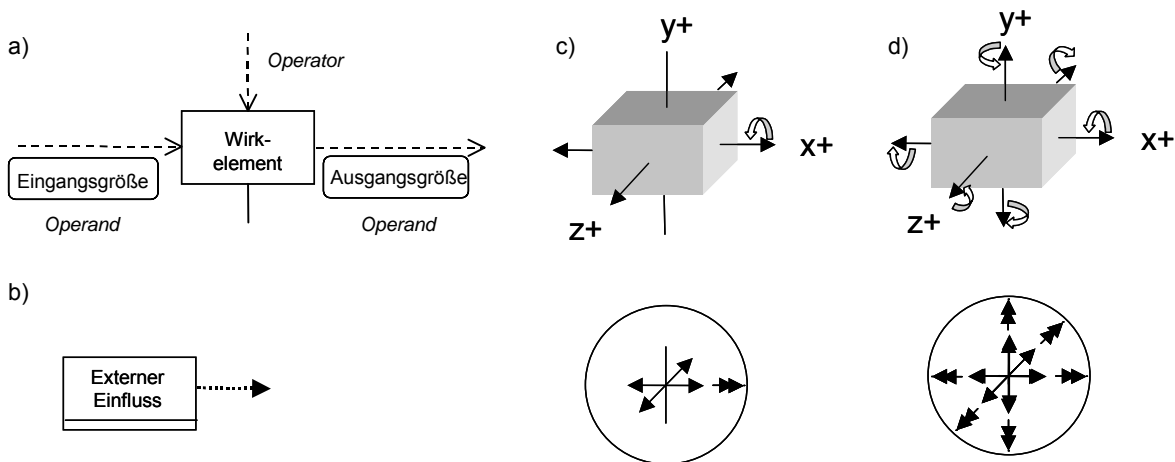


Bild 6.12: Symbole der Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik

- a) Wirkelement b) Externer Einfluss
- c,d) Mechanische Verbindung

Das Wirkelement (a) kann als Symbol oder aber mit seiner tatsächlichen Form dargestellt werden. Operanden und Operatoren und damit die Flüsse im System können durch gestrichelte Pfeile gerichtet dargestellt werden, mechanische Verbindungen durch Linien. Externe, nicht für die Funktion vorgesehene Einflüsse (b), werden mit gepunkteten Pfeilen grundsätzlich bis an die Systemgrenze herangeführt. Mechanische Verbindungen der Wirkelemente (c und d) können mit einfachen Pfeilen für die vorgesehenen translatorischen und doppelten Pfeilen für die (mathematisch positiven) rotatorischen Freiheitsgrade dargestellt werden.

Aufbauend auf diesen Vorgaben wurde eine erweiterte Wirkstruktur eines Drehgebers erstellt, die zusätzlich Einflussgrößen berücksichtigt, die z. B. nicht-mechanisch sind oder als externe Störgrößen auftreten, Bild 6.13.

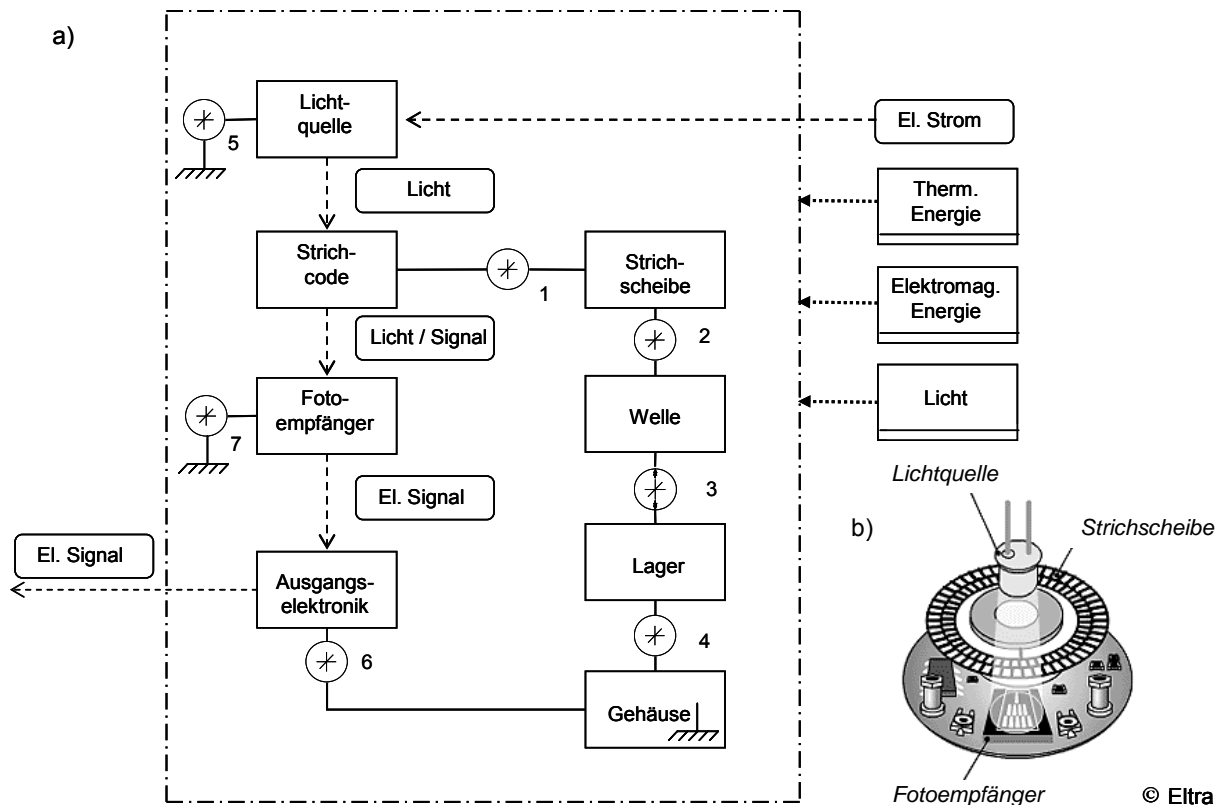


Bild 6.13: Wirkstruktur eines Drehgebers

Die erweiterte Wirkstruktur gibt einen Überblick über den Drehgeber, seine Wirkelemente und die Freiheitsgrade ihrer Verbindungen. Darüber hinaus sind die elektrischen und optischen Flüsse, aber auch äußere Störgrößen wie z. B. elektromagnetische Energieflüsse dargestellt, so dass das System in seiner Gesamtheit abgebildet wird. Durch das Erstellen der Wirkstruktur werden zunächst die Betrachtung des gesamten Systems gefördert und sein Aufbau, aber auch einwirkende Einflussfaktoren betrachtet. Allein diese Betrachtung hat in den Projekten, in denen das Verfahren eingesetzt wurde, schon zu mehr Klarheit über den Aufbau des Systems geführt. Eine weitergehende Unterstützung insbesondere der Kommunikation zwischen den beteiligten Teildisziplinen lässt sich durch das Aufstellen der Wirkstrukturmatrix erreichen.

Die Analyse z. B. der geometrischen, physikalischen oder funktionalen wechselseitigen Einflüsse der einzelnen Elemente eines Systems oder seiner Umgebung können aufbauend auf der Wirkstruktur in einer Matrix dargestellt werden, Bild 6.14.

Wirkstrukturmatrix																							
	Art / Material	Fotoempfänger	Codierstriche	Lichtquelle	Codierscheibe	Analyse IC	Welle	Lager	Gehäuse	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4	Verbindung 5	Verbindung 6	Verbindung 7	El. Strom	Licht	Licht / Signal	El. Signal	Therm. Energie	Elektromagn. Energie	Externes Licht
Fotoempfänger				←												←		←	←			←	←
Codierstriche		←		←	←	←					←											←	
Lichtquelle		←												←			←						
Codierscheibe			←							←	←												
Analyse IC		←	←												←					←	←	←	
Welle					←				←		←	←											
Lager	radial						←		←			←	←									←	
Gehäuse	Kunststoff	←		←	←	←		←					←	←	←	←		←	←		←	←	←
Verbindung 1	Laser		←		←																		
Verbindung 2	kleben				←		←															←	
Verbindung 3							←	←															
Verbindung 4								←	←														
Verbindung 5				←					←														
Verbindung 6	kleben					←			←														
Verbindung 7		←						←															
El. Strom																							
Lichtstrahl				←				←															
Licht / Signal		←	←	←	←			←															
El. Signal		←				←																	←
Therm. Energie								←	←														
Elektromagn. Energie		←		←	←																		
Externes Licht																							



 Einfluss auf anderes Element
 Verbindung von Elementen

Bild 6.14: Wirkstrukturmatrix eines Drehgebers

Die auf der Design Structure Matrix (DSM) [WARFIELD73, S. 441 ff.] aufbauende Wirkstrukturmatrix enthält alle Systemelemente und Einflussgrößen sowohl in den Spalten als auch den Reihen der Matrix. In den Schnittpunkten können Abhängigkeiten bzw. Einflüsse qualitativ erfasst und für die Systemerstellung und –optimierung genutzt werden. Die schattierten Schnittpunkte heben die durch eine Verbindung zusammenhängenden Bauteile hervor.

So wird z. B. der Fotoempfänger durch die Lichtquelle beeinflusst (Wellenlänge etc.), es muss eine geeignete Verbindung zum Gehäuse gewählt und es muss ein Licht/Signal aufgenommen werden. Weitere Einflüsse gehen aber auch vom Licht aus, das innerhalb des Gehäuses unerwünscht vorhanden ist (z. B. durch Reflexion). Darüber hinaus können Einflüsse durch externes Licht oder je nach Bauart des Empfängers auch durch externe elektromagnetische Felder auftreten. Durch die Erfassung der Einflüsse wird erreicht, dass sie im Laufe der Entwicklung berücksichtigt werden können, so dass bei der Konstruktion oder Aus-

wahl eines Fotoempfängers seine Funktion gewährleistet wird und mögliche Fehlerquellen vermieden werden.

In einem weiteren Schritt ist eine rechnerunterstützte Optimierung denkbar, indem in den Schnittpunkten Abhängigkeiten nicht mehr qualitativ erfasst, sondern durch hinterlegte Formeln oder Simulation berechnet werden. Dies muss für die möglichen Einflussarten getrennt geschehen, so dass eine dreidimensionale Matrix entsteht, wie sie in Bild 6.15 für drei Einflussarten beispielhaft dargestellt ist.

Wirkstrukturmatrix	Nature / material	Fotoempfänger	Codierstriche	Lichtquelle	Codierscheibe	Analyse IC	Welle	Lager	Gehäuse	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4	Verbindung 5	Verbindung 6	Verbindung 7	El. Strom	Lichtstrahl	Licht / Signal	El. Signal	Therm. Energie	Elektromagn.Energie	Externes Licht	Externes Licht	
		Fotoempfänger				←																			
Codierstriche		←			←	←					←														
Lichtquelle		←																							
Codierscheibe			←							←	←														
Analyse IC		←	←																		←	←	←		
Welle					←				←		←	←													
Lager	radial							←				←	←												
Gehäuse	Kunststoff	←		←	←	←		←					←	←	←	←									
Verbindung 1	Laser		←		←																				
Verbindung 2	kleben				←			←																	
Verbindung 3								←	←																
Verbindung 4								←	←																
Verbindung 5					←				←	←															
Verbindung 6	kleben					←			←	←															
Verbindung 7		←							←	←															
El. Strom																									
Lichtstrahl				←					←																
Licht / Signal		←	←	←	←				←																
El. Signal		←				←																			
Therm. Energie								←	←																
Elektromagn.Energie		←		←	←																				
Externes Licht																									

Bild 6.15: Wirkstrukturmatrix eines Drehgebers mit Simulation der Einflüsse

Damit kann z. B. eine thermische Energie, die von einem Bauelement ausgeht, für einen gegebenen Bauraum mit Wirkelementen unter verschiedenen Einsatzbedingungen simuliert und auf die Wirkungen auf das Gesamtsystem hin untersucht werden.

6.7 Fertigungsgerechte Gestaltung

Konstruktive Gestaltungsregeln sind für optimale Funktion und Handhabbarkeit / Montage unter Berücksichtigung der Technologie sinnvolle Hilfsmittel [DÖTZEL94, S. 100]. Um die Arbeit von Konstrukteuren zu unterstützen, gibt es z. B. für den Maschinenbau in vielen Bereichen Konstruktionsregeln, die sich aus den Erfahrungen mit früheren Konstruktionen ableiten. Zur Ermittlung von Gestaltungsregeln bieten sich grundsätzlich mehrere Vorgehensweisen an, Bild 6.16.

Zunächst einmal gibt es bereits eine Reihe von Gestaltungsregeln in anderen Bereichen der Technik. Im Maschinenbau gelten Gestaltungsregeln als bewährte Hilfsmittel in der Konstruktion. Für verschiedene Fertigungsverfahren, z. B. Fräsen oder Gießen [PAHL03, S. 426 ff.], aber auch für verschiedene Werkstoffe, z. B. Kunststoffe [LEE98], und Teildisziplinen, z. B. die Feinwerktechnik [HILDEBRAND82, JUNG89], sind sie Stand der Technik. Für die Mikrosystemtechnik gibt es Ansätze für Gestaltungsregeln z. B. für die LIGA-Technik [LEBMÖLLMANN92] oder die Bearbeitung von Teilen durch mikromechanische Bearbeitungsverfahren [ALBERS02A, S. 1]. Auch für die 3D-MID-Technik wurden erste Gestaltungsrichtlinien erstellt, allerdings nicht gezielt für die Verwendung in der Mikrosystemtechnik [FRANKE95, PÖHLAU98]. Alle diese Regeln bieten eine gute Grundlage für mikrosystemspezifische Gestaltungsregeln.

Durch die Analyse existierender MST-Bauelemente in MID-Technik können z. B. Merkmale gesammelt werden, die den geometrischen Aufbau und die verwendeten Werkstoffe und Herstellungstechnologien beschreiben. Daraus können dann Gestaltungsregeln abgeleitet werden. Die Betrachtung des MID-Herstellungsprozesses und der verschiedenen verwendeten Technologien erlaubt die Ableitung von Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Fertigungsverfahren sowohl einzeln, als auch im Zusammenhang der Fertigungsfolge.

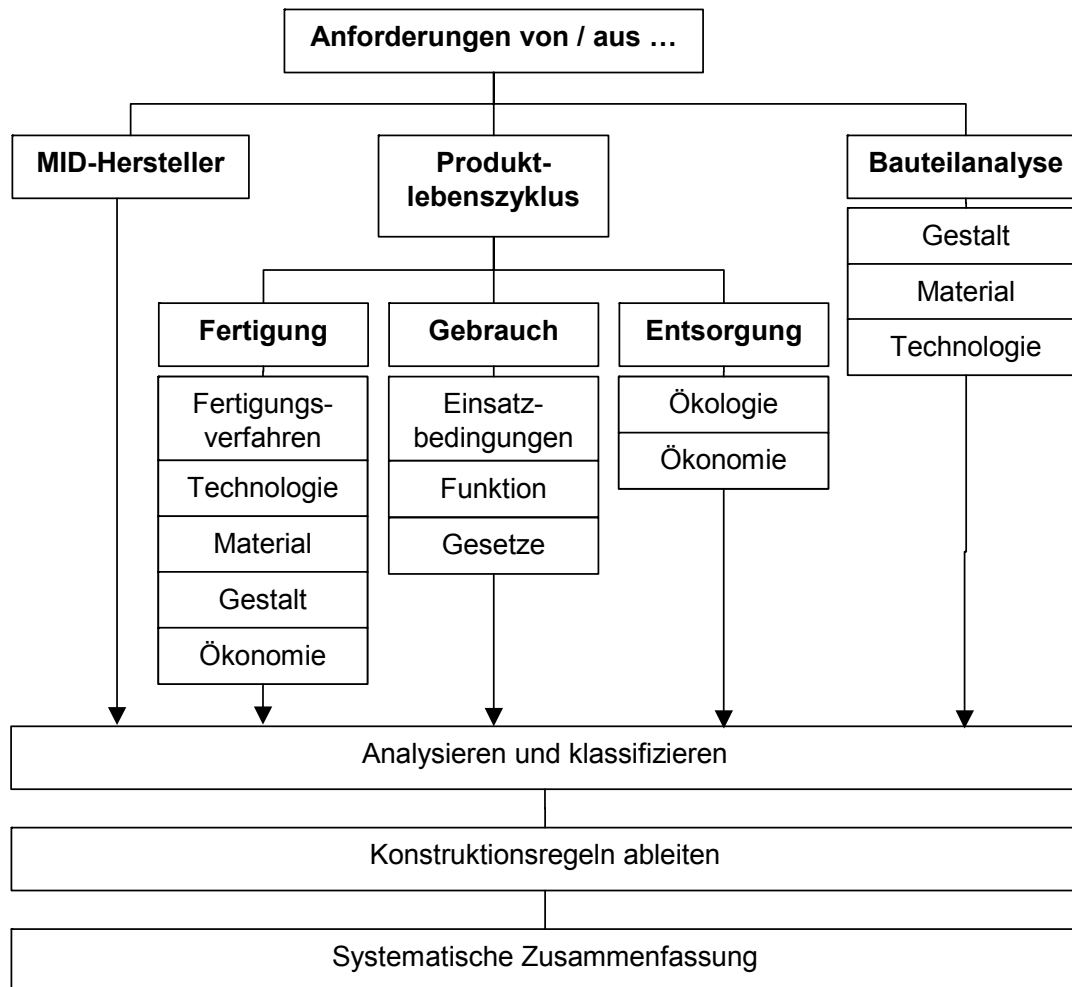


Bild 6.16: Vorgehensweise zur Ableitung von Konstruktionsregeln

Durch diese Vorgehensweisen wurden unter Anleitung des Verfassers eine Reihe von Konstruktionsrichtlinien für MID-Mikro-Bauelemente erarbeitet, Bild 6.17. Ausführlichere Auszüge der Regeln sind im Anhang A.5 enthalten.

Auch Gestaltungsregeln sind in der Mikrosystemtechnik stark abhängig von Herstellverfahren und Anwendungsgebiet. Darüber hinaus unterliegen sie einer durch die rasche Veränderung der Randbedingungen geprägten Weiterentwicklung. Sie müssen daher unternehmensspezifisch erarbeitet und ständig aktualisiert werden. Dann sind sie allerdings eine große Hilfe bei der Konstruktion und sichern vor allem Wissen, das sonst nur in den Köpfen der Mitarbeiter verankert ist.

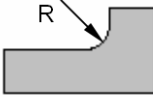
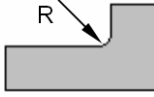


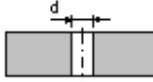
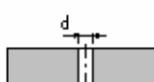
Produktphase	Kriterium	Gestaltungshinweis	Beispiel	
			geeignet	ungeeignet
		1.1.1 Kleinste Innenradien (abhängig vom Fertigungsverfahren)	 typ. $R \geq 20 \mu\text{m}$	 mögl. $R \geq 5 \mu\text{m}$ [IMM05A]
		1.1.2 Gleiche Radien verwenden, um Werkzeugkosten niedrig zu halten		
		1.1.3 Kleinste Bohrungsdurchmesser	 $d \geq 30 \mu\text{m}$ [ZUMTOBEL05]	

Bild 6.17: Gestaltungsregeln für MID-Mikrobauelemente

Um die Praxistauglichkeit der Gestaltungsregeln und der anderen Methoden zu überprüfen, wurde die im nächsten Kapitel dargestellte Evaluation anhand von Entwicklungsprojekten und Befragungen durchgeführt.

7 Evaluation - Einsatzbeispiele und Befragung

Die Evaluation einer Methodik wie der hier dargestellten erfordert ihre intensive Anwendung und Überprüfung in der Praxis, also in verschiedenen Unternehmen und für verschiedene Produkte. Dies kann allein schon aufgrund der dafür erforderlichen zeitlichen Dauer im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur ansatzweise geleistet werden.

Um trotzdem eine Überprüfung der entwickelten Methodik und der unterstützenden Methoden auf Anwendbarkeit und Wirkung in der Praxis zu realisieren, bietet sich eine Überprüfung von Teilbereichen der Methodik an. Daher wurden Methodik und Methoden unter Anleitung des Verfassers dieser Arbeit in insgesamt drei Entwicklungsprojekten für unterschiedliche Phasen der Entwicklung angewendet und evaluiert. Zusätzlich wurde die Vorgehensweise zur Ableitung von Gestaltungsregeln in einer weiteren Arbeit überprüft.

Die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise wurde in Zusammenarbeit mit mehreren Forschungsinstituten und Industrieunternehmen evaluiert. Dazu wurden die Grundannahmen und die erarbeitete Methodik in einem Vortrag ausführlich vorgestellt und anhand von Leitfragen die Anwendbarkeit in der Praxis intensiv diskutiert. Dies ersetzt zwar nicht die Erprobung im realen Einsatz, ermöglicht aber zumindest eine Identifizierung von offensichtlich nicht umsetzbaren Teilen der Methodik.

Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben und sind zusätzlich in Form von Ergänzungen in die Methodik eingeflossen.

7.1 Anwendung in Projekten

Die Überprüfung in Entwicklungsprojekten erfolgte im Rahmen der Entwicklung von drei verschiedenen Sensoren. Ein Neigungssensor und ein Drehwinkelsensor wurden bis zum Konzept entwickelt. Bei einem neuartigen Luftmassensensor, der für ein Unternehmen entwickelt wurde, lag das Konzept bereits vor, so dass hier der Schwerpunkt auf den späteren Phasen der Entwicklung lag.

7.1.1 Entwicklung eines Neigungssensors

Im Rahmen des ersten Evaluierungsprojektes wurde ein Konzept für einen Neigungssensor auf Basis der MID-Technik entwickelt. Die Aufgabenstellung umfasste den ersten Teil der Methodik und endete unmittelbar vor der Erstellung eines ersten Labormusters bzw. Demonstrators, Bild 7.1 (dunkel markierter Bereich). Teilergebnisse der Entwicklung sind in Anhang A.6 enthalten.

Ein Schwerpunkt lag auf der intensiven Betrachtung der Lebensphasen des Produktes und der potenziellen Anwendungsgebiete mittels einer Produkt-Markt-Matrix (Bild A.6.0.1). Ein Erfolg versprechendes Marktsegment wurde aufgrund einer Marktanalyse ausgewählt. Darauf basierend wurde eine erweiterte Anforderungsliste erstellt, die Aufgabenstellung abstrahiert und eine Funktionsstruktur erarbeitet (Bild A.6.0.2)

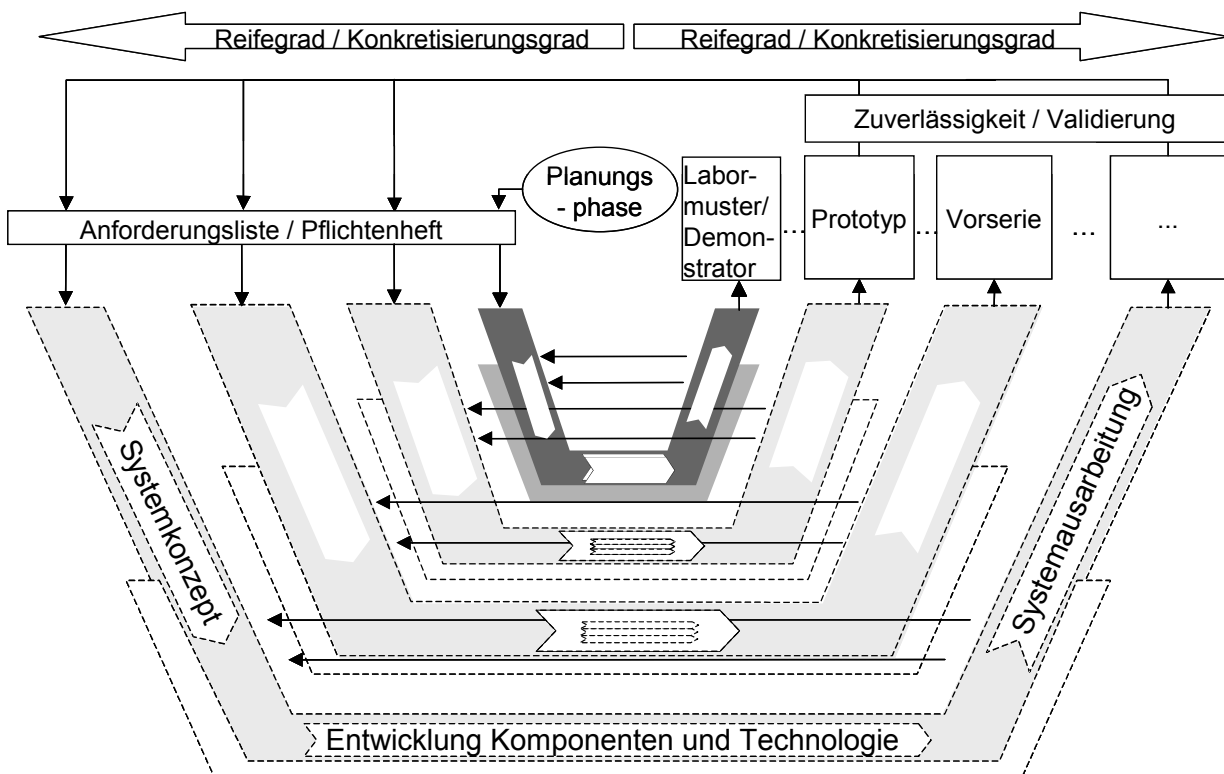


Bild 7.1: Einordnung des ersten und zweiten Erprobungsprojektes

Lösungsprinzipien für die einzelnen Teilfunktionen wurden erarbeitet und in Form eines morphologischen Kastens zusammengestellt, Bild A.6.0.3. Es ergeben sich eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten, aus denen die Beste nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien ausgewählt wurde, Bild A.6.0.4. Für diese

Lösung wurde abschließend die Wirkstruktur erstellt, um das Systemkonzept zu überprüfen und umzusetzen.

Diese Entwicklungsaufgabe wurde von einem Ingenieur bearbeitet, der mit der Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 2221 im Maschinenbau vertraut ist. Bei der Bearbeitung dieser Entwicklungsaufgabe wurde deutlich, dass die Hauptschwäche der Richtlinie das Erkennen von physikalischen Verträglichkeiten aus der Wirkstruktur und zwischen einzelnen physikalischen Prinzipien ist. Speziell für interdisziplinäre Aufgabenstellungen, die domänenübergreifend bearbeitet werden müssen, führt dies zu Problemen. Dadurch wurde z. B. die Erstellung der Funktionsstruktur und damit das Umsetzen der Aufgabenstellung erschwert. Für die Behebung dieser Problematik konnte die Wirkstruktur eine gute Unterstützung bieten.

Der Ablauf der hier dargestellten Methodik konnte im Rahmen der Arbeit genutzt werden und erwies sich als praxistauglich.

7.1.2 Entwicklung eines Drehwinkelsensors

Projektziel des zweiten Evaluierungsprojektes war die Entwicklung eines Drehwinkelsensors. Ebenso wie beim in 7.1.1 beschriebenen Neigungssensor umfasste die Aufgabenstellung die Entwicklung bis zum fertigen Konzept, Bild 7.1, also die innerste „Schleife“ des V-Modells. Verlauf bzw. Teilergebnisse der Entwicklung sind in Anhang A.7 dokumentiert. Der Schwerpunkt dieser Entwicklungsaufgabe lag auf der systematischen Lösungssuche.

Für die Erfassung der Anforderungen wurde die erweiterte Anforderungsliste (Kap. 6.2) verwendet (Anhang Bild A.7.1), deren Inhalte sich auch im weiteren Verlauf des Projektes für die Bewertung der zunächst alternativ erarbeiteten Konzepte als nützlich erwies. Zunächst wurde die Aufgabenstellung abstrahiert und eine Funktionsstruktur (Anhang Bild A.7.2) erstellt. Für die Lösungssuche wurden physikalische Wirkprinzipien gesucht, auf deren Basis ein Drehwinkelsensor ermöglicht werden kann. Für darauf beruhende Lösungsansätze wurden dann systematisch anhand der veränderlichen Parameter Lösungsmöglichkeiten erarbeitet und in Form eines Ordnungsschemas dokumentiert, Bild A.7.3. Nach einer grundsätzlichen theoretischen Überprüfung der erreichbaren Auflösung

wurden aufgrund einer ausführlichen Bewertung nur zwei mögliche Lösungen weiter verfolgt. Für diese Lösungen wurden Wirkstrukturen (Bild A.7.4) und Wirkstrukturmatrizen erstellt, um Zusammenhänge zwischen den Komponenten zu überprüfen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte die grundsätzliche Umsetzbarkeit der Methodik nachgewiesen werden. Der Ablauf funktionierte problemlos und führte zu sinnvollen Ergebnissen. Zusätzlich wurde eine Reihe von Lösungsansätzen für zukünftige Projekte in Form von Lösungskatalogen gesammelt und systematisch geordnet. Die Wirkstruktur und die Wirkstrukturmatix waren für die Bearbeitung sehr hilfreich und konnten insbesondere Zusammenhänge gut verdeutlichen.

7.1.3 Entwicklung eines Luftmassensensors

In Zusammenarbeit mit einem namhaften Automobilzulieferer wurde in diesem Projekt unter Anleitung des Autors der vorliegenden Arbeit ein Luftmassensensor nach einem neuartigen Wirkprinzip entwickelt.

Bei Start des Projektes stand das Wirkprinzip fest, so dass aufbauend darauf die Aufgabenstellung darin bestand, den bestehenden Demonstrator in einen Prototypen umzusetzen. Damit umfasste die Aufgabenstellung die zweite Schleife des Entwicklungsablaufs, Bild 7.2.

Der Entwicklungsprozess wurde gemäß dem in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Ablauf geplant und durchgeführt. Ein besonderer Vorteil entstand durch die Bearbeitung des Konzeptes in einem interdisziplinären Team. Es konnte eine erhebliche Effizienzsteigerung in den zeitlichen Abläufen aufgrund des Entfalls des Abgleichaufwands zwischen den Domänen in der anschließenden Systemintegration erzielt werden. Weiter konnte festgestellt werden, dass die Methodik in der Praxis anwendbar ist und den Entwicklungsablauf unterstützt. Auch die Integration von domänenspezifischen Vorgehensweisen erscheint möglich. Besonders hervorgehoben wurde die Wirkstruktur, die wesentlich zu einer verbesserten Kommunikation zwischen den Domänen und zur frühzeitigen Abstimmung der Komponenten beigetragen hat.

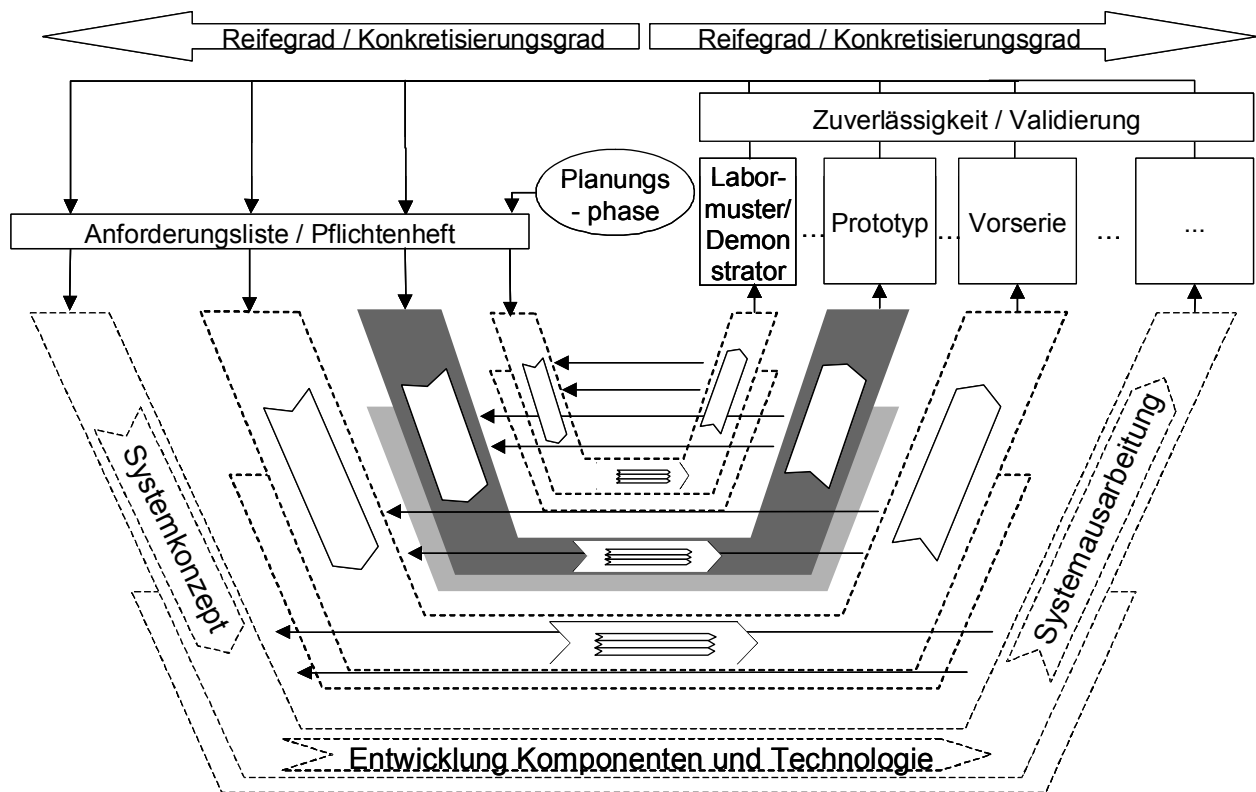


Bild 7.2: Einordnung des dritten Erprobungsprojektes

7.2 Evaluierung mit Industrieunternehmen

Für die Evaluierung wurde die Methodik insgesamt sechs Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen vorgestellt. Dies waren neben dem Institut für Zeitmesstechnik, Fein- und Mikrotechnik (IZFM) der Universität Stuttgart die Unternehmen Harting KG in Biel in der Schweiz, Festo AG in Esslingen, Böhringer microparts in Dortmund und das Unternehmen X. Befragt wurden jeweils Entwicklungsverantwortliche und Entwickler aus dem Bereich Mikrosystemtechnik.

Den Befragten wurde jeweils vorab eine Beschreibung des Forschungsvorhabens und eine Liste mit Leitfragen (s. Anhang A.8) zur Verfügung gestellt. Dann wurden bei vier Unternehmensbesuchen die Voraussetzungen der vorliegenden Arbeit, die Methodik und auch die für die Mikrosystemtechnik entwickelten Methoden präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse wurden in Form von Protokollen (Anhang A.9 bis A.11) zusammengestellt.

Da die beteiligten Unternehmen in sehr verschiedenen Branchen tätig sind und sich auch in Größe, verwendeten Herstellungsverfahren und zum Teil bearbeiteter Phase des Entwicklungsprozesses stark unterscheiden, konnte ein sehr breites Spektrum an Meinungen gesammelt werden.

Die in Kapitel 2 dargelegten Annahmen wurden von den Unternehmen bestätigt bzw. mit den Aussagen der Unternehmen ergänzt. Insbesondere das Fehlen von klaren Anforderungen ist ein großes Problem, das auch in der Praxis zu unnötigen Zeitverzögerungen führt. Die Interdisziplinarität und die ständige Weiterentwicklung der Technologie wird auch von den Unternehmen als große Herausforderung gesehen, die sich allerdings je nach Branche unterschiedlich auswirkt. Die Hauptprobleme der Unternehmen unterscheiden sich zum Teil grundlegend. In manchen Branchen sind der Kostendruck und die schnelle Weiterentwicklung der Technologie das Hauptproblem, während andere zum Teil extern fertigen lassen und so die teure eigene Weiterentwicklung von Herstellungstechnologien vermeiden. In anderen Branchen spielen langjährige Zulassungsverfahren und Zertifizierungen, die auch die Herstellungsverfahren mit einbeziehen eine große Rolle. Dadurch bedingt bemühen sich die Unternehmen, bei der Herstellungstechnologie jedes zu große Risiko zu vermeiden.

Die grundsätzliche Vorgehensweise wird in den Unternehmen sehr unterschiedlich gehandhabt, vom Fehlen bis hin zur genauen Vorgabe einer Vorgehensweise mit entsprechenden Unterlagen. Alle Unternehmen halten eine systematische Vorgehensweise für sinnvoll und wichtig. Speziell bei kleineren Unternehmen wird das Fehlen zum Teil durch eine auch räumlich sehr enge Zusammenarbeit der Entwickler kompensiert. Dies stützt den interdisziplinären Informationsaustausch der Entwickler mit unterschiedlichen Ausbildungen, z. B. zwischen Ingenieuren, Naturwissenschaftlern und auch Pharmakologen. Die hier dargelegte Vorgehensweise wurde von allen Befragten als realitätsnah, praktikabel und sehr systematisch angesehen. Bei Unternehmen, die über eine Vorgehensweise verfügen, ist nach Aussage der Unternehmen die grundsätzliche Ausrichtung vergleichbar. Eine Anpassung an firmenspezifische Erfordernisse ist in allen Unternehmen möglich, so dass die Flexibilität der Methodik ausreichend groß ist.

Die Methoden fanden durchweg Interesse. Insbesondere für fertige Konstruktionsregeln oder -kataloge, physikalische Effekte und Auswahlmatrizen wäre in

den Unternehmen großer Bedarf, da das Wissen oft auf verschiedene Mitarbeiter verteilt ist. Es stellte sich aber auch heraus, dass der Bedarf jeweils stark unternehmensabhängig ist und daher die Erstellung „allgemeingültiger“ Vorgehensweisen nicht möglich ist. Eine Hürde ist, dass Wissen in diesen Bereichen, viel mehr als in traditionellen Branchen wie dem Maschinenbau, oft firmeninterne Kernkompetenzen betrifft und deshalb keinesfalls herausgegeben wird.

Die Methode der Wirkstruktur fand großen Anklang, weil die Störgrößen und ihre Auswirkungen in allen Unternehmen als Problem gelten. Insbesondere die Entwickler, die diese Methode im Rahmen der Entwicklung des Luftmassensensors angewendet haben, bestätigen ihre positive Wirkung. Besonders hervorgehoben wurde die Eignung für die fachübergreifende Verständigung über Zusammenhänge zwischen den Komponenten. Negativ gesehen wurde hier allerdings der große Aufwand speziell für die Erstellung der Wirkstrukturmatrix, der sich aber bei komplexen Projekten auszahlt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Entwicklungsmethodik für die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik erarbeitet.

Die Mikrosystemtechnik unterscheidet sich aufgrund der Neuheit von Produkt- und Herstellungstechnologien zum Teil deutlich von traditionellen Domänen der Technik. Dies zeigt sich beispielsweise in einer sehr hohen Integration interdisziplinärer Bauelemente und einem starken wechselseitigen Einfluss zwischen Produkt- und Technologieentwicklung. Daher wurden zunächst die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik erläutert und gegenüber anderen Domänen abgegrenzt. Darauf aufbauend wurden Anforderungen an einen Entwicklungsprozess für die Mikrosystemtechnik gestellt. Die bestehenden Produktentwicklungsmethodiken im Maschinenbau, in der Softwaretechnik, Elektrotechnik und Mechatronik wurden auf eine mögliche Übertragbarkeit auf die Mikrosystemtechnik untersucht.

Aufbauend auf dem Prozessmodell der Mechatronik wurde eine Entwicklungsmethodik entwickelt und dargestellt, die auf die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik abgestimmt ist. Zentraler Bestandteil ist dabei das V-Modell, das gegenüber der Darstellung in der VDI-Richtlinie 2206 für die Mechatronik in mehrfacher Hinsicht verändert und erweitert wurde. So wurde die Integration der verschiedenen beteiligten Disziplinen deutlich hervorgehoben, ein durchgängiger Abgleich der Eigenschaften mit den Anforderungen ergänzt und die parallele Berücksichtigung der Technologie eingefügt. Da der Entwicklungsablauf von Mikrosystemen eine iterative Vorgehensweise erfordert, wird das V-Modell im Gesamtablauf mit zunehmender Produktreife mehrfach durchlaufen, bis das Produkt zur Serienreife entwickelt ist. Weiter wurde der Produktlebenslauf in den Entwicklungsablauf mit einbezogen. Ergänzt wurde das Modell um Sichten aus verschiedenen Bereichen des Unternehmens, um eine ganzheitliche Sichtweise auf die Produktentwicklung zu erzielen. Der Aufbau der Methodik erlaubt und erfordert eine Anpassung an unternehmens- oder produktpezifische Erfordernisse.

Das Vorgehensmodell wurde zur Unterstützung einer effektiven Produktentwicklung um methodische Hilfsmittel ergänzt. Diese Methoden unterstützen den Ablauf an kritischen Stellen, wie beispielsweise der Anforderungsermittlung, der Integration der interdisziplinären Bauelemente oder der Bauteilgestaltung. Methodik und Methoden wurden in mehreren Entwicklungsprojekten und anhand von Gesprächen mit Verantwortlichen in Hochschulinstituten und Unternehmen erfolgreich verifiziert.

Mit dieser Arbeit wird ein Forschungsfeld „Entwicklung in der Mikrosystemtechnik“ grundlegend eröffnet. Bild 8.1 zeigt einen Gesamtüberblick über mögliche Fragestellungen, die sich aus Sicht der vorliegenden Arbeit ergeben.

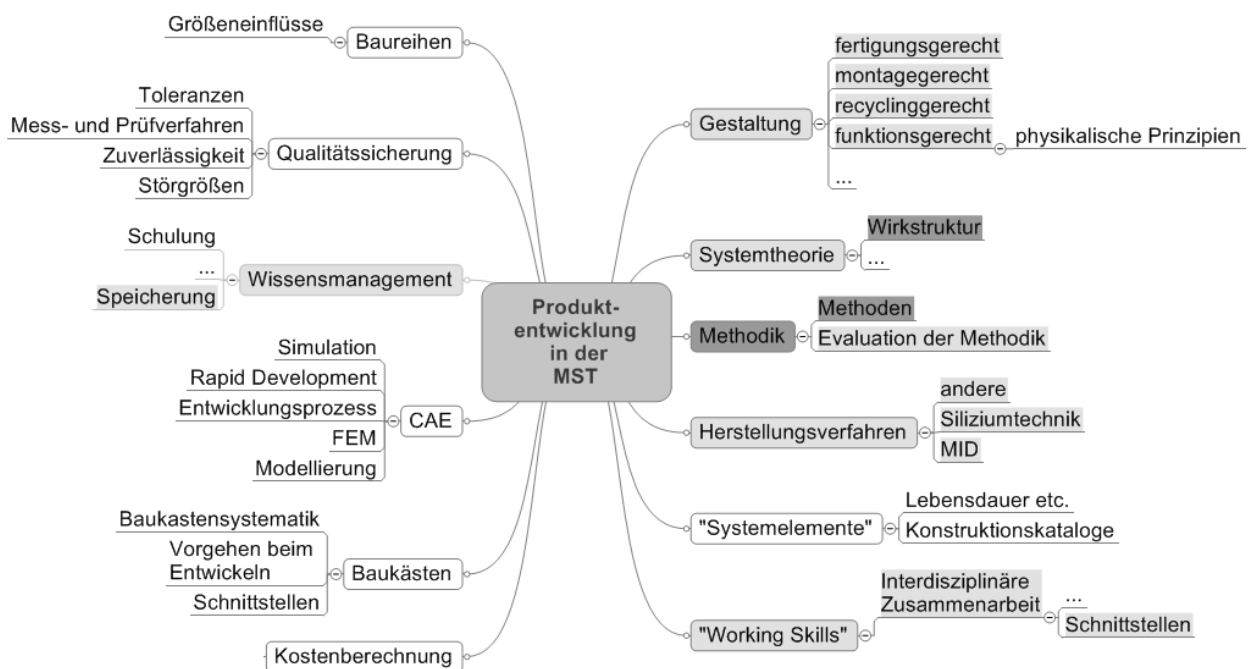


Bild 8.1: Gesamtübersicht Entwicklung in der Mikrosystemtechnik

Schwerpunkte dieser Arbeit sind eine Methodik und Methoden, besonders die Wirkstruktur zur Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit (dunkel hinterlegt). Eine Reihe von weiteren Fragestellungen wurden angesprochen, aber nicht erschöpfend bearbeitet (hell hinterlegt). Dazu zählt die Gestaltung anhand von Gestaltungsrichtlinien ebenso wie Besonderheiten der verschiedenen Herstellungsverfahren, in der Mikrosystemtechnik erforderliche „working skills“ oder das Wissensmanagement. Darüber hinaus gibt es weitere Themenbereiche, die als „weiße Flecken“ für die Betrachtung in künftigen Arbeiten verblei-

ben. Ein wichtiger Bereich ist hier die Verbesserung der Möglichkeiten des CAE ebenso wie die Beschäftigung mit Baureihen und Baukästen, die Qualitätssicherung und „Systemelemente“ analog zu den Maschinenelementen im Maschinenbau.

Damit bieten sich zahlreiche Ansatzpunkte, um künftig die rasante Entwicklung der Mikrosystemtechnik auch im Bereich der Entwicklung und Konstruktion zu unterstützen. Nur mit hervorragenden Ergebnissen in Forschung und Entwicklung und ihrer raschen Umsetzung in konkurrenzfähige Produkte wird auch in Zukunft ein erfolgreiches Bestehen im globalen Wettbewerb möglich sein.

Literatur

Zitierte Literatur:

- ALBERS02A Albers, A., Marz, J., Burkardt, N.: Entwicklungsmethodik bei Konzeption und Entwurf eines Mikro-PlanetengetriebeS. 47. internationales Wissenschaftliches Kolloquium TU Ilmenau, 2002
- ANTONSSON96 Antonsson, E. (ed.): Structured Design Methods for MEMS, Final report, Pasadena, 1996
- ARNOLD03 Arnold, M. et al.: Elektrostatisches Miniaturventil in Laser MID-Technik. Workshop „Innovative Anwendungen der MID-Technik“. Stuttgart, 08.10.2003
- AYAZI98 Ayazi, F., Najafi, K.: Design and Fabrication of a High-Performance Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope. In: Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Workshop. Heidelberg, 1998, S. 621–626
- BALZERT98 Balzert, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik. Berlin: Spektrum, 1998
- BEITZ97 Beitz, W., Grothe, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Auflage, Berlin: Springer, 1997
- BERGER05 Berger, J.: Microsystems in Germany – Modernizing Traditional German Industry. MST news, Teltow März 2005, S. 6-7
- BERGERS02 Bergers, D.: Baukasten unterstützt Entwicklung mikromechanischer Systeme. VDI-Z 144 (2002), Nr. 7/8
- BERLINNEWS99 BerliNews: Forschung plus Produktentwicklung. Pressemitteilung der Senatsverwaltung für Wissenschaft, Forschung und Kultur vom 30. September 1999. Berlin, 1999
- BIER05 Bier, F.: Microsystems in Biotechnology. MST news, Teltow, März 2005, S. 22
- BISCHOFF53 Bischoff, W., Hansen, F.: Rationelles Konstruieren. Konstruktionsbücher Bd. 5. Berlin: VEB Technik, 1953
- BISCHOFF91 Bischoff, W., Bock, A., Hansen, F.: Die Entstehung der Konstruktionstechnik. In: Wissenschaftliche Zeitschrift 37 (1991), Nr. 5, S. 17-20
- BOTTHOF02 Botthof, A., Pelke, J. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik, Zukunftsszenarien. Berlin: Springer, 2002
- BOVENSCHULTE05 Bovenschulte, M., Kergel, H.: Microsystems in Environmental Technology Applications, in: MST news, Teltow, März 2005, S. 18

- BROCKHAUS99 Brockhaus – Die Enzyklopädie: in 24 Bänden. 20. Aufl., Leipzig; Mannheim: Brockhaus 1999
- BÜRGEL96 Bürgel, H., Haller, C., Binder, M.: F&E-Management. München: Vahlen, 1996
- CHAPMAN01 Chapman, P.L., Krein, P.T.: Micromotor Technology: Electric Drive Designer's Perspective. 36th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Chicago, USA, October 2001, pp. 1978-1983
- CLAUSSEN98 Claussen, U., Rodenacker, W.: Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik: Grundlagen und Entwicklung moderner Methoden. Berlin: Springer, 1998.
- CUI03 Cui, Z. et al.: Microsystems Technology Standardisation Roadmap. Teddington, UK: National Physical Laboratory 2003
- DEGEN01 Degen, R.: Mikrogetriebe für hochgenaues Positionieren, wt-online 91 (2001), Nr. 12, Seite 758-760
- DENKENA05 Denkena, B. et al.: Mikrozerspanung für die Mikrosystemtechnik. In: Kolloquium Mikroproduktion – Fortschritte, Verfahren, Anwendungen. Aachen: RWTH Aachen, 2005
- DETTTER99 Detter, H.: Mikrosystemtechnik – Forschung, Entwicklung und Ausbildung in Österreich. e&i 116 (1999), Heft 9, Seite 522-527
- DIN EN 60300-3-1 DIN EN 60300-3-1: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-1: Anwendungsleitfaden - Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- DIN EN ISO 9004 DIN EN ISO 9004: Qualitätsmanagementsysteme - Leitfaden zur Leistungsverbesserung. Berlin: Beuth, 2000
- DIN32563 DIN 32563: Klassifizierungssystem für Mikrobau-elemente. Berlin: Beuth, 2002
- DIN40150 DIN 40150: Begriffe zur Ordnung von Funktions- und Baueinheiten. Berlin: Beuth, 1979
- DIXON66 Dixon, J.: Design Engineering: Inventiveness, Analysis and Decision Making. New York: McGraw-Hill, 1966
- DOBBERKAU02 Dobberkau, K.: Aufgabenorientierte Methoden-anpassung in der Produktentwicklung am Beispiel des Qualitätsmanagements. Diss. Universität Kaiserslautern 2002
- DÖTZEL94 Dötzel, W., Döhler, R., Mehner, J.: Analyse und Simulation für mechanische Mikrosysteme. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 87-100

- EHRENSPIEL03 Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser, 2003
- EHRENSPIEL05 Ehrlenspiel, K.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin: Springer, 2005
- EIERMANN94 Eiermann, M., Eder, A.: Unterstützung der Auswahl der AVT in den frühen Entwurfsphasen. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg.): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 11-24
- EIGLER94 Eigler, H.: Entwurf signalverarbeitender Mikrosysteme. Heidelberg: Hüthig, 1994
- ELOY05 Eloy, J. C., Mounier, E., Roussel, P.: Status of Inertial MEMS-based Sensors in the Automotive. In: Valldorf, J., Gessner, W. (Eds.): Advanced Microsystems for Automotive Applications 2005. Berlin: Springer, 2005, S. 43-48
- EVERSHEIM00 Eversheim, W.: Workflow-basierte Technologie- und Prozessplanung. IO-Management 70 (2000), Heft 5, S. 32-37
- FEDDER00 Fedder, G.: Top-down design of MEMS. Technical Proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. San Diego, USA, 2000, S. 7-10
- FESTO02 Festo (Hrsg.): Fabrik im Miniformat. In: Der Konstrukteur (2002), Seite 80 f.
- FISCHER00 Fischer, W.-J. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik. Würzburg: Vogel, 2000
- FRANKE95 Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID). München: Hanser, 1995
- FUJIMASA96 Fujimasa, I.: Micromachines. Oxford: Oxford University Press, 1996
- FVMID04 Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (Hrsg.): Technologie 3D-MID. München: Hanser, 2004
- GAUSEMEIER97 Gausemeier, J., Fink, A., Schlake, O.: Szenariotechnik. In: Westphalen, G. (Hrsg.): Technikfolgenabschätzung als politische Aufgabe. München: Oldenbourg, 1997
- GAUSEMEIER00 Gausemeier, J., Lückel, J.: Entwicklungsumgebungen Mechatronik – Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Heinz Nixdorf Institut, HNI-Schriftenreihe Band 80, Paderborn, 2000
- GAUSEMEIER02 Gausemeier, J.: Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung. 20th CAD-FEM Users' Meeting 2002 Friedrichshafen, 2002

- GERLACH97 Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. München: Hanser, 1997
- GILBERT95 Gilbert, J. R., "3D Coupled Electro-mechanics for MEMS: Applications of CoSolve-EM", Proceedings of MEMS 95 Amsterdam 1995, pp. 122-127
- GILLNER96 Gillner, A.: Präzisionsstrukturierung von Aluminium, Stahl und Hartmetallen mit Excimer- und Nd:YAG-Lasern – ein Verfahren zur Herstellung metallischer Mikrobauteile. In: Proceeding MICRO-Engineering 96 Stuttgart 1996
- GLASER94 Glaser, K., Rauch, H.: Ablaufstrategien und Rechnerunterstützung beim Mikrosystementwurf. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94]
- GRABOWSKI97 Grabowski, H., Geiger, K. (Hrsg.): Neue Wege zur Produktentwicklung. Stuttgart: Raabe, 1997
- GRETILLAT98 Grétilat, F., Grétilat, M.-A., de Rooij, N.F.: Improved Design of a silicon Micromachined Gyroscope with Piezoresistive Detection and Electromagnetic Excitation. Journal of Microelectromechanical Systems 8 (1999), Nr. 3, S. 243-249
- GUMM00 Gumm, H.-P., Sommer, M.: Einführung in die Informatik. München: Oldenbourg, 2000
- HANSEN56 Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Berlin: VEB Technik, 1956
- HARTMANN95 Hartmann, U.: MID – nur eine schöne Idee? F&M 103 (1995), Nr.11-12, S. 674-676
- HATAMURA99 Hatamura, Y.: The practice of machine design. Oxford: Clarendon Press, 1999
- HEIMER04 Heimer, T., Werner, M.: Die Zukunft der Mikrosystemtechnik. Weinheim: Wiley-VCH, 2004
- HEINSTEIN05 Heinstein, R.: Microsystems in Communication Technology. MST news, Teltow, März 2005, S. 16
- HEINZE05 Heinze, L.: Strengthening Research and Industry - MST Innovation Policy in Germany. MST news, Teltow, März 2005, S. 34-35
- HESSE92 Hesse, W., Merbeth, G., Frölich, R.: Software-Entwicklung –Vorgehensmodelle, Projektprüfung, Produktverwaltung. München: Oldenburg, 1992
- HEYN98 Heyn, M.: Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen. Diss. RWTH Aachen, 1998

- HILDEBRAND82 Hildebrand, S.: Fertigungsgerechtes Gestalten in der Fein-
gerätetechnik. Berlin: Verlag Technik, 1982
- HÖFFLER82 Höffler, H.: Konstruktionsregeln als methodische Hilfsmittel
für die Gestaltung. Diss. TU Braunschweig, 1982.
- HÖHNE02 Höhne, G.: 50 Jahre Konstruktionssystematik – ein Stück
Thüringer Technik- und Wirtschaftsgeschichte. Thüringer
Mitteilungen des VDI und VDE, September – Dezember
2002, VDI Thüringen, 2002
- IMM05A Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH: Mikrofunkenerosion.
Download: [http://www.imm-
mainz.de/v0/objekte/pdf/edm_a.pdf](http://www.imm-mainz.de/v0/objekte/pdf/edm_a.pdf), 23.05.2005, 10:14 Uhr
- IMM05B Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH: Laser in der Mikro-
technik. Download: [http://www.imm-mainz.de/v0/objekte/
pdf/lama_a.pdf](http://www.imm-mainz.de/v0/objekte/pdf/lama_a.pdf), 19.04.2005, 13:29 Uhr
- IMM05C Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH: Die LIGA-Technik.
Download: [http://www.imm-mainz.de/v0/objekte/pdf/
liga_a.pdf](http://www.imm-mainz.de/v0/objekte/pdf/liga_a.pdf), 19.04.2005, 13:29 Uhr
- IRION05 Irion, K.: Endoscopes – Potenzial for Microsystem Technol-
ogy. MST news, Teltow, März 2005, S. 26
- ISERMANN03 Isermann, R.: Mechatronic systems: fundamentals. London:
Springer, 2003
- JOHN96 John, W. et al.: 4. Workshop Methoden- und Werkzeugent-
wicklung für den Mikrosystementwurf im Rahmen des 4.
Statusseminars zum BMBF-Verbundprojekt METEOR,
Karlsruhe, 1996
- JOHNSON78 Johnson, R.: Mechanical Design Synthesis – Creative De-
sign and Organisation. Malabar, FL: Robert E. Krieger Pub-
lishing Co., 1978
- JOHNSTONE04 Johnstone, R., Parameswaran, M.: An Introduction to Sur-
face-Micromachining. Norwell, USA: Kluwer Academic Pub-
lishers, 2004
- JUNG89 Jung, A.: Funktionale Gestaltbildung. Berlin: Springer, 1989
- JUNG91 Jung, A.: Geometrie, Stoff und die elektrische Funktion, in:
Proceedings ICED 91, Zürich, 1991
- KALLENBACH94 Kallenbach, E., Albrecht, A., Birli, O.: Entwurfsprozess für
Mikroaktuatoren. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informa-
tionstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf
von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt
1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 71-86
- KALLMEYER98 Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller
Lösungen mechatronischer Systeme. Diss. Universität-
Gesamthochschule-Paderborn, 1998
- Kasper00 Kasper, M.: Mikrosystementwurf. Berlin: Springer, 2000

- KASPER94 Kasper, M., Reichl, H.: Strategien für die Systemintegration. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], 163-172
- KERGEL05 Kergel, H.: Microsystems Technology – Innovation Accelerator for Automation and Precision in the Machinery Industry. MST news Teltow, März 2005, S. 11-12
- KESSELRING42 Kesselring, F.: Die starke Konstruktion. VDI-Z Nr. 86; 1942, S. 321-330, 749-752
- KLAAßEN94 Klaaßen, B., Paap, K.: Anlagsimulation und Modellbildung auf unterschiedlichen Ebenen des Mikrosystementwurfs. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 (VDI94)
- KLAUBERT98 Klaubert, H.: Tiny Design: A Study of the Design of Microelectromechanical Systems. Diss. Camebridge University, 1998
- KÖCKERLING04 Köckerling, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Diss. Universität Paderborn, 2004
- KOHL94 Kohl, M., Menz, W.: Mikro-/Makrokopplungen. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 153-162
- KOLLER94A Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin: Springer, 1994
- KOLLER94B Koller, R., Kastrup, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin: Springer, 1994
- KRAUSE98 Krause, F.-L.: Produktentstehung. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Produktion und Management. Berlin: Springer, 1998
- KREUZBERGER05 Kreuzberger, S.: From the idea to the Successful Microsystem. MST news, Teltow, März 2005, S. 32-33
- KRIEBITZSCH02 Kriebitzsch, I.: 3-D-MID Technologie in der Automobilelektronik. Diss. Uni Erlangen-Nürnberg, 2002
- KRÜGER05 Krüger, S. et al.: Microsystems for Automotive Industry. MST news, Teltow, März 2005
- KÜCK05A Kück, H.: Mikrotechnik, Folien zur Vorlesung. Universität Stuttgart, 2005

- KÜCK05B Kück, H.: Miniaturtechnik, Folien zur Vorlesung. Universität Stuttgart, 2005
- KUIJK05 van Kuijk, J., Schropfer, G., daSilva, M.: Design Automation for MEMS/MST. Conference Design, Automation, and Test in Europe. München, 2005
- LANG98 Lang, M.: Entwurfsmethoden und Rapid Prototyping integrierter Mikrosysteme. Aachen: Shaker, 1998
- LAUFENBERG95 Laufenberg, L.: Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Diss. RWTH Aachen, 1995
- LEE98 Lee, N.: Blow Moulding Design Guide. München: Hanser Gardner, 1998
- LEßMÖLLMANN92 Leßmöllmann, C.: Fertigungsgerechte Gestaltung von Mikrostrukturen für die LIGA-Technik. Diss. Universität Karlsruhe, 1992
- LEYER63 Leyer, A.: Maschinenkonstruktionslehre. Basel: Birkhäuser, 1963
- LINDEMANN03 Lindemann U.: Fremddisziplinär bestimmte mechatronische Entwicklungsprojekte. ZWF 3 (2003), Seite 102-107
- LINDEMANN04 Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin: Springer, 2004
- LOPEZ05 López Garibay, J., Binz, H.: Design Catalogues as Knowledge Management and Educational Tools in Microsystem Engineering Design. Proc. ICED 05 Melbourne, 2005, S. 582 – 583 (full paper in pdf)
- LUEDECKE03 Luedecke, A.: Simulationsgestützte Verfahren für den Top-Down-Entwurf heterogener Systeme. Diss. Universität Duisburg-Essen, 2003
- MAGEE02 Magee, C.L., de Weck, O.L.: Complex system classification. Fourteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE). Toulouse, F, 2004.
- MAREK03 Marek, J. et al.: Sensors for Automotive applications. Weinheim: Wiley, 2003
- MAREK06 Marek, J.: MST: Schlüssel für zuverlässige und kosteneffiziente automotiv Sensoren. Vortrag: Elektrotechnisches Kolloquium der Universität Stuttgart, 24.01.2006
- MARTIN89 Martin, A.: Die empirische Forschung in der Betriebswirtschaftslehre. Poeschel Verlag, Stuttgart, 1989
- MATTHIESEN02 Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhalt von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Diss. TH Karlsruhe, 2002

- MEHNER00 Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik, Dresden: Dresdner Universitätsverlag & Universitätsbuchhandlung, 2000
- MENZ01 Menz, W., Mohr, J., Paul, O.: Microsystem Technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2001
- MENZ05 Menz, W., Mohr, J., Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. Weinheim: Wiley-VCH, 2005
- MESCHEDER00 Mescheder, U.: Mikrosystemtechnik : Konzepte und Anwendungen. Stuttgart: Teubner, 2000
- MILLER60 Miller, G. A., Galanter, E., Pribram, K.: Plans and the Structure of Behaviour. New York: Holt, 1960.
- MSTONLINE05A http://www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/def_mst.html, Stand: 02.01.2005, 11 Uhr
- MSTONLINE05B <http://www.mstonline.de/mst/mikrosystemtechnik/glossar/default.html#A1> Stand: 30.05.2005, 11 Uhr
- MÜLLER90 Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Berlin: Springer, 1990
- MÜLLER-GLASER94 Müller-Glaser, K., Rauch, H.: Ablaufstrategien und Rechnerunterstützung beim Mikrosystementwurf. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 25-34
- MÜLLER-GLASER96 Müller-Glaser, K.: Anforderungen der Mikrosystementwicklung. 4. Workshop im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes Meteor. Karlsruhe: VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, 1996
- Münch99 Münch, J.: Adaptation of process models in the context of engineer-style software quality assurance. In: Proceedings of the 6th Workshop der Fachgruppe 5.1.1 (GI): Vorgehensmodelle, Prozessverbesserung und Qualitätsmanagement Kaiserslautern, Germany, 1999
- NESTLE05 Nestle, V.: Microsystems Technology in the Field of Pneumatic Industrial Automation Technology. MST news, Teltow, März 2005, S. 12-13
- NEUHAUSEN01 Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Diss. RWTH Aachen, 2001
- NEUL02 Neul, R.: Modeling and Simulation for MEMS Design: Industrial Requirements. In: Technical Proceedings of 2002 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM '02). San Juan, Puerto Rico, April 22-25 2002, S. 6-9

- NEUL98 Neul, R. et al.: A Modeling Approach to Include Mechanical Microsystem Components into the System Simulation. Proc. of the Conference on Design, Automation and Test in Europe Paris, France, 1998
- NEWELL66 Newell, W.: Novel circuit aspects of the resonant gate transistor. Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. 1966 IEEE International, Volume IX, Feb 1966 S. 62 – 63
- NEXUS02 Nexus (Hrsg.): Market analysis for Microsystems II (2000-2005). Grenoble: The NEXUS Association, 2003
- NEXUS03 Nexus (Hrsg.): The NEXUS product-technology roadmap for Microsystems. Grenoble: The NEXUS Association, 2003
- O'CONNOR90 O'Connor, P.: Zuverlässigkeitstechnik. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- PAGEL01 Pagel, L.: Mikrosysteme - Physikalische Effekte bei der Verkleinerung technischer Systeme. Wilburgstetten: Schlembach, 2001
- PAHL03 Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grothe, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Berlin: Springer, 2003
- PETERSEN82 Petersen, K.E.: Silicon as a mechanical material. Proceedings of the IEEE, Vol. 70 (1982), Nr. 5
- PICHLER96 Pichler, F.: Von der Mikroelektronik zur Mikromechatronik. Elektrotechnik und Informationstechnik 113 (1996), Nr. 7/8, Seite 547-552
- PÖHLAU98 Pöhlau, F.: Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Diss. Universität Erlang/Nürnberg, 1998
- RAFFÉE79 Raffée, Hans: Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften. München: Vahlen, 1979
- REICHL02 Reichl, H.: Das Leben im Jahr 2020. In: Botthof, A., Pelke, J. (Hrsg.): Mikrosystemtechnik, Zukunftsszenarien. Berlin: Springer, 2002, S. 5-35
- REICHL04 Reichl, H.: Skript zur Vorlesung "Entwurf und Simulation von Mikrosystemen I". TU Berlin, 2004
- REICHL94 Reichl, H.: Einführung in das Verbundprojekt. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994
- RODENACKER76 Rodenacker, W.: Methodisches Konstruieren. Berlin: Springer, 1976
- ROOZENBURG95 Roozenburg, N.F.M., Eckels, J.: Product Design: Fundamentals and methods. Chichester: Wiley, 1995

- ROSS77A Ross, D. T., Schomann, K. E. Jr.: Structured Analysis for Requirements Definition. In: IEEE Transactions on Software Engineering. Bd. SE-3, 1977, Nr. 1
- ROSS77B Ross, D. T.: Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. In: IEEE Transactions on Software Engineering. Bd. SE-3, 1977, Nr. 1
- ROTH71 Roth, K., Franke H.J., Simonek, R.: Algorithmisches Auswahlverfahren zur Konstruktion mit Katalogen. Feinwerktechnik 75 (1971), Nr. 8, S. 337-345
- ROTH91 Roth, K.: Physikalische Zusammenhänge bei der Veränderung der Größe eines technischen Objektes. In: Proceedings ICED 91, Zürich, 1991
- ROTH94A Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 1994
- ROTH94B Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Konstruktionskataloge. Berlin: Springer, 1994
- SALOMON00 Salomon, P.: Rechnergestützter Entwurf von Microsystemen. Maschinenmarkt 18, 2000, Seite 46-48
- SALOMON05 Salomon, P.: MST – Industry Structure in Germany. MST news, Teltow März 2005, S. 41-42
- SCHACHLER95 Schachler, M., Lahrmann, A., Reichel, H.: Interdisciplinary aspects of microsystem design. In: Adey, R. et al.: Simulation and Design of microsystems and microstructures. Southampton: Computational mechanics publications, 1995
- SCHLÖTELBURG05 Schlötelburg, C.: Microsystems for Biotech Benefit from Excellent Technologies "Made in Germany". MST news, Teltow, März 2005, S. 23-24
- SCHNAKENBERG94 Schnakenberg, U., Riehtmüller, W.: Entwurfstechnik für monolithisch integrierte Mikrosysteme. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 111-120
- SCHNEIDER86 Schneider, J.: Konstruktionskataloge in der Antriebstechnik. Darmstadt: Hoppenstedt, 1986
- SCHNEIDER01 Schneider, M.: Methodeneinsatz in der Produktentwicklungspraxis. Diss. TU Darmstadt, 2001
- SCHORCHT95 Schorcht, H.-J., Wauro, F.: Mikrosystemtechnik – Neue Aspekte für die Konstruktionsforschung. In: Proceedings ICED 95, Prag, 1995

- SCHRAGE94 Schrage, J., John, W.: Berücksichtigung der EMV beim Entwurf von Mikrosystemen. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 57-66
- SCHWARZ96 Schwarz, P. et. al.: Methoden und Werkzeuge zur Simulation von Mikrosystemen. 4. Workshop „Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf“, Karlsruhe, 18./19. Nov.1996, S. 119-129
- SCHWARZ99 Schwarz, O., Ebeling, F., Furth, B.: Kunststoffverarbeitung. 8. Auflage. Würzburg: Vogel, 1999
- SMITH97 Smith, M.: Application-Specific Integrated Circuits. Berkeley: Addison Wesley, 1997
- SMM03 o. V.: Mikro- und Nanowelten in der Schweiz, SMM 31-32/2003, S. 35-40,
- SOLZBACHER05 Solzbacher, F., Krüger, S.: The International Market for Automotive Microsystems, Regional Characteristics and Challenges. In: Valldorf, J., Gessner, W. (Eds.): Advanced Microsystems for Automotive Applications 2005. Berlin: Springer, 2005, S. 23-42
- SPATH01 Spath, D., Dill, C., Scharer, M.: Mit dem Methodenbaukasten Produkte treffsicher und schnell entwickeln. In: Spath, D. et al.: Vom Markt zum Produkt. Stuttgart: LOG_X, 2001
- SPECHT96 Specht, G., Beckmann, C.: F&E-Management. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996
- STANIEROWSKI02 Stanierowski, M.: Prozessmodelle für die Entwicklung objektorientierter Anwendungssysteme. Vortrag, Berlin: FHTW, 2002
- STORK03 Stork, W.: Skript zur Vorlesung Mikrosystemtechnik I. Universität Karlsruhe, 2003
- STRESE05 Strese, H.: Smart Home. MST news, Teltow, März 2005, S. 17
- TEMPELHOF79 Tempelhof, K.-H., Lichtenberg, H., Rugenstein, J.: Fertigungsgerechtes Gestalten von Maschinenbauteilen. 2. Auflage. Berlin: VEB Technik, 1979
- TRÄNKLER94 Tränkler, H.: Entwurfsablauf. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994, S. 5-10
- TRÄNKLER98 Tränkler, H-R., Obermeier, E. (Hrsg.): Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft. Berlin: Springer, 1998

- TUFTE62 Tufte, O. N., Chapman, P.W., Long, D.: Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms. *Journal of Applied Physics* 33 (1962) 11, S. 3322
- UHLMANN01 Uhlmann, E., Piltz, S., Doll, U.: Funkenerosion in der Mikro-technik, *wt-online* 91 (2001), Heft 12, Seite 733-737
- ULRICH01 Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. In: Stiftung zur Förderung der Systemorientierten Managementlehre St. Gallen, Schweiz (Hrsg.): *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*. Studienausgabe. Bern: Haupt, 2001
- ULRICH76 Ulrich, P., Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Wissenschaftliches Studium* 5 (1976), Nr. 7, Seite 304-309,
- ULRICH81 Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Geist, M., Köhler, R. (Hrsg.): *Die Führung des Betriebes*. Stuttgart: Poeschel, 1981, S. 1-26
- UVM05 Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.): *Zukunftspotenziale der Mikro- und Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie für die Umwelttechnik in Baden-Württemberg*. Stuttgart, 2005
- VDEVDI98 VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik: *Mikrosystemtechnik 2000*. VDI Bericht 953. Düsseldorf: VDI, 1998
- VDI2206 VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2004
- VDI2221 VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI, 1993
- VDI2222 VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1: *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf: VDI, 1997
- VDI2223 VDI-Richtlinie 2221: *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Düsseldorf: VDI, 2004
- VDI2225 VDI-Richtlinie 2225: *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Blatt 3: Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Düsseldorf: VDI, 1990
- VDI2422 VDI-Richtlinie 2422: *Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik*. Düsseldorf: VDI, 1994
- VDI94 VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): *Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994*. Teltow, 1994
- VIERTELBOECK00 Viertelböck, M.: *Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung*. Diss. Universität München, 2000

- V-MODELL05 V-Modell XT Dokumentation Version 1.01, URL: <http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-1.1/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-Komplett.pdf>, Stand: 07.12.2005
- VÖLKLEIN00 Völklein, F., Zetterer, T.: Einführung in die Mikrosystemtechnik. Braunschweig: Vieweg, 2000
- WARFIELD73 Warfield, J. N.: Binary Matrices in System Modeling. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3 (1973), S. 441-449
- WALTER04 Walter, S.: Entwicklung miniaturisierter elektrodynamischer Energiewandler mit Reluktanzläufer. Diss. TU Berlin, 2004
- WEISS05 Weiss, C.: Microsystems for Medical Technology. MST news, Teltow, März 2005, S. 24-25
- WELP04 Welp, E. G.: Methodenbasierte Entwicklung mechatronischer Komponenten. In: Pini, P., Germer, C. (Hrsg.): Konstruktionsmethodik in der Praxis – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen. Kolloquium anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. H.-J. Franke. Braunschweig, 2004, S. 88-103
- WESTKÄMPER96 Westkämper, E., Hoffmeister, H.-W., Gäbler, J.: Fertigungskonzepte zur Herstellung mikromechanischer metallischer Komponenten. Proceedings MICRO-Engineering 96, Stuttgart, 1996
- WÖGERBAUER43 Wögerbauer, H.: Die Technik des KonstruierenS. 2. Aufl. München: Oldenbourg, 1943
- ZAMAN99 Zaman, S.F. et al.: An Environment for Design and Modeling Of Electro-Mechanical Micro-Systems. Journal of Modeling and Simulation of Microsystems, Camebridge, 1999, S. 65-76
- ZAPPE05 Zappe, H.: Educating Microsystem Technologists: New Technologies, New Engineers, New Approaches. MST news, Teltow, März 2005, S. 37
- ZUMTOBEL05 Zumtobel Werkzeugbau: Datenblatt Mikrobearbeitung. Download: <http://www.zumtobelstaffwerkzeugbau.com/html/publish/deutsch/downloads/mikrobearbeitung.pdf>, 05.10.2005, 14:17 Uhr

Verwendete Literatur:

- AHRENS00 Ahrens, G.: Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen. Diss. TU Berlin, 2000
- ALBERS02B Albers, A., Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. In: Konstruktion 54 (2002), Nr. 7/8, Seite 55-60
- ANDREASEN85 Andreasen, M. M.: Methodology for layout design. In: Proceedings ICED 85 Hamburg 1985
- ANDREASEN91 Andreasen, M. M.: Design for production – overview of methodology. In: Proceedings ICED 91 Zürich 1991
- ARCHER85 Archer, B.: The implication for the study of design methods of recent developments in neighbouring Disciplines. In: Proceedings ICED 85 Hamburg 1985
- BANTIEN90 Bantien, F.: Mikromechanischer Neigungssensor. Patent DE 40 16471 A1, 1991
- BEITZ95 Beitz, W.: Methodisches Konstruieren mit Industrieprojekten – Vorgehen und Erfahrungen. In: Proceedings ICED 95 Prag 1995
- BERTSCHE04 Bertsche, B., Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Berlin: Springer, 2004
- BERTSCHE98 Bertsche, B.: Entwicklung zuverlässiger Produkte. In: Konstruktion 50 (1998), Nr. 4, Seite 41-44
- DAENZER02 Daenzer, W. F., Huber, F. (Hrsg.): Systems Engineering. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 2002
- DIN1324 DIN 1324, Teil 2: Elektromagnetisches Feld, Materialgrößen. Berlin: Beuth, 1988
- DIN32564-1 DIN 32564: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe der Mikrosystemtechnik. Berlin: Beuth, 2004
- DIN32564-2 DIN 32564: Fertigungsmittel für Mikrosysteme – Begriffe – Teil 2: Basistechnologien und Herstellung. Berlin: Beuth, 2004
- DIN5036 DIN 5036: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien, Teil 1 Begriffe, Kennzahlen. Berlin: Beuth, 1978
- DRÖSCHEL00 Dröschel, W., Wiemers, M. (Hrsg.): Das V-Modell 97. München: Oldenbourg, 2000
- EDER94 Eder, W. E.: Bekannte Methodiken in den USA und Kanada. Konstruktion 46 (1994), Nr. 5, Seite 190-194,
- EDER95 Eder, W. E.: An appropriate Structure for Design Science. In: Proceedings ICED 95 Prag 1995
- EHRFELD02 Ehrfeld, W.: Handbuch Mikrotechnik. München: Hanser, 2002

- FVMID98 Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (Hrsg.): Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte von MID. Erlangen: 1998
- GANZ05 Ganz, M.: Microsystem 50 – die innovative Lösung für Mikro-Präzisionsteile. Vortrag: Microsys 2005, Sinsheim.
- HESSELBACH01 Hesselbach, J., Kerle, H., Zhang, Y.: Entwicklung eines piezoelektrischen Dreh-Schub-Aktors für einen Mikromanipulator mit Parallelstruktur. VDI Berichte Nr. 1631, Seite 465-482, 2001
- HESSELBACH04 Hesselbach, J.: Mikrotechnik – Mikroproduktion. Akademie-Journal 1/2004. Mainz: Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, 2004
- HILLER04 Hiller, K.: Technologieentwicklung für kapazitive Sensoren mit bewegten Komponenten. Habilitationsschrift TU Chemnitz, 2004
- JANSON91 Janson, L. I., Lundborg, E. P.: Relations between manufacturing process and product structure. In: Proceedings ICED 91 Zürich, 1991
- KALLENBACH00 Kallenbach, E. et al.: Synthesefreundliche Modelle und Programme für den Entwurf von mechatronischen Antriebssystemen. VDI Berichte Nr. 1533, 2000, Seite 61-76
- KALLMEYER98 Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Diss. Universität-Gesamthochschule-Paderborn, 1998
- MICHAELI03 Michaeli, W., Dahlke, M.: Entwicklung von Gestaltungsregeln für spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID). Konstruktion 55 (2003), Nr. 4, S. 75-79
- OBERMEIER94 Obermeier, E., Lossy, R.: Materialcharakterisierung. In: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH (Hrsg): Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen. Abschlussbericht zum Verbundprojekt 1992-1994. Teltow, 1994 [VDI94], S. 121-130
- PAHLKE01 Pahlke, W.: Mikromodule: Kostenentlastung in der Sensorproduktion. wt-online 91 (2001), Nr. 12, Seite 761-764
- PETERS01 Peters, D.: Unterstützung des Entwurfsprozesses von Mikrosystemen mit direkten Optimierungsverfahren. Düsseldorf: VDI, 2001
- RAASCH92 Raasch, J.: Systementwicklung mit strukturierten Methoden. München: Hanser, 1993
- SCHNELLE89 Schnelle, E., Pfeuffer, R.: Vorteile und Grenzen der Konstruktionsmethodik bei der Entwicklung von Produkten der Medizintechnik. Konstruktion Nr. 41 (1989), Seite 395-402
- SCHÜLE01 Schüle, A., Bauer, G., Schäfer, W.: Modulare Mikrosysteme, wt-online 91(2001), Nr. 12, Seite 751-754







- TEWALD97 Tewald, A.: Mikrospritzgießen – eine Übersicht. In: Schin-
köthe, W.: Festschrift 30 Jahre IKFF. Stuttgart, 1997 URL:
[http://www.uni-stuttgart.de/ikff/institut/publikationen/fest30/
tewald.html](http://www.uni-stuttgart.de/ikff/institut/publikationen/fest30/tewald.html) (Stand 15.11.2005)
- TSCHULENA93 Tschulena,G.R.: Micromechanik - eine neue Technik kün-
digt sich an. F&M 101 (1993), Nr. 6, Seite 261-263,
- WESTKÄMPER01 Westkämper, E.: Miniaturisierung von Komponenten und
Bauelementen im Maschinenbau. wt 91 (2001), Nr. 1, S,
47-51
- WEULE01 Weule, H.: Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung.
wt 89 (1999), Nr. 11/12, S. 481-483

Verwendete Studien- und Diplomarbeiten unter Anleitung des Verfassers:

- LOPEZ04 Lopez, J.: Methodische Entwicklung eines miniaturisierten
Neigungssensors auf Basis der MID Technik nach VDI
2221. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Stuttgart,
2004
- LIU05 Liu, J.: Methodische Entwicklung eines miniaturisierten
Drrehwinkelsensors auf Basis der MID-Technik. Unveröf-
fentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2005
- RÜTH05 Rüth, B.: Methodischer Produktentwurf eines mechatroni-
schen Smart Sensors zur Luftmassenmessung in Verbren-
nungsmotoren. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität
Stuttgart, 2005
- WAGNER05 Wagner, M.: Ableitung von Konstruktionsregeln für die Ges-
taltung von MID-Bauteilen in der Mikrosystemtechnik. Un-
veröffentlichte Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2005

Anhang

A.1 Beispiel eines Entwicklungsprozesses

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
	Kontrolle	Watty, 25.02.05				
	Freigabe	Watty, 25.02.05				
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Dokument</div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Dokumente</div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Information & Wissen</div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Methode</div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Freigabe</div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 5px;"> Weitere Unterteilung</div> </div>						
Knoten:	Titel: Verwendete Symbole				Nummer:	0

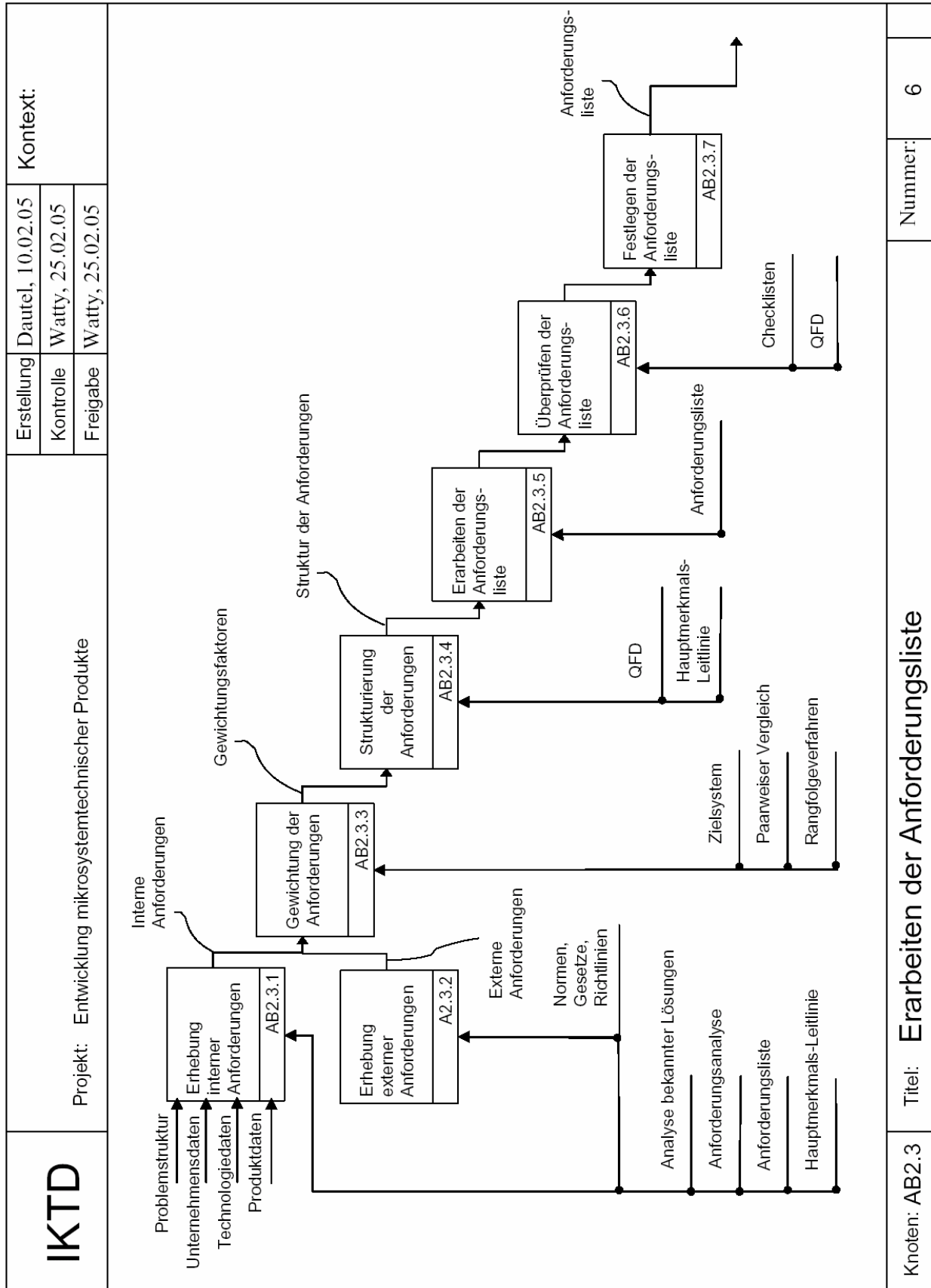
IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
				Kontrolle	Watty, 25.02.05	
				Freigabe	Watty, 25.02.05	
<pre> graph TD A1[A1: Aufgabenstellung] --> A2[A2: Planen und Klären der Aufgabenstellung] A2 --> A3[A3: Systemkonzept] A3 --> A4[A4: Integrierter Entwurf der Komponenten / Technologie] A4 --> A5[A5: Ausarbeitung des Systems] A5 --> WB[Weitere Bearbeitung] B1[B1: Aufgabenstellung und bestehendes Produkt] --> B2[B2: Planen und Klären der Aufgabenstellung] B2 --> B3[B3: Analyse des bestehenden Systemkonzepts] B3 --> A4 </pre>						
Knoten: A0	Titel: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte	Nummer: 1				

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Kontext:	
	Erstellung	Dautel, 10.02.05		Kontrolle	Watty, 25.02.05
	Freigabe	Watty, 25.02.05		Freigabe	Watty, 25.02.05
<pre> graph TD MA[Marktanalysen] --> EA1.1[Definition einer Innovationsaufgabe EA1.1] US[Unternehmensstrategie] --> EA1.1 EA1.1 --> A1.2[Erstellen eines Innovationsauftrags A1.2] A1.2 --> A1.3[Freigabe der Aufgabenstellung A1.3] EA1.1 --- Def[Definition] A1.2 --- IA[Innovationsauftrag] EA1.1 --- PMM[Produkt-Markt-Matrix] </pre>					
Knoten: A1	Titel: Aufgabenstellung			Nummer:	2

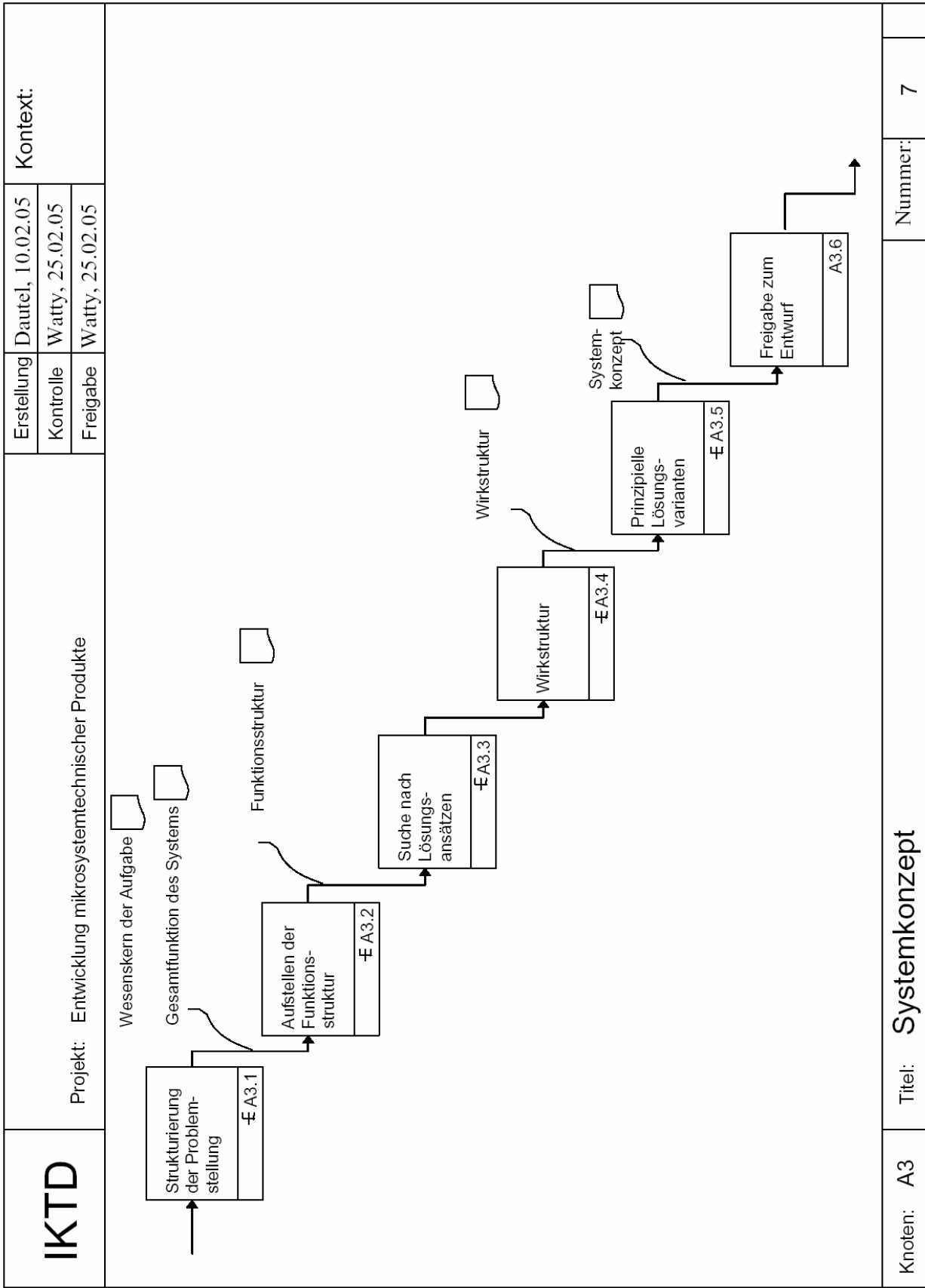
IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
	Kontrolle			Watty, 25.02.05		
	Freigabe			Watty, 25.02.05		
<p>The flowchart illustrates the process for defining an innovation task and creating an innovation request. It starts with 'Marktanalysen' and 'Unternehmensstrategie' leading to 'Definition einer Innovationsaufgabe' (B1.1). This step is linked to a 'Definition' document icon. From B1.1, an arrow points to 'Erstellen eines Innovationsauftrags' (B1.2), which is linked to an 'Innovationsauftrag' document icon. From B1.2, an arrow points to 'Freigabe der Aufgabenstellung' (B1.3). A 'Produkt-Markt-Matrix' is also shown as an input to the process.</p>						
Knoten: B1	Titel: Aufgabenstellung				Nummer:	3

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Kontext:	
	Erstellung	Dautel, 10.02.05			
	Kontrolle	Watty, 25.02.05			
	Freigabe	Watty, 25.02.05			
Knoten: A1.1	Titel: Definition einer Innovationsaufgabe			Nummer:	4

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Datum, 10.02.05	Kontext:
	Kontrolle	Watty, 25.02.05	Freigabe	Watty, 25.02.05		
Knoten: AB2	Titel: Planen und Klären der Aufgabenstellung	Nummer: 5				



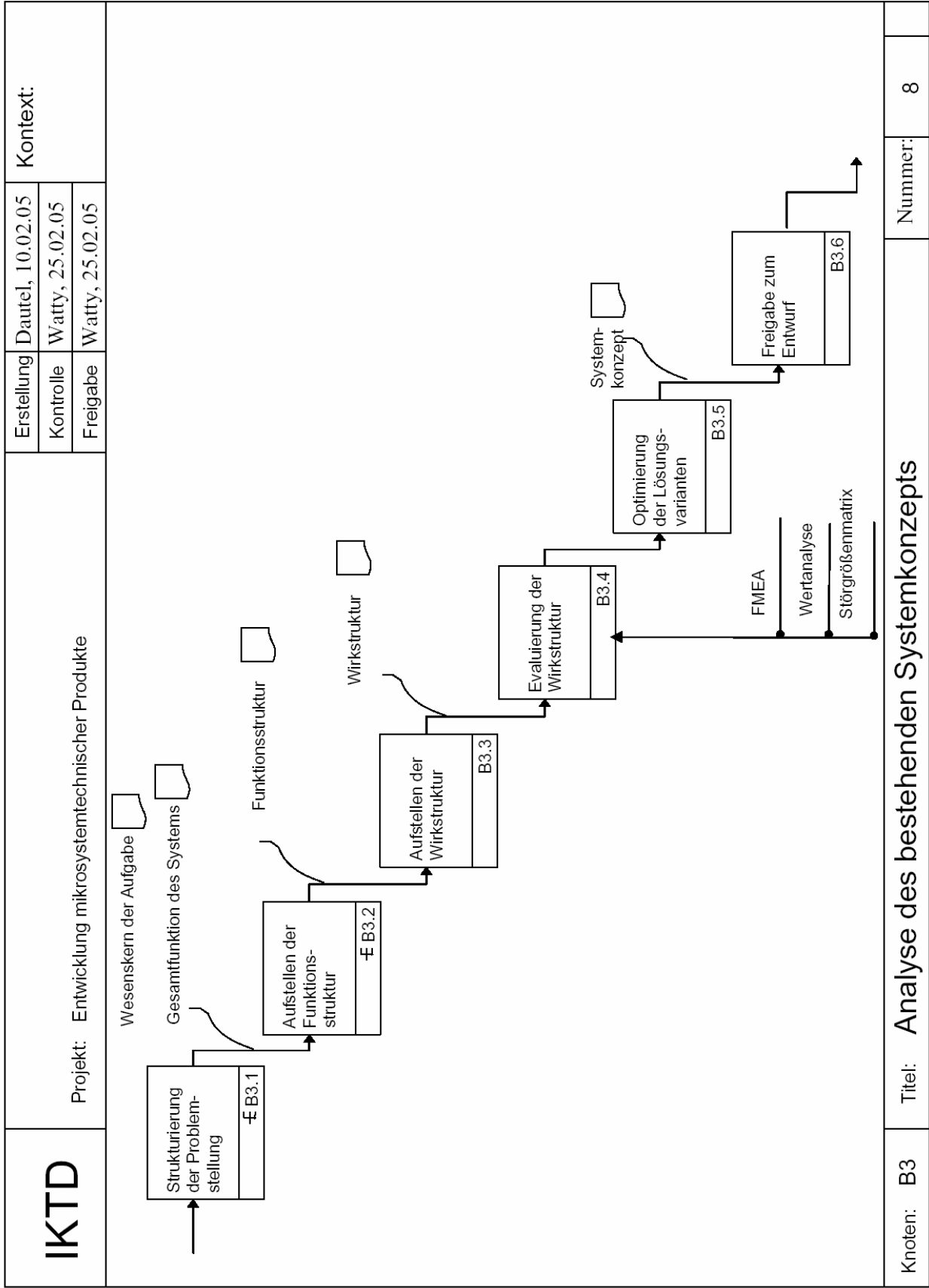
Knoten: AB2.3 Titel: Erarbeiten der Anforderungsliste



Knoten: A3

Titel: Systemkonzept

Nummer: 7



Knoten: B3

Titel: Analyse des bestehenden Systemkonzepts

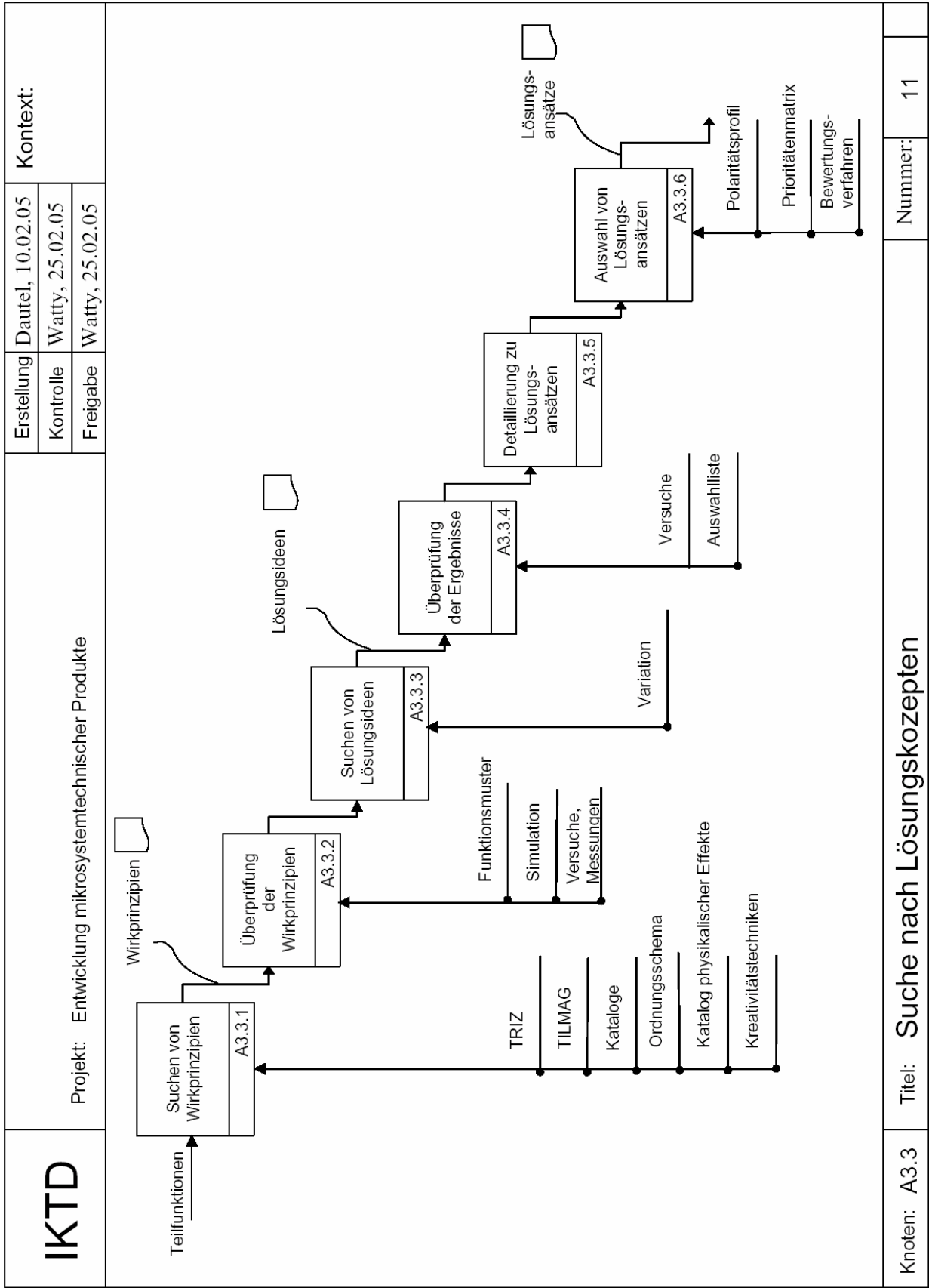
Nummer: 8

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
	Kontrolle	Watty, 25.02.05				
	Freigabe	Watty, 25.02.05				
<pre> graph TD A[Anforderungsliste] --> B[Erkennen der wesentlichen Probleme A3.1.1] B --> C[Analyse der Gesamtfunktion A3.1.2] C --> D[Gesamtfunktion des Systems] E[Wesenskern der Aufgabe] --- B E --- C F[Gedankliche Abstraktion] --> B G[Gesamtfunktion des Systems] --- D </pre>						
Knoten: AB3.1	Titel: Strukturierung der Problemstellung	Nummer: 9				

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
				Kontrolle	Watty, 25.02.05	
				Freigabe	Watty, 25.02.05	

```
graph TD; A[Funktionsstruktur] --> B[Aufteilen in Teilfunktionen  
A3.2.1]; B --> C[Strukturierung der Teilfunktionen  
A3.2.2]; C --> D[Funktionsstruktur];
```

Knoten: AB3.2	Titel: Aufstellen der Funktionsstruktur	Nummer: 10
---------------	---	------------

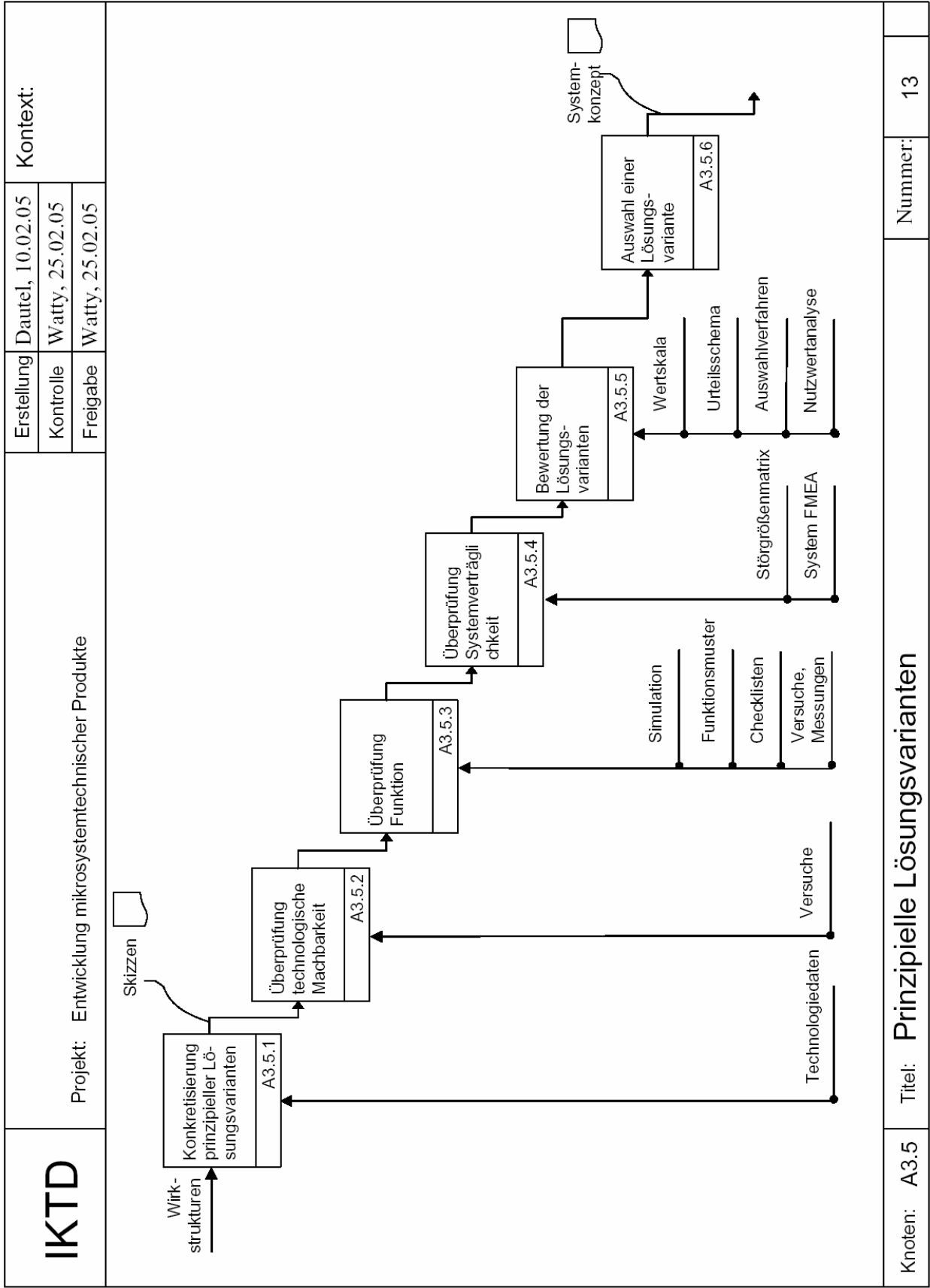


Knoten: A3.3

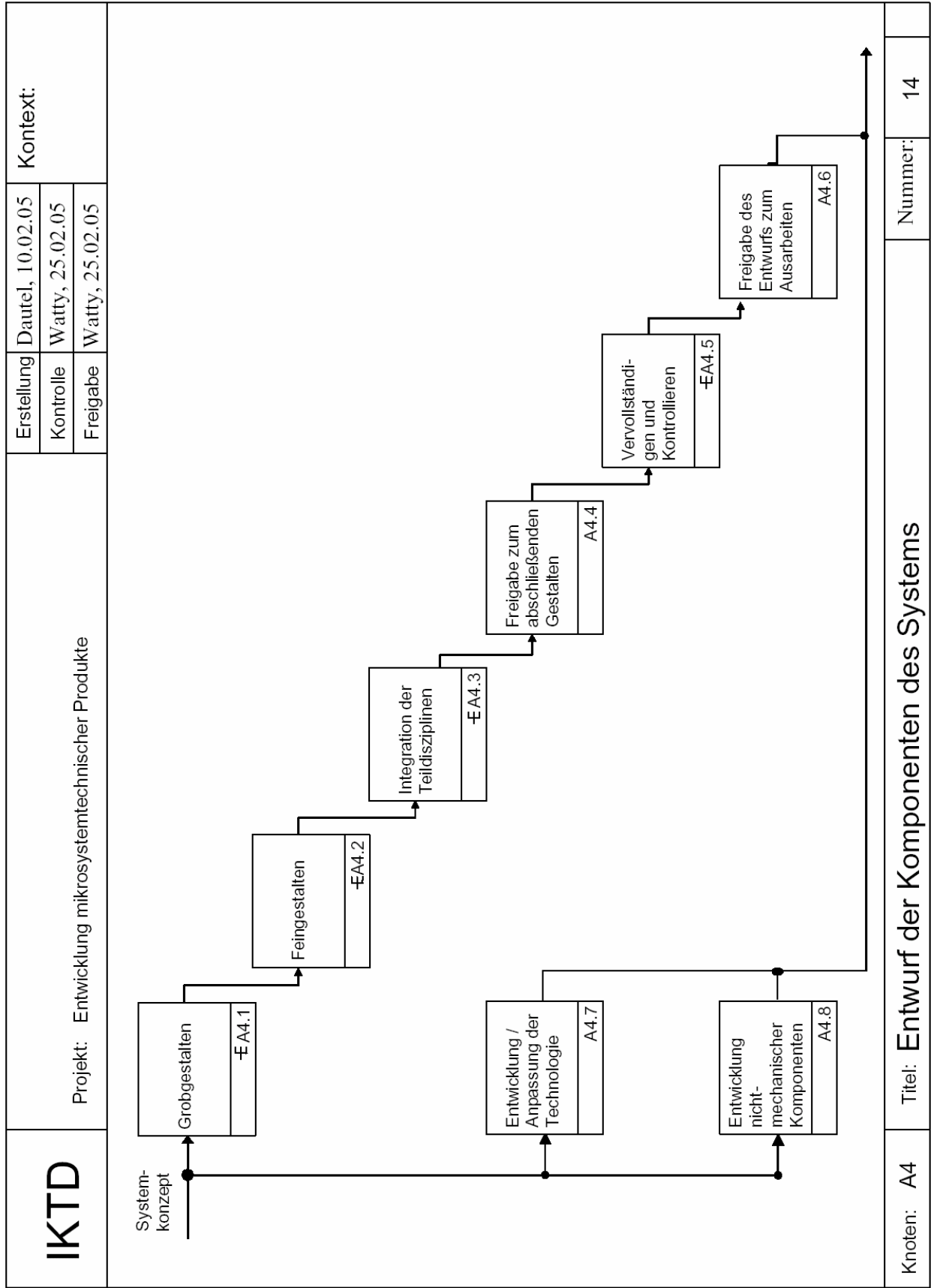
Titel: Suche nach Lösungskonzepten

Nummer: 11

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Kontext:	
	Erstellung	Dautel, 10.02.05			
	Kontrolle	Watty, 25.02.05			
	Freigabe	Watty, 25.02.05			
<pre> graph TD WP[Wirkprinzipien] --> A3.4.1[Kombinieren zu Wirkstrukturen A3.4.1] A3.4.1 --> AL[Anforderungsliste] AL --> A3.4.2[Bewertung der Wirkstrukturen A3.4.2] A3.4.2 --> A3.4.3[Auswahl geeigneter Wirkstrukturen A3.4.3] A3.4.3 --> WS[Wirkstrukturen] A3.4.3 --> AV[Auswahlverfahren] subgraph A3.4.1_Inputs [] direction TB K[Kataloge] W[Wirkstruktur] M[Morphologischer Kasten] A[Analyse bekannter Lösungen] end subgraph A3.4.2_Inputs [] direction TB GR[Gestaltungsrichtlinien] S[Simulation] VM[Versuche, Messungen] end </pre>					
Knoten: A3.4	Titel: Wirkstruktur			Nummer:	12



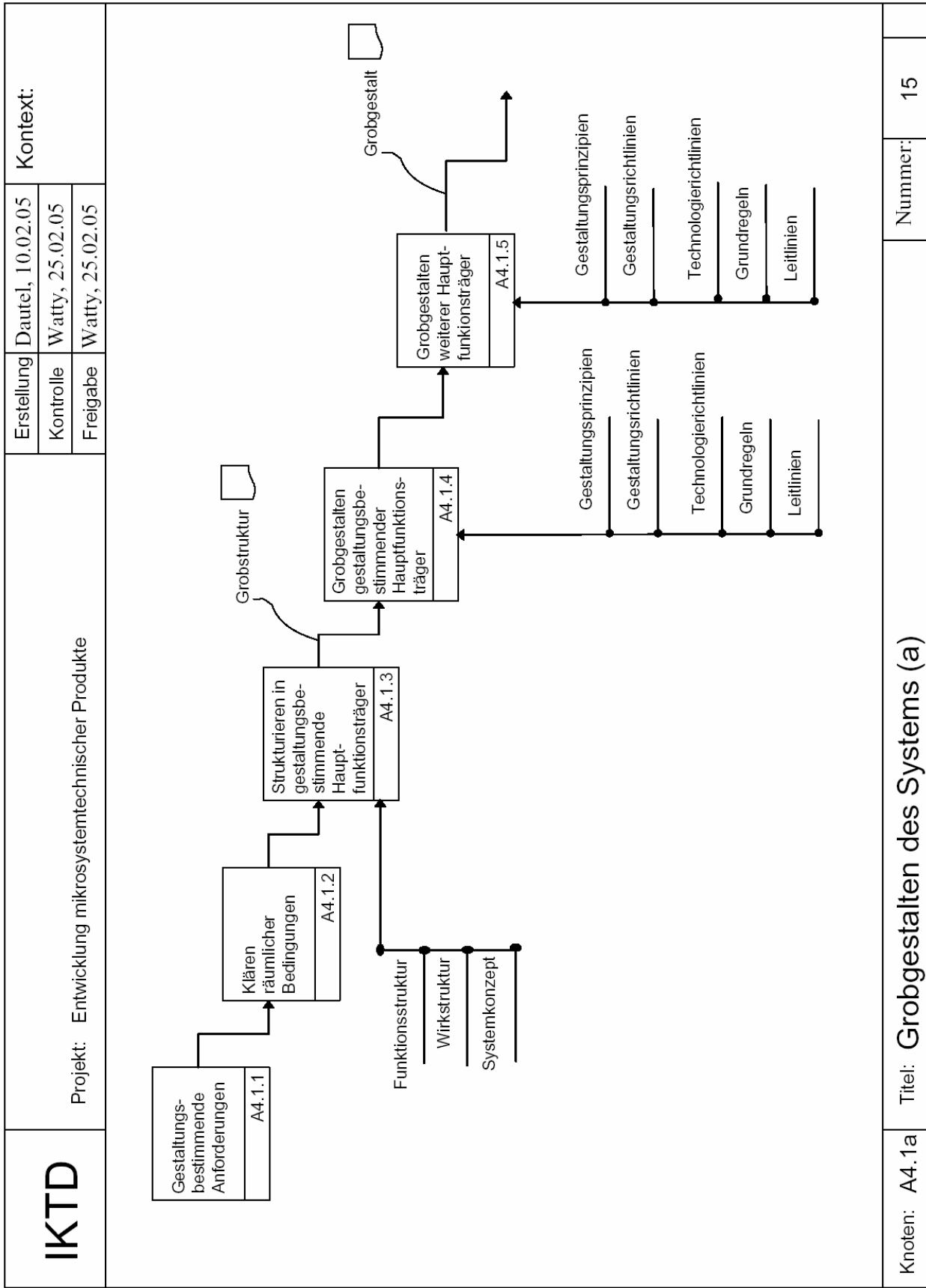
Knoten: A3.5 Titel: **Prinzipielle Lösungsvarianten** Nummer: 13



Titel: **Entwurf der Komponenten des Systems**

Knoten: A4

Nummer: 14

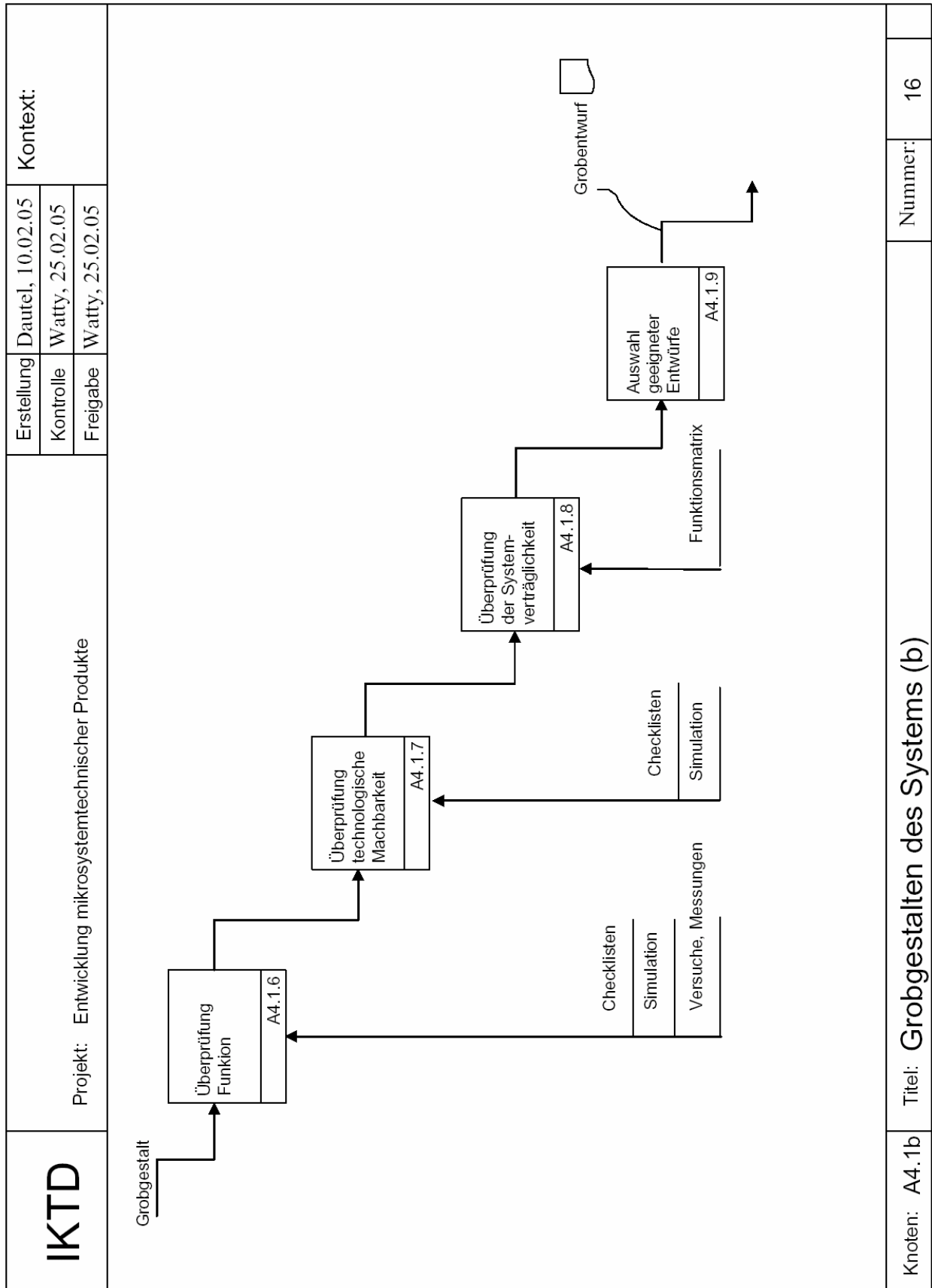


Knoten: A4.1a

Titel: **Grobgestalten des Systems (a)**

Nummer:

15

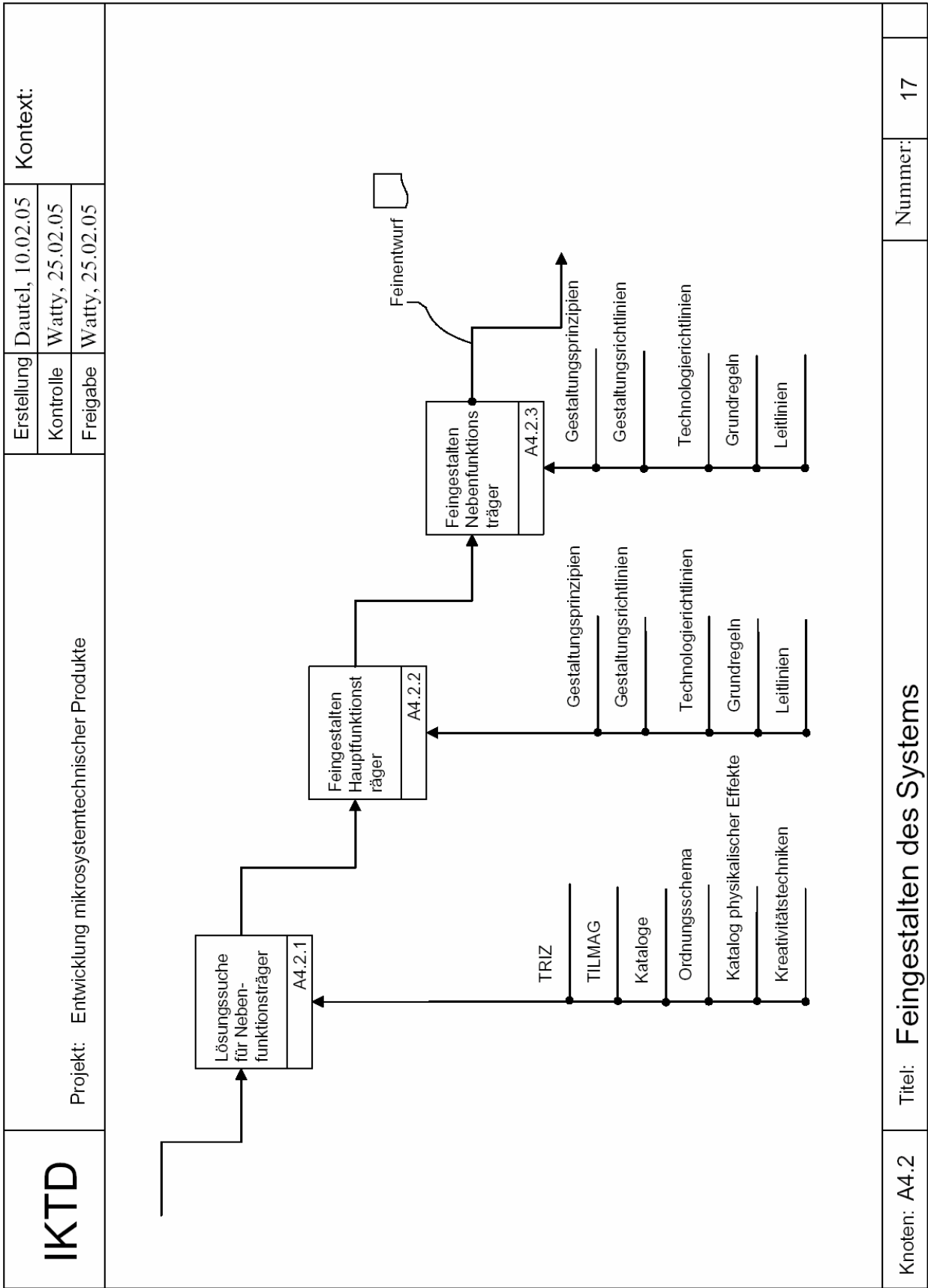


Knoten: A4.1b

Titel: **Grobgestalten des Systems (b)**

Nummer:

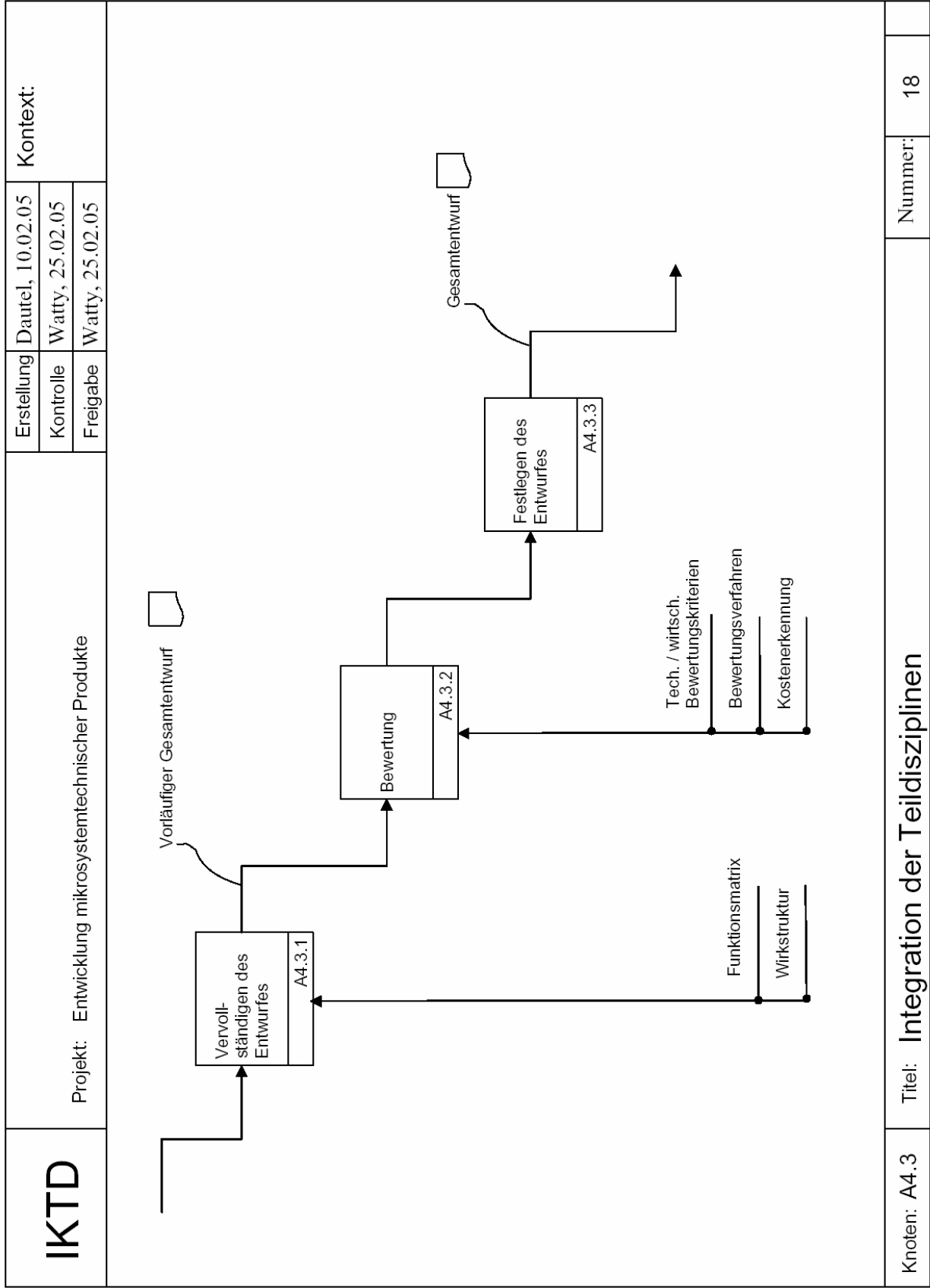
16



Knoten: A4.2

Titel: Feingestalten des Systems

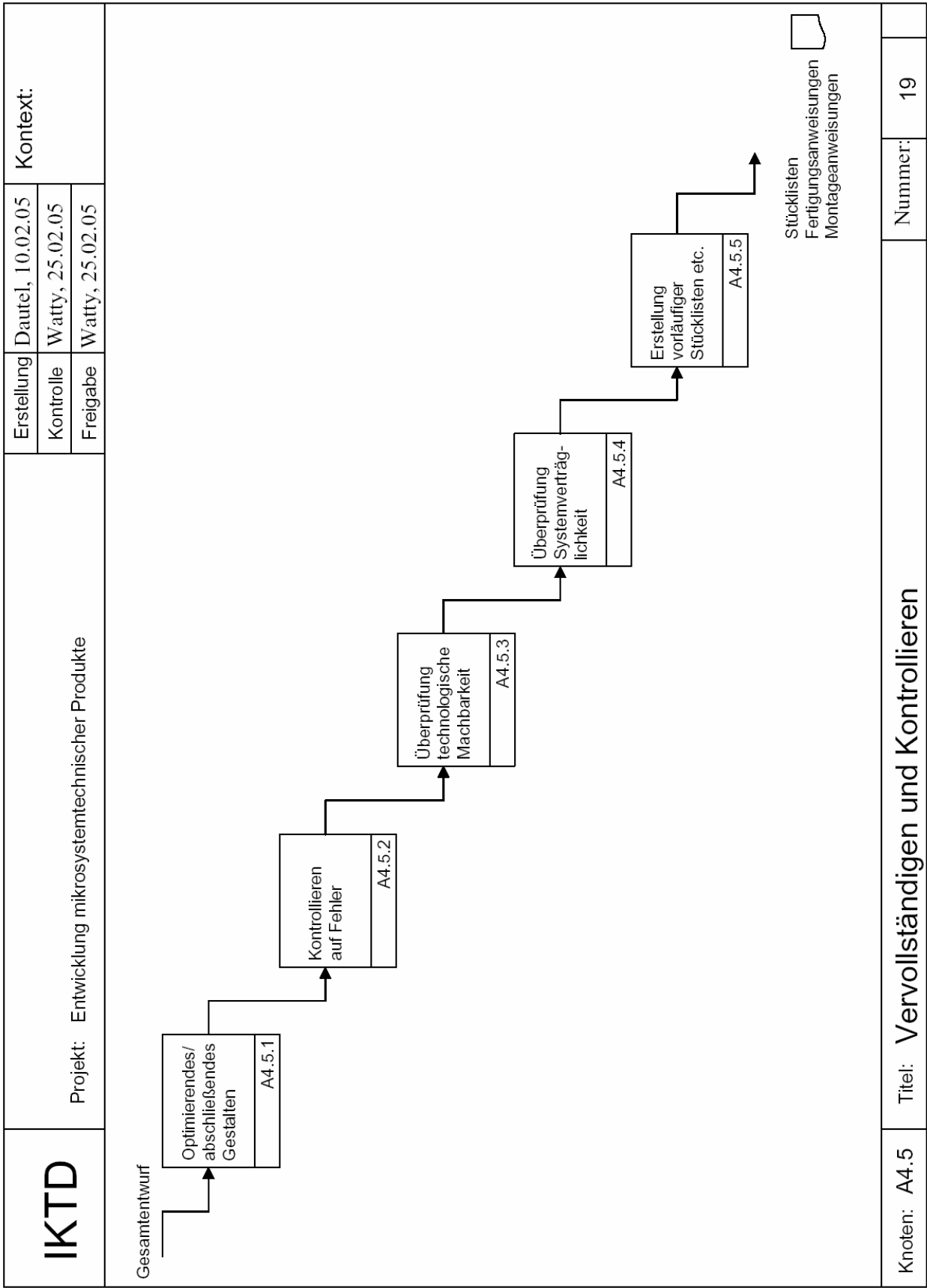
Nummer: 17



Titel: **Integration der Teildisziplinen**

Knoten: A4.3

Nummer: 18



Knoten: A4.5

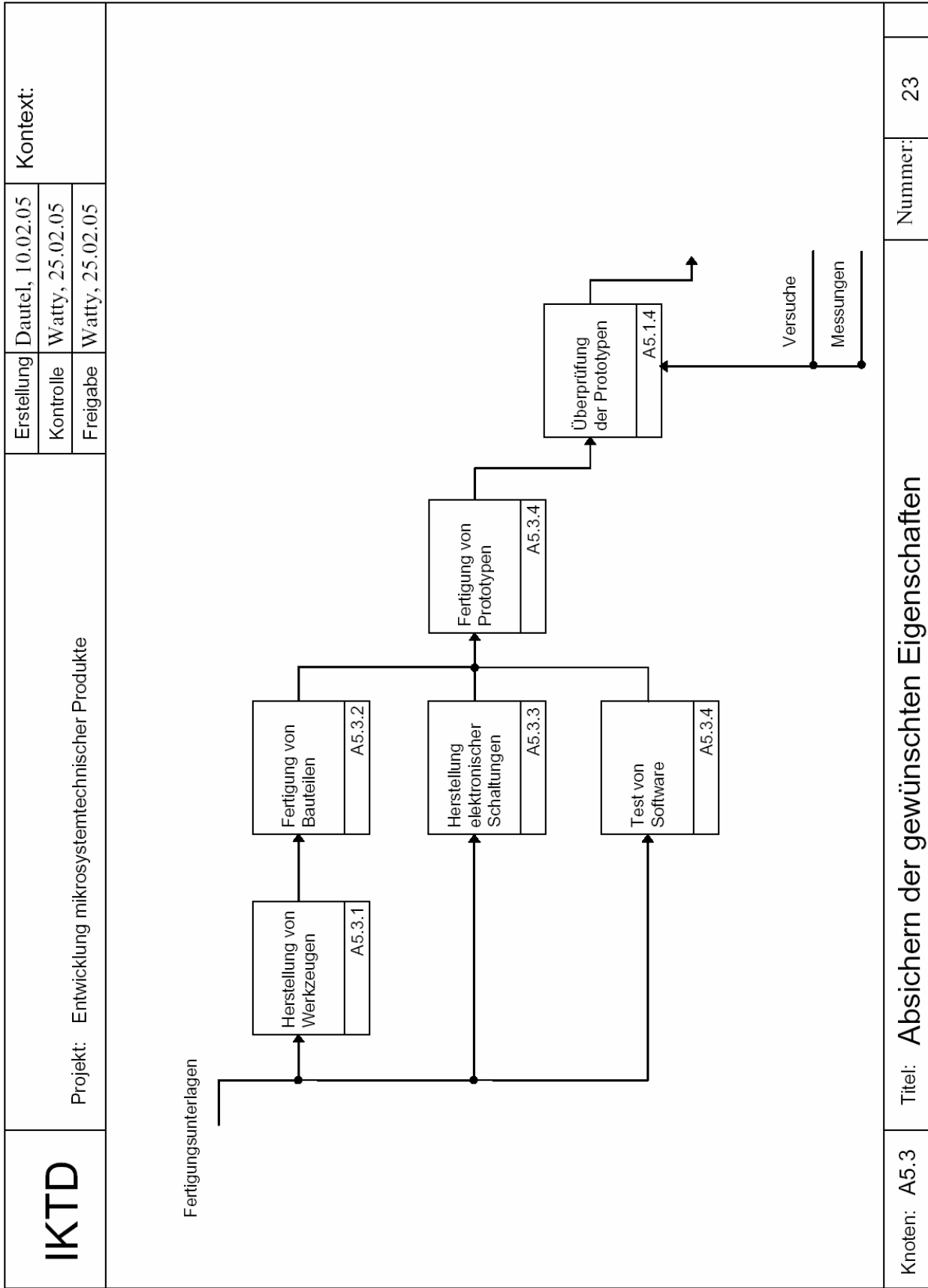
Titel: **Vervollständigen und Kontrollieren**

Nummer: 19

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Kontext:	
	Erstellung	Dautel, 10.02.05	Watty, 25.02.05	Kontrolle	Watty, 25.02.05
	Freigabe	Watty, 25.02.05			
<pre> graph LR A[Gesamtentwurf] --> B[Detailierung und Festlegung von Einzelteilen - EA5.1] B --> C[Erstellung von Fertigungsunterlagen - EA5.2] C --> D[Absichern der gewünschten Eigenschaften - EA5.3] D --> E[] </pre>					
Knoten: A5	Titel: Ausarbeitung des Systems			Nummer:	20

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
	Kontrolle	Watty, 25.02.05				
	Freigabe	Watty, 25.02.05				
<pre> graph TD GE[Gesamtentwurf] --> DE[Detailierung von Systemelementen A5.1.1] DE --> ETE[Einzelteilzeichnungen Software Schaltpläne] DE --> ZEE[Zusammenfassung der Einzelteile A5.1.2] ZEE --> GZ[Gruppenzeichnungen Gesamtzeichnung Stücklisten] </pre>						
Knoten: A5.1	Titel: Detailierung und Festlegung von Einzelteilen				Nummer:	21

IKTD	Projekt: Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte			Erstellung	Dautel, 10.02.05	Kontext:
				Kontrolle	Watty, 25.02.05	
				Freigabe	Watty, 25.02.05	
<p>The diagram illustrates the process of tool construction. A central box is labeled 'Konstruktion von Werkzeugen' with a sub-label 'A5.1'. Three arrows point towards this box: one from the left labeled 'Gesamtentwurf', one from the bottom labeled 'Technologie-daten', and one from the right labeled 'Werkzeugzeichnungen Stücklisten'. An arrow points from the top of the box to the right, labeled 'Werkzeugzeichnungen Stücklisten'. A small icon of a document is positioned above this arrow. The entire diagram is contained within a large rectangular frame.</p>						
Knoten: A5.2	Titel: Erstellung von Fertigungsunterlagen			Nummer:	22	



Knoten: A5.3

Titel: **Absichern der gewünschten Eigenschaften**

Nummer:

23

A.2 Qualitätssicht auf den Entwicklungsprozess

Bei Betrachtung des Entwicklungsprozesses unter Qualitätsaspekten ergeben sich die in Bild A.2.1 dargestellte Einflüsse.

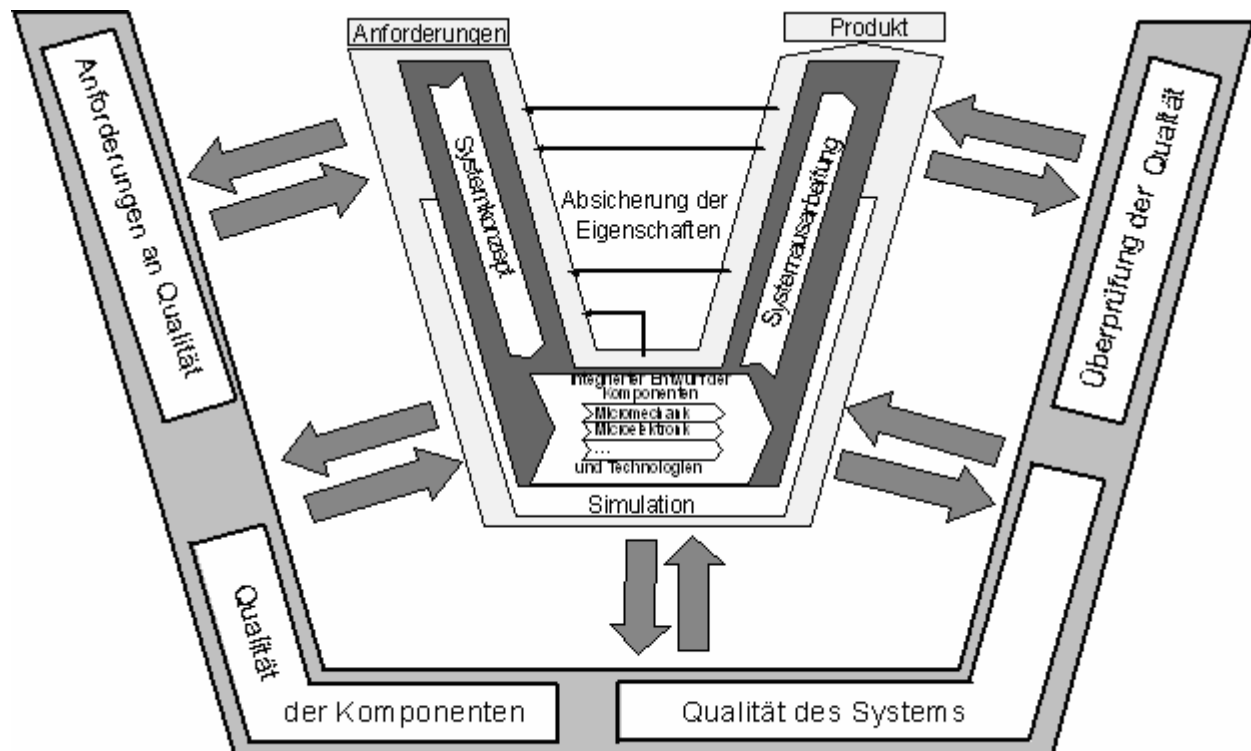


Bild A.2.1 Qualitätssicht

Zu Beginn der Entwicklung sind Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Systems, also seine Funktionserfüllung auf Dauer, zu stellen. Dazu sind zunächst Zuverlässigkeitsmerkmale z. B. aufgrund relevanter Normen festzulegen und dann die zugehörigen Zuverlässigkeitskenngrößen, z. B. Ausfallhäufigkeiten, mit Zuverlässigkeitsforderungen bezüglich der gewünschten Produkteigenschaften zu belegen. Grundlegend dafür sind Kriterien für den Ausfall, also die Beendigung der Funktionsfähigkeit der Einheit, festzulegen.

Parallel zum weiteren Entwicklungsablauf kann die jeweilige Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten betrachtet und durch geeignete Gestaltung möglichst günstig beeinflusst werden. Im Sinne einer integrierten Entwicklung müssen auch dabei auftretende Widersprüche im Systemzusammenhang betrachtet wer-

den, um letztendlich eine möglichst hohe Zuverlässigkeit für das Gesamtsystem zu erreichen. Dies lässt sich z. B. mit Checklisten zur Entwurfsüberprüfung oder Richtlinien für die Bauelementgestaltung erreichen.

Um zu überprüfen, ob die geforderte Zuverlässigkeit erreicht wurde, müssen mit dem System anschließend Tests durchgeführt werden [O'CONNOR90]. Dazu gehören Tests, bei denen Ausfälle unerwünscht sind, die also die Funktionserfüllung des Systems unter verschiedensten Umwelt- und Randbedingungen überprüfen. Für die Zuverlässigkeit entscheidender sind aber Tests, bei denen der Ausfall beabsichtigt ist und die Zeitdauer bis zum Ausfall gemessen und überprüft werden soll. Das Zuverlässigkeitsprogramm muss alle Faktoren umfassen, denen das Produkt in seiner späteren Verwendung ausgesetzt ist. Dazu gehören beispielsweise äußere Belastungen durch Temperatur, Vibrationen, Stoß, Feuchtigkeit, Schmutz oder den Menschen, aber auch innere Belastungen durch elektromagnetische Einflüsse, elektrostatische Kräfte oder Temperatur. Für Mikrosysteme haben innere Faktoren aufgrund der hohen Integration eine besondere Bedeutung.

Für diese Einflüsse muss jeweils ein Testprogramm mit den einwirkenden Größen, ihren Beträgen, Änderungen und Einwirkdauern festgelegt werden, aufgrund dessen dann die statistische Zuverlässigkeit des Mikrosystems ermittelt wird.

Unterstützt wird die Erreichung der geforderten Zuverlässigkeit durch geeignete Methoden, die zum Teil in Normen zum Zuverlässigkeitsmanagement zusammengestellt und beschrieben sind [DIN EN 60300-3-1].

A.3 Hauptmerkmalsleitlinie für Sensoren

Überschriften	Beispiele
Messgröße	Nennmessbereich, Richtung, Frequenz, Geschwindigkeit, Abtastrate, Messgenauigkeit, Wiederholgenauigkeit, Auflösung
Verbindung zum Messobjekt	Verbindung, Anordnung, Verformung, Steifigkeit, Entfernung, Reibung, Schnittstellen, Abnutzung, Beeinflussung der Messgröße
Geometrie / Zuverlässigkeit	Gewicht, Werkstoffe, Lebensdauer, Volumen, Höhe, Breite, Länge, Durchmesser, Anzahl, Form, Platzbedarf, Geräuschentwicklung, Hitzeentwicklung, Elektromagnetismus, beteiligte Disziplinen, Zuverlässigkeit
Betriebsbedingungen	Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Elektromagnetische Einflüsse, Licht, Schwingungen, Schutzklasse, vorgeschriebene Werkstoffe, Fehlfunktionen
Elektrische Daten	Spannungsversorgung, Verbindungsart, Leistung, Wirkungsgrad, Stromstärke, Linearität, Ausgangssignal, Signalbearbeitung, Signalspeicherung, Schnittstellen
Ergonomie	Bedienungsablauf, Erkennbarkeit des Layouts, Anzeigen, Ästhetik
Herstellung	Bevorzugte Herstellungsverfahren, Produktionsmittel, Erreichbare Qualität und Toleranzen, Kombination von Herstellungsverfahren
Qualitätskontrolle	Mess- und Testmöglichkeiten, Anwendung spezieller Normen und Regeln
Montage	Montageverfahren, Verbindungstechnologie, Funktionsintegration, Automatisierte Montage
Transport	Verpackungseinheit, Spezielle Vorschriften
Wartung	Wartungsintervalle, Inspektion, Selbsttest, Austausch und Reparatur, Reinigung
Recycling und Umweltverträglichkeit	Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Materialtrennung, Abfallentsorgung, Lagerung, non polluting
Kosten	Ferigungskosten, Montagekosten, Materialkosten, Maschinenkosten, Investition und Amortisation, Rücknahmekosten, Mengen
Termine	Abschluss der Entwicklung, Projektplanung und -kontrolle, Ressourcen, Auslieferungsdatum

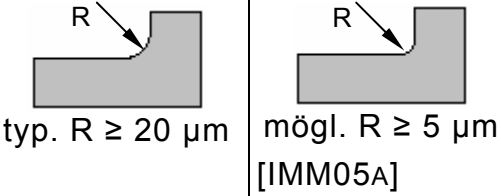
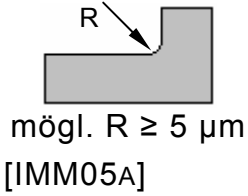

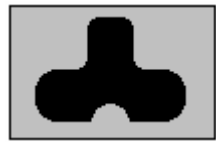
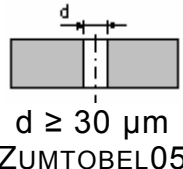
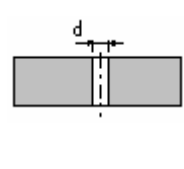
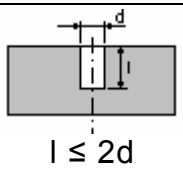
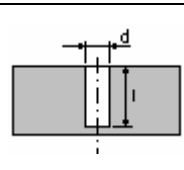
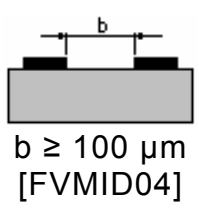
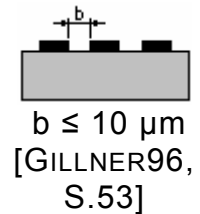
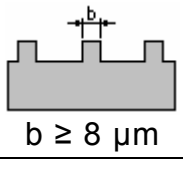
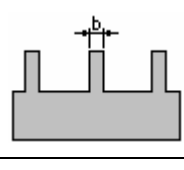
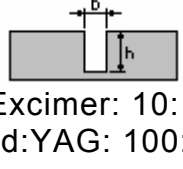
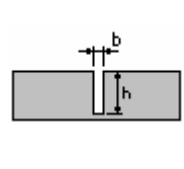
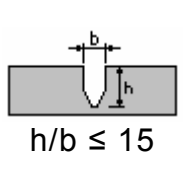
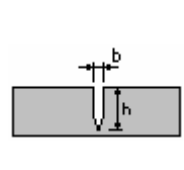
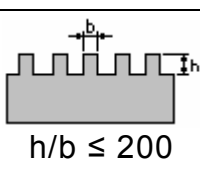
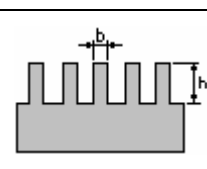
Tabelle A.3.1: Hauptmerkmalsleitlinie für Sensoren

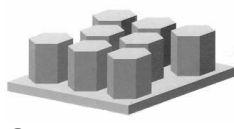
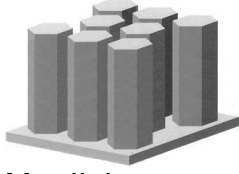
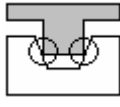
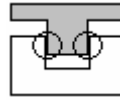
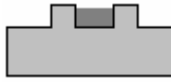
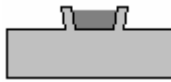
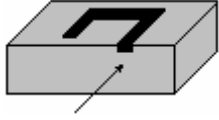

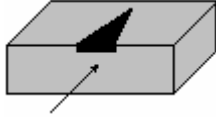
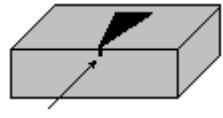
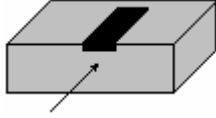

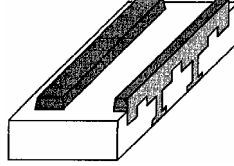
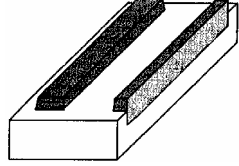
A.4 Erweiterte Anforderungsliste mit Ausfüllanleitung

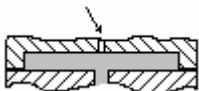
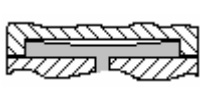
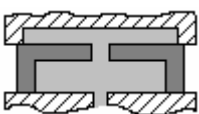
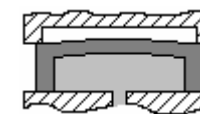





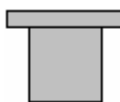
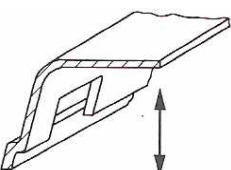
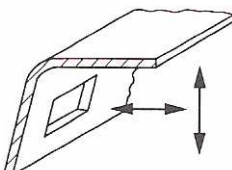
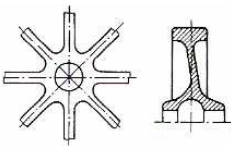
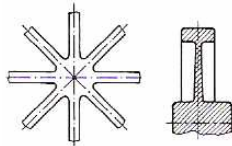
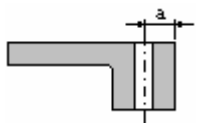
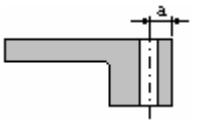


Nummer des Dokumentes	Projekt- nummer oder Bezeichnung	Verantwortlicher Erstellen und Pflege des Dokumentes	Datum der letzten Änderung	Versionsnummer	Blatt Nr. / von Gesamtzahl	
Nummer	Projekt	Bearbeiter	Datum	Version	Blatt	
Anforderungsliste für						
F W	Merkmal	Optimalwert	Zielwert	Ausschluss- bzw. Grenzwert	Verwendungs- bereich	Verantw./ Quelle
①						
②						
③		④	⑤	⑥	⑦	⑧

- ① Angabe der Anforderungsart: **Festforderung** oder **Wunschforderung** (Wunschforderung evt. mit Prioritätszahl).
- ② Nummer der Anforderung, gegliedert nach Anforderungsgruppen oder Baugruppen.
- ③ Beschreibung der Eigenschaft.
- ④ Der Optimalwert gibt an, welchen Wert die Eigenschaft bei idealer Erfüllung hat (4 von 4 Punkten)
- ⑤ Der Zielwert gibt an, welchen Wert die Eigenschaft zum Verwirklichen eines guten Produktes hat (3 von 4 Punkten).
- ⑥ Der Ausschlusswert gibt an, welchen Wert die Eigenschaft auf keinen Fall unterschreiten darf (0 von 4 Punkten).
- ⑦ Der Verwendungsbereich gibt an, für welchen Entwicklungsbereich das Merkmal von Bedeutung ist (z. B. m für mechanische Entwicklung, e für elektronische Entwicklung oder t für Entwicklung der Technologie).
- ⑧ Angabe des Verantwortlichen oder der internen oder externen Quelle der Merkmals- und Werteangabe.
Kursive Einträge sollten vom Entwickler durch die entsprechenden Angaben ersetzt werden.

A.5 Beispiele für Gestaltungsregeln für MID-Bauelemente

Produkt- phase	Kriterium	Gestaltungshinweis	Beispiel	
			geeignet	ungeeignet
1. Fertigung und Montage	1.1 Spritzgießen (inklusive Formeinsatz- herstellung)	1.1.1 Kleinste Innenradien (abhängig vom Ferti- gungsverfahren)	 typ. $R \geq 20 \mu\text{m}$	 mögl. $R \geq 5 \mu\text{m}$ [IMM05A]
		1.1.2 Gleiche Radien ver- wenden, um Werkzeug- kosten niedrig zu halten		
		1.1.3 Kleinste Bohrungsdurch- messer	 $d \geq 30 \mu\text{m}$ [ZUMTOBEL05]	
		1.1.4 Richtwerte für maximale Lochtiefe beachten. ³⁾	 $l \leq 2d$	
		1.1.5 Kleinste Isolierbreiten	 $b \geq 100 \mu\text{m}$ [FVMID04]	 $b \leq 10 \mu\text{m}$ [GILLNER96, S.53]
		1.1.6 Minimale Stegbreiten (spanend hergestellt) [DENKENA05, S. 79]	 $b \geq 8 \mu\text{m}$	
		1.4.7 Aspektverhältnis (h/b) bei Laserbearbeitung des Formeinsatzes [IMM05B]	 Excimer: 10:1 Nd:YAG: 100:1	
		1.1.8 Aspektverhältnis Nuten (Profilschleifen) [WESTKÄMPER96, S. 81 ff]	 $h/b \leq 15$	
		1.1.9 Aspektverhältnis bei LIGA-Verfahren [LEßMÖLLMANN92]	 $h/b \leq 200$	

1. Fertigung und Montage	1.1 Spritzgießen (inklusive Formeinsatz- herstellung)	1.1.10 Max. LIGA-Strukturhöhe [LEßMÖLLMANN92]	 Günstig: $h \leq 600 \mu\text{m}$	 Möglich: $h \leq 1000 \mu\text{m}$
		1.1.11 Leiterbahnen beim 2-K-Verfahren gut abdichten, um Überspritzungen zu vermeiden.		
		1.1.12 Leiterbahnbreite muss dem Druck beim zweiten Schuss standhalten		
		1.1.13 Binstellen am Fließwegende vermeiden	 Anguss	 Anguss
		1.1.14 Teile am dicksten Querschnitt anspritzen. ³⁾		
		1.1.15 Lange Fließweglängen bei dünnen Querschnitten vermeiden. ³⁾		
		1.1.16 Schwindung beachten		
		1.1.17 Verbindungsfähige Werkstoffe für 2-K-Verfahren verwenden		
		1.1.18 Schmelzpunkt des Materials für zweiten Schuss muss unter dem des ersten Schuss liegen		
		1.1.19 Verzahnung zw. verschiedenen Materialien vorsehen	 [FRANKE95]	

1. Fertigung und Montage	1.1 Spritzgießen (inklusive Formeinsatz- herstellung)	1.1.20 Werkzeugentlüftung vor- sehen, (Prozessdrücke niedrig halten, Deform- ationen vermeiden)		
		1.1.21 Durchbrüche für all- seitigen Druckausgleich vorsehen		
		1.1.22 Abstützungen vorsehen zur Vermeidung von Durchbiegungen		
		1.1.23 Anguss optimieren um Material einzusparen; und ggf. als Entnahme- möglichkeit gestalten		
		1.1.24 Entformungsschrägen zur Vermeidung von Ent- formungsriefen. Üblich: 1:100 [HÖFFLER82]		
		1.1.25 Hinterschneidungen ver- meiden	 [SCHWARZ99]	 [SCHWARZ99]
		1.1.26 Konstante Wandstärken und allmähliche Quer- schnittsübergänge be- vorzugen. ¹⁾		
		1.1.27 Ausreichenden Wand- abstand einhalten (kon- stante Wandstärken)		
		1.1.28 Bauteile weitgehend symmetrisch gestalten. ⁴⁾		

¹⁾ - ⁴⁾: Konstruktionsregel und Beispiel nach: ¹⁾ [PAHL03], ²⁾ [FVMID04], ³⁾ [HÖFFLER82], ⁴⁾ [TEMPELHOF79]

Bild A.5.1: Beispiele für Gestaltungsregeln [WAGNER05]

A.6 Teilergebnisse zur Entwicklung des Neigungssensors

Produkt-Markt-Matrix Globaler Markt		Geräte zur Erfassung einer Neigung														
		derzeitige Märkte							neue Märkte							
		Automatisierungstechnik	Automobil und Transport	Bautechnik	Messtechnik	Militär, Marine, Luft- und Raumfahrttechnik	Sicherheitstechnik	Telekommunikation	Versorgungstechnik	Haushaltstechnik	IT Peripheriegeräte	Landwirtschaft	Lifestyle	Medizintechnik	Spielzeug	Umwelttechnik
derzeitige Produkte	Wasserwaage			X	X			X								
	Schlauchwasserwaage			X												
	Senklot			X		X										
	Winkelmesser			X	X	X		X								
	Laser Libelle			X					X							
	Optischer Neigungssensor	X			X	X										
	Kapazitiver Neigungssensor	X	X	X	X	X	X	X	X			X				
	Elektromechanischer Beschleunigungssensor	X	X		X	X	X	X				X				
	Piezoelektrischer Drehratensensor	X	X		X	X	X		X			X				
	Gyroskop					X		X								
neue Produkte	Bulk-Mikromechanik Neigungssensor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Bulk-Mikromechanik Beschleunigungssensor	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	Bulk-Mikromechanik Gyroskop	X	X			X		X			X		X		X	X
	Oberflächenmikromechanik Drehratensensor	X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Optischer Faserkreisel					X		X								
	MID Neigungssensor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Bild A.6.0.1: Produkt-Markt-Matrix für Neigungssensoren [LOPEZ04]

Problemformulierung	Funktionsstruktur
Gesamtfunktion: Die Abweichung von der Waagerechten messen	
Hauptfunktionen	
Als weitere Teilfunktion ist "Signal umformen" erforderlich	
Bedingungen: digitaler Ausgang	
Bedingungen: Fremdenergie zuführen	
Systemgrenze: Verlauf der Systemgrenze, wenn die Funktionsstruktur den allgemeinsten Fall der Problemformulierung beinhaltet	
Verschieben der Systemgrenze: Verlauf der Systemgrenze, wenn die Funktionsstruktur den Sensor beinhaltet	

Bild A.6.0.2: Erarbeitung der Funktionsstruktur des Neigungssensors [LOPEZ04]

Funktionen		Lösungsprinzipien												
1	Referenz zur Erde einstellen	a	b	c	d	e	f	g	h	i				
		Lot	Pendel	schwingender Körper auf einer gewölbten Ebene	Waage	rollender Körper auf einer schiefen Ebene	Klotz	Wasserwaage	Libelle	Konvektionskammer				
2	Winkel zur Referenz feststellen	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
		Widerstand	Kondensator	Kontaktkörper	Kontaktflüssigkeit	Elektrolyt	Spule	Hall- und Gauß-Effekt	Permalloy Widerstand	Piezo-widerstand	Piezokristall	Diodenarray	Vierquadranten-diode	Thermowiderstand
3	Signal umformen	a						b						
		Strom-Spannung-Verstärker						Spannung-Strom-Verstärker						
4	Signal Wandeln	a				b				c				
		A/D Wandler				Mikrorechner				Mikrocontroller				
5	Signal weiterleiten	a						b						
		Profibus						CAN-Bus						

Bild A.6.0.3: Morphologischer Kasten zur Kombination der Funktionsprinzipien [LOPEZ04]

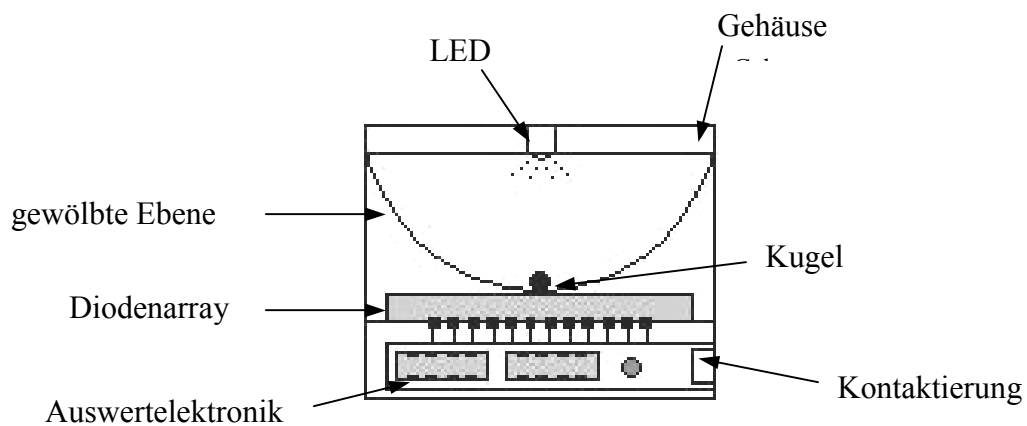


Bild A.6.0.4: Ausgewählte Lösung [LOPEZ04]

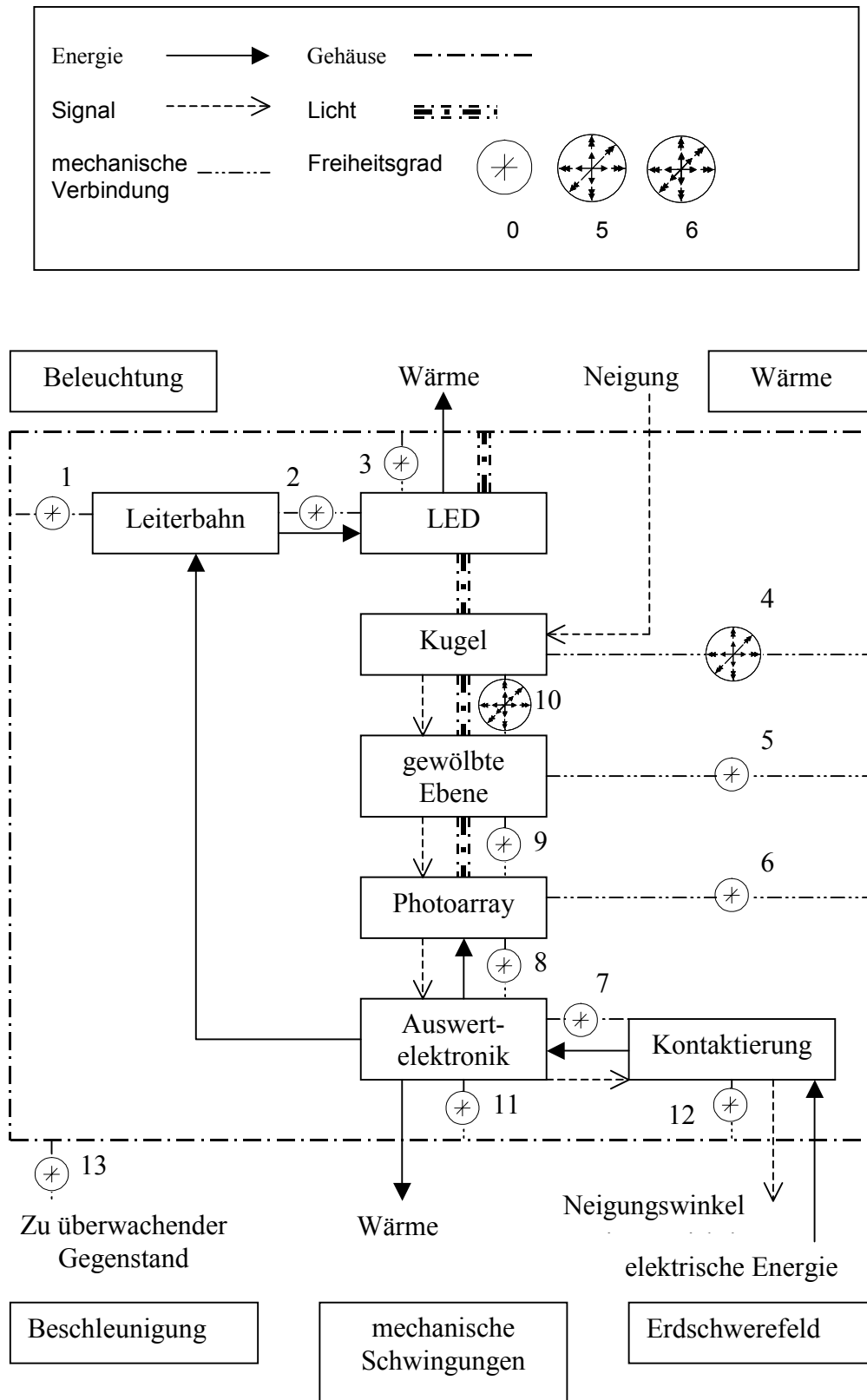


Bild A.6.0.5: Wirkstruktur des Neigungssensors [LOPEZ04]

A.7 Teilergebnisse zur Entwicklung eines Drehwinkelsensors

1		Drehwinkelsensor	Liu	12.0405	1 von 4	
Nummer		Projekt	Bearbeiter	Datum	Blatt	
F W	Nr.	Merkmal	Optimalwert	Zielwert	Ausschluss - bzw. Grenzwert	Verantw./ Quelle
	1	Beschreibung der zu messenden Größe				
F	1.1	Messbereich (Drehwinkel)	1080°	360°	180°	Liu
F	1.2	zul. Drehzahl	600 U/min	100 U/min	50 U/min	Liu
F	1.3	zul. Winkelbeschleunigung	3,0 rad/s ²	2,0 rad/s ²	1,5 rad/s ²	Liu
F	1.4	zul. Drehmoment	5 Ncm	3,5 Ncm	2 Ncm	Liu
W	1.5	Drehsinn	Beliebig drehbar	Beliebig drehbar	Beliebig drehbar	Liu
F	1.6	Axialbelastung der Welle	5 N	2,5 N	1,5 N	Liu
F	1.7	Radialbelastung der Welle	5 N	2,5 N	1,5 N	Liu
	2	Verknüpfung mit Messobjekt				
F	2.1	Rückstörung zum Messobjekt	Keine	Keine	0.5% der gesamten Leistung vom Messobjekt Mit der Berührung	Liu
W	2.2	Messverfahren	Berührungslos	Berührungslos		Liu
F	2.3	Stossfestigkeit	55 g, 11 ms	50 g, 11 ms	40 g, 11 ms	Liu
W	2.4	Anschlussart	Anpassung der Welle vermeiden	Universeller Anschluss	Universeller Anschluss	Liu
W	2.5	Montage am Messobjekt	Einfache mehrfache (De-)Montage	Einfache mehrfache (De-)Montage	Einfache mehrfache (De-)Montage	Liu
	3.	Eigenschaft des Sensors				
F	3.1	Max. Breite *Länge *Höhe	10*10*10 mm ³	50*50*50 mm ³	80*80*80mm ³	Liu

Bild A.7.1: Anforderungsliste des Drehwinkelsensors (Auszug) [LIU05]

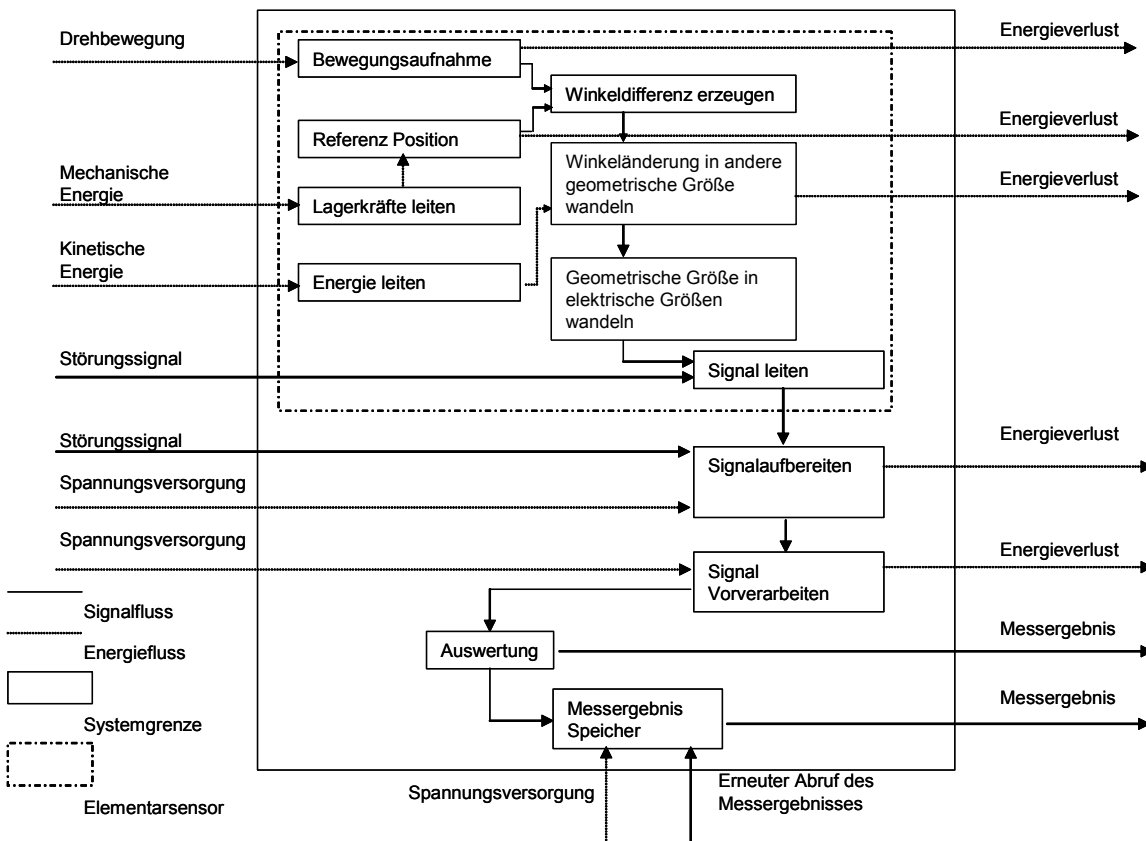


Bild A.7.2: Funktionsstruktur des Drehwinkelsensors [LIU05]

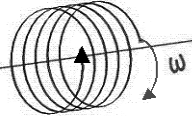
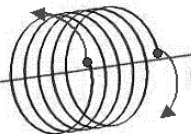

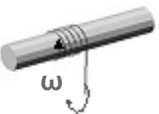
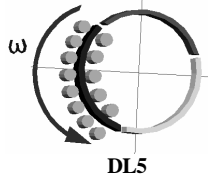
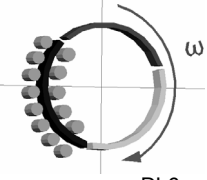
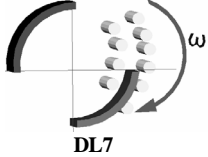
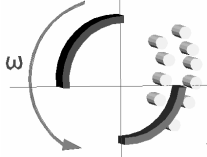
Direkte Verfahren		Induktivität:		
		$\text{Einfachleitung: } L = \mu_0 \mu_r l \frac{\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4}}{2\pi}$	$\text{Doppelleitung } L = \mu_0 \mu_r l \frac{\ln \frac{a}{r} + \frac{1}{4}}{\pi}$	
Veränderte Größe	Einfachleitung	Beschreibung		
r	Drehungsart	Die Spule hat eine bestimmte Länge. Beide Enden bleiben in einer Ebene. Falls sie sich drehen, werden Radius und Windungsabstand verkleinert. Links: Ein Ende bewegt Rechts: Beide Enden bewegt		
	 <p style="text-align: center;">DL1</p>			 <p style="text-align: center;">DL2</p>
l	 <p style="text-align: center;">DL3</p>	 <p style="text-align: center;">DL4</p>	Die Spule wickelt sich um einen festen Kern, oder umgekehrt. Dadurch ändert sich die gesamte Länge die Spule.	
	 <p style="text-align: center;">DL5</p>	 <p style="text-align: center;">DL6</p>		
μ_r	Anzahl	 <p style="text-align: center;">DL7</p>	 <p style="text-align: center;">DL8</p>	Mit drei verschiedenen Dielektrika ändert sich die Dielektrizität durch die Drehung der Spule. Gleiches Prinzip wie oben, aber hier kann man das gleiche Material einsetzen.

Bild A.7.3: Ordnungsschema zur systematischen Variation der Parameter [LIU05]

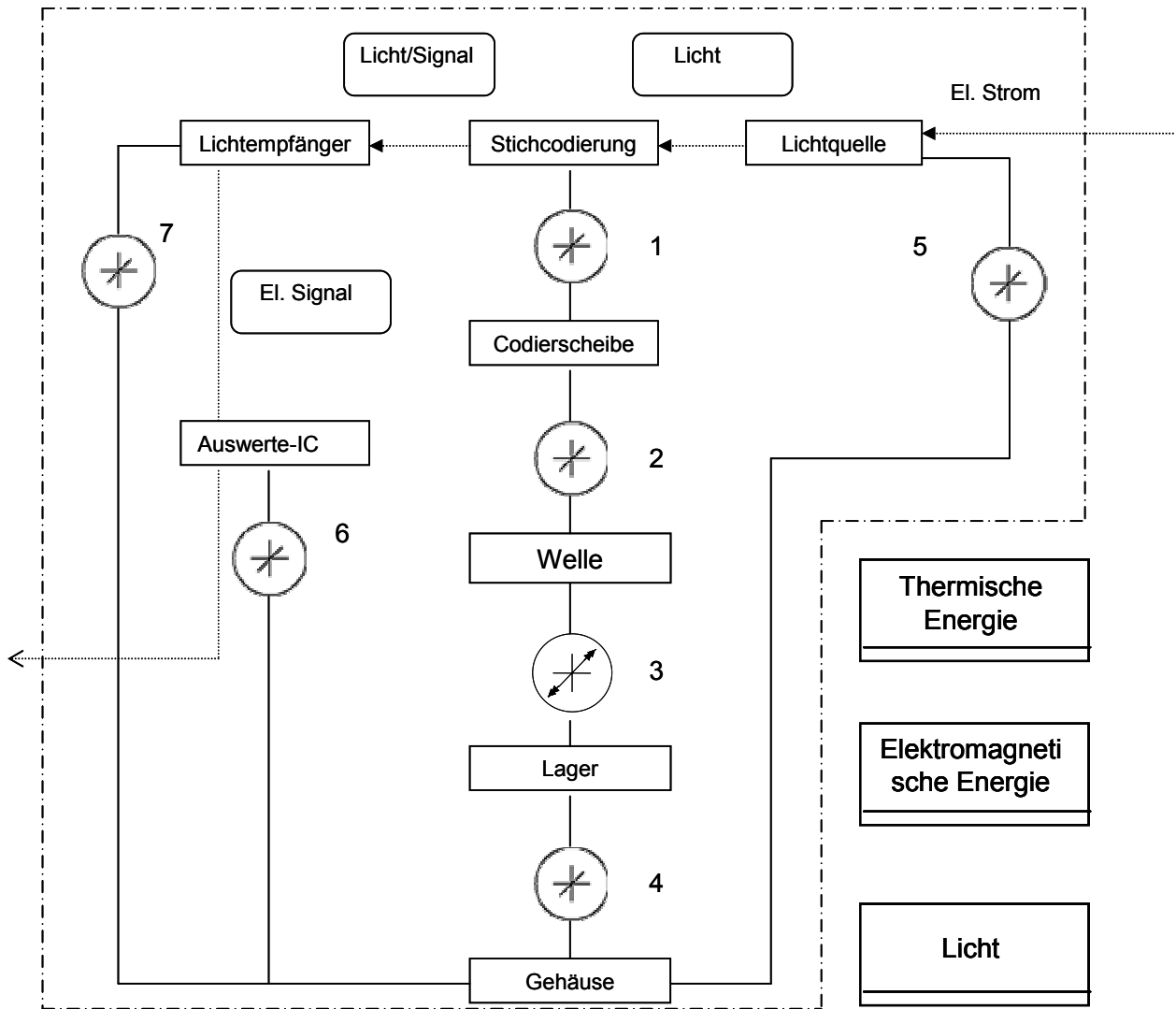


Bild A.7.4: Wirkstruktur eines Drehwinkelsensors [LIU05]

A.8 Beschreibung und Fragen zur Evaluierung

Forschungsvorhaben: Vorgehensweise zur Entwicklung von mikrosystemtechnischen Bauelementen und Systemen am Beispiel von Sensoren

Das Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik (IZFM) und das Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) (ehemals Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau (IMK)) der Universität Stuttgart untersuchen in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben die Optimierung der Vorgehensweise bei der Entwicklung von mikrosystemtechnischen Bauelementen und Systemen.

Die Mikrosystemtechnik ist ein junges Forschungsfeld, in dem bisher technologische Fragen einen breiten Raum einnehmen und das immer stärker an Bedeutung gewinnt. Während in Forschung und Entwicklung die Fertigungsverfahren immer weiter untersucht und verbessert werden, fehlt bisher eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung von mikrosystemtechnischen Produkten. Dadurch können zwar vorhandene Produkte durch verbesserte Herstellungsverfahren immer weiter verkleinert werden, eine gezielte Suche nach spezifisch mikrosystemtechnischen Lösungen findet aber nicht ausreichend statt.

Um Optimierungsbedarf zu ermitteln, wird daher im Rahmen dieses Vorhabens zunächst die aktuelle Vorgehensweise bei der Entwicklung in verschiedenen Bereichen (Hochschule, Industrie, ...) untersucht:

- Vorgehensweise bei der Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte
- eingesetzte Methoden und Hilfsmittel
- Probleme und Schwachstellen im Entwicklungsablauf

Im Anschluss wird eine auf die Bedürfnisse der Mikrosystemtechnik abgestimmte flexible Vorgehensweise erstellt und erprobt, die in Form eines Leitfadens die Vorgehensweise bei der Entwicklung mikrosystemtechnischer Bauelemente und Systeme unterstützen soll. Dazu wird zunächst untersucht, ob sich die bewährte klassische Konstruktionsmethodik aus dem Maschinenbau in modifizierter Form

auf die Mikrosystemtechnik übertragen lässt. Ergänzend werden Methoden zur Behebung von Schwachstellen im Entwicklungsablauf entwickelt.

Interessante Fragenkomplexe in diesem Zusammenhang sind:

- Was ist ein Mikrosystem aus Ihrer Sicht?
- Warum befassen Sie sich mit Mikrosystemtechnik?
- Welche Besonderheiten prägen Ihre Branche?
- Welche besonderen Chancen bietet die Mikrosystemtechnik?
- Nach welchen Kriterien wählen Sie Werkstoffe und Herstellungstechnologie aus?
- Was sind die Hauptschwierigkeiten während der Entwicklung eines neuen Produktes?
- Welche Ausbildung haben Ihre Entwickler und wie organisieren Sie die Zusammenarbeit?
- Welche Phasen durchlaufen Sie während der Produktentwicklung?
- Welche Ergebnisse stehen am Ende der Phasen?
- Wie handhaben Sie Weiterentwicklungen von Produkten (Modifikation oder neu)?
- An welchen Stellen setzen Sie Methoden ein, und wo fehlen noch geeignete Methoden zur Unterstützung der Produktentwicklung?
- Wie umfangreich nutzen Sie Simulation während der Produktentwicklung und in welchem Bereich?
- Wie sehen Sie den Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Produktes und der Herstellungstechnologie bzw. der Fertigung?
- Welche Rolle spielen Kosten, Zeit und Zuverlässigkeit bei der Produktentwicklung?
- Wie berücksichtigen Sie Kosten während der Produktentwicklung?
- Wie gehen Sie mit Wissen um (Datenbanken, Methoden etc.)?

A.9 Evaluation Harting Mitronics AG

Harting Mitronics setzt in erster Linie Systemkonzepte der Kunden in herstellbare Produkte um und fertigt diese im Bereich MID-Technik, Galvanik und Laserstrukturierung. Die Haupttätigkeit liegt also in Phasen mit einem höheren Reife- und Konkretisierungsgrad. Die Mikrosystemtechnik ist im Unternehmen noch stark im Aufbau, wird aber insbesondere aufgrund der vielen Funktionen in wenigen Bauelementen als Zukunftstechnologie gesehen, in die weiter investiert wird. Das Entwicklungsteam ist eher klein und interdisziplinär (Physiker, Elektrotechniker, Maschinenbauer) zusammengesetzt. Durch kurze Wege ist es möglich, auftretende Probleme schnell und mit allen Beteiligten an einem Tisch zu klären. Auch bei Vorgesprächen mit Kunden werden Technologieexperten von Anfang an beteiligt, um so spätere Probleme von vorneherein auszuschließen. Bei spezielleren Fragestellungen wird auch mit externen Beratern zusammengearbeitet.

Für die Vorgehensweise bei der Entwicklung hat das Unternehmen einen ausgearbeiteten „Leitplan für Projektmanagement“. Projekte werden, je nachdem, ob die Technologie nur umgesetzt wird oder aber komplett mitentwickelt werden muss, in Risikoklassen eingeteilt und nach einem Ablaufplan mit Meilensteinen entwickelt. Für eigene Produkte wird dieser Leitplan von Anfang an eingesetzt, für Kundenprojekte erst in späteren Phasen. Methoden werden zweck- und aufwandsorientiert eingesetzt, z. B. Brainstorming, FMEA und Nutzwertanalyse.

Die Entwicklung eigener Produkte steht nicht im Vordergrund, so dass in der Regel auch keine Weiterentwicklungen von Produkten stattfinden, sondern ausschließlich neue Produkte auf Basis von vorgegebenen Konzepten für andere Unternehmen entwickelt werden. Dabei ist es auch üblich, mehrere Varianten eines Produktes in der Konzeptphase nebeneinander auszuarbeiten und erst abschließend ein Konzept für den weiteren Entwurf auszuwählen.

Ein Problem zu Beginn der Entwicklung sind, trotz vorhandener Checklisten mit benötigten Angaben, oft fehlende oder unvollständige Lastenhefte vom Kunden, die im Laufe der Entwicklung zu unnötigen Schleifen führen. So werden Anforderungen dann oft z. B. aus Konkurrenzprodukten abgeleitet.

Das Wissen, das für die Fertigung wichtig ist, ist beispielsweise in Form von Einrichtblättern oder Informationsblättern zur Ankontaktierung teilweise geordnet vorhanden und wird auch in Form von „Design Rules“ für die Fertigung an Kunden weitergegeben. Die Herstellungstechnologie ist vorhanden, verfahrenstechnische Details werden, wie in der Branche üblich, nicht publiziert und oft auch nicht patentiert, da sie das eigentliche Kapital des Unternehmens darstellen. Durch die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit ist benötigtes Wissen aber auch schnell in Form des entsprechenden Spezialisten verfügbar.

Simulationen werden z. B. eingesetzt, um die Formfüllung beim Spritzguss oder thermomechanische Zusammenhänge, aber auch Hochfrequenzeinflüsse bei Antennen zu simulieren.

Die vorgestellte Methodik entspricht in der Vorgehensweise dem Ablauf im Unternehmen, ist „sehr systematisch“ und „gibt die Praxis gut wieder“. Beim Vergleich mit der Vorgehensweise im „Leitplan“ des Unternehmens zeigt sich eine grundsätzliche Übereinstimmung.

Die Methoden sind praxisgerecht und umsetzbar. So werden z. B. Zielwerte in der Anforderungsliste bzw. für die Bewertung im Unternehmen bereits in Form einer „Ampel“ erfasst, die ihre Realisierbarkeit ausdrückt. Das Aufstellen von Checklisten für eine Auswahl der Werkstoffe bzw. Technologien wird als wichtig beurteilt und im Unternehmen aktuell angegangen, allerdings sind aufgrund der dynamischen Weiterentwicklung die Informationen meist eher „in den Köpfen“ vorhanden. Für Methoden im Bereich der Systementwicklung besteht aufgrund der fertigungsnahen Unternehmensausrichtung weniger Bedarf. So wird für Konstruktionskataloge oder Datenbanken zur Sammlung von Wissen ein klarer Bedarf gesehen, allerdings ist in der Umsetzung das Hauptproblem, dass die Unternehmen ihr Wissen für sich behalten. Design Rules sind eine sehr große Hilfe und werden verwendet, auch hier ist eine ständige Aktualisierung erforderlich.

A.10 Evaluation Festo AG & Co. KG

Die Festo AG & Co. KG ist ein großer und sehr innovativer Konzern, bei dem der Bereich Mikrosystemtechnik erst als relativ kleine Abteilung im Aufbau ist. Das Unternehmen entwickelt zur Verbesserung oder Werterhöhung seiner Hauptprodukte Mikrosysteme, die dann meist außerhalb des Unternehmens gefertigt werden. Viele betrachtete Fragestellungen stammen aus dem Bereich der Mikrofluidik. Das Entwicklungsteam ist interdisziplinär aus Physikern, Maschinenbau-, Elektrotechnik- und auch Mikrosystemtechnikern zusammengesetzt und vom Umfang her klein (< 10 Entwickler). Entwickelt wird in verschiedenen Technologien, aber vorwiegend auf Basis der Siliziumtechnologie. Durch die kleine Größe des Bereiches ist es noch einfach, fächerübergreifende Fragestellungen direkt abzuklären. Die Vorgehensweise dabei ist eher pragmatisch und an Ergebnissen orientiert als methodisch.

Produktideen ergeben sich oft konzernintern, indem vom Marketing her Anregungen kommen, die dann als Mikrosysteme eher alternativ zu konventionellen Technologien betrachtet werden. Pflichtenhefte sind vom Marketing meist aufgrund einer klaren Produktdefinition vorgegeben und relativ genau aufgeschlüsselt und festgelegt. Der Entwicklungsprozess geht eher von konkreten Produktideen bzw. Lösungsansätzen aus, die dann als Prototyp umgesetzt und geprüft werden. Dabei haben von Anfang an die Herstellungstechnologien einen starken Einfluss auf die Produktideen, um eine mögliche „falsche Richtung von theoretischen Ideen“ auszuschließen. Eine abstrakte Betrachtung der Entwicklungsaufgabe unterbleibt daher meist. Datenbanken zur Wissensspeicherung und Methoden wie Brainstorming oder FMEA werden zielgerichtet dann eingesetzt, wenn es erforderlich ist. Der Prototyp wird zur Vorserienreife weiterentwickelt, bevor nach erneuter Prüfung Serienprodukte entstehen.

Bei der Sicht auf das „Produkt“ in der Mikrosystemtechnik werden Produkte im MID-Bereich teilweise abgewandelt, im Bereich der Siliziumtechnik aufgrund des höheren technologischen Aufwandes eher komplett neu konzipiert. Die MID-Technik wird dabei tendenziell als „feine Feinwerktechnik mit Systembetrachtung“, aber nicht so integriert wie die Siliziumtechnik gesehen.

Erfahrungen mit Simulation werden bei vielen Entwicklungen gesammelt, allerdings ist dabei die Erfahrung gemacht worden, dass oft die für den Makrobereich entwickelte Software im Mikrobereich nicht mehr zufrieden stellende Ergebnisse liefert.

Bei der Herstellung der Produkte besteht die Philosophie zur Zeit noch darin, teure Prozesse wie Galvanik oder Beschichtungen eher außerhalb des Unternehmens zu vergeben, um Investitionen in nicht voll ausgelastete Anlagen zu vermeiden. In einfachere und kostengünstigere Fertigungsschritte wie die Strukturierung wird zum Teil selbst investiert. Die allgemein in der Mikrosystemtechnik zu beobachtende Bewahrung firmenspezifischen Wissens führt dazu, dass Hersteller ihre Prozesse ungern offen legen und Kunden die Prozesse ihrer Lieferanten teilweise weiterentwickeln, indem für neue Generationen von Produkten Technologiesprünge erforderlich werden. Die Preisgabe von firmeninternem Wissen wird daher möglichst vermieden, in der Branche werden daher teilweise sogar bewusst falsche Informationen gestreut.

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung im Unternehmen ist insgesamt eher pragmatisch. Daher erscheint die vorgestellte Methodik zwar vom Ablauf her für die Entwicklung in der Mikrosystemtechnik geeignet und gibt die grundsätzlichen Entwicklungsschritte wieder. Interesse besteht grundsätzlich an Methoden, die direkte Ergebnisse bringen. Die Rahmenbedingungen für die Entwicklung werden auch durch die Einbindung in ein Großunternehmen weitgehend von der Umgebung, z. B. durch die Vorgabe klarer Anforderungen, gesetzt. Eine Sammlung von Wissen in Form von Auswahlmatrizen für Werkstoffe oder Technologien erscheint sinnvoll, aber aufgrund der schnellen Weiterentwicklung eher in Form von Kriterien, die bedacht werden müssen. Das Wissen im Unternehmen ist oft personengebunden und wird zum Teil in Projektdokumentationen festgehalten. Konstruktionskataloge sind als Informationsmittel sehr interessant, wenn das Wissen bereits enthalten ist. Aufgrund der geringen Größe des Bereiches besteht geringer Bedarf, Wissen zu speichern und ohne Personenbindung verfügbar zu machen. Die Wirkstruktur erscheint als Werkzeug für den Moderator interdisziplinärer Fragestellungen interessant, um Spezialisten zusammenzubringen.

A.11 Evaluation Boehringer Ingelheim microparts GmbH

Microparts war ursprünglich eigenständig, wurde aber dann von einem großen Pharmakonzern aufgekauft, da einige Produkte wichtig für die Dosierung von Medikamenten oder die medizinische Analyse sind. Der Forschungs- und Entwicklungsbereich ist mit 40 Personen eher klein, wodurch ein intensiver Austausch möglich wird. Das Unternehmen entwickelt Produkte, z. T. mit langjährigem Forschungsaufwand, und stellt diese anschließend auch selbst her. Die Mikrosystemtechnik bietet dem Unternehmen insbesondere die Möglichkeit, neue physikalische Effekte zu nutzen und so wesentliche Funktionen der Produkte durch Mikrobauelemente umzusetzen. So dienen z. B. feine Düsen zur besseren Verteilung von Medikamenten in Nebelform für Dosiersysteme mit breitem Einsatzbereich am Markt und starkem Wachstum. Diagnosesysteme mit feinen Fluidleiterbahnen auf Kapillarbasis ermöglichen schnelle und vielfältige Diagnosesysteme.

Durch die Zugehörigkeit zur Medizintechnik ist die Entwicklung geprägt von sehr intensiver interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Naturwissenschaftlern, aber auch dem Vertrieb, Pharmakologen oder Ärzten. Das benötigte Wissen ist sehr stark im Fluss und muss ständig weiterentwickelt werden. Charakteristisch ist die zwar parallele Entwicklung der Herstellungstechnologien, die aber auf ausgereiften Techniken beruht, weil in langwierigen Zulassungsverfahren auch die Herstellungstechnologien zertifiziert werden. Es findet daher in erster Linie eine Feinoptimierung statt. Die Entwicklungszeiten sind dadurch bedingt mit bis zu 10 Jahren sehr lang, die geforderte Zuverlässigkeit und die Stückzahlen sind sehr hoch. Eine große Rolle spielt auch die Keimfreiheit der Produkte, wodurch die Produktion erheblich verteuert wird.

Neue Produkte entstehen auch aufgrund der Vorteile und der neuen physikalischen Effekte, die die Mikrosystemtechnik gegenüber konventionellen Techniken bietet. Der Lebenszyklus der Produkte spielt für die Entwicklung eine große Rolle, da Dosiersysteme z. B. unter verschiedensten Umweltbedingungen zuverlässig funktionieren müssen. Eine besondere Rolle spielen die klinischen Phasen, die spät stattfinden und lange dauern, aber wesentlichen Einfluss auf die Eignung der Produkte haben.

Für den Entwicklungsablauf gibt es einen Prozess, bei dem der Dokumentationsgrad in der Entwicklung aus Haftungsgründen sehr hoch ist. Der Prozess ist relativ konkret und nah am herstellbaren Produkt ausgerichtet. Methoden werden je nach Bedarf eingesetzt. Simulation unterstützt in Teilbereichen, z. B. bei der Entwicklung der Herstellungsverfahren, wird aber noch nicht durchgängig verwendet.

Die Auswahl von Herstellungstechnologien durch Checklisten bzw. Dokumentationen der Herstellungsanlagen spielt eine wichtige Rolle, um zu den Produktionsanlagen kompatible Designs zu entwickeln. Das Wissen ist nur in Ansätzen in Papierform dokumentiert und in erster Linie „in den Köpfen“ gespeichert, wobei das Sammeln der Informationen und die Pflege aufgrund der Schnelllebigkeit der Mikrosystemtechnik als Problem betrachtet wird.

Die vorgestellte Entwicklungsmethodik wird als systematische und sinnvolle Vorgehensweise gesehen, die realisierbar wäre bzw. mit den vorhandenen Abläufen kompatibel ist. Teilbereiche, wie z. B. das Systemkonzept, werden nur in geringerer Detaillierung benötigt. Wichtig ist ein effizienter Ablauf. Von den Methoden erscheint eine Sammlung physikalischer Effekte interessant, die die firmenspezifisch relevanten Effekte enthält. Bei der Wirkstruktur spielen branchenbedingt auch andere, wie z. B. biologische Einflüsse, eine große Rolle – daher wäre sie ein Ansatzpunkt für die interdisziplinäre Zusammenarbeit.

A.12 Evaluation Unternehmen X

Bei der Firma X sind in der Mikrosystemtechnik ca. 300 Mitarbeiter in der Produktentwicklung, und ca. 70 Mitarbeiter in Forschung und Vorentwicklung beschäftigt. Das Unternehmen deckt die komplette Wertschöpfungskette von der Forschung über die Vorentwicklung und Entwicklung bis hin zur Fertigung der Produkte selbst ab, prägt die Fortschritte in der Herstellungstechnologie mit eigenen Weiterentwicklungen und vertreibt Mikrosysteme in großem Umfang. Es ist damit von den befragten Unternehmen bei weitem das größte.

Dies zeigt sich auch in der Struktur der interdisziplinär besetzten Vorentwicklung, die in die etwa gleich großen Bereiche Technologie, Design/Simulation und Mess- und Prüftechnik/Zuverlässigkeit aufgeteilt ist.

Neue Produkte entstehen entweder durch externe Kundenanfragen oder aus Eigenentwicklungen. Projekte werden darüber hinaus sehr oft auch aus der Produktgenerationenplanung gestartet, mit dem Ziel einer technologischen Weiterentwicklung und insbesondere Kostensenkung vorhandener Produkte. Hier wirkt sich der hohe Kostendruck mit jährlichen Abschlägen, z. B. in der Automobilindustrie aus, der den Markteintritt der Mikrosystemtechnik gegenüber etablierten Systemen erleichtert. Produktideen sind durch die ebenfalls im Konzern vorhandenen Systeme, in denen die mikrosystemtechnischen Produkte zum Einsatz kommen, oft sehr früh schon sehr konkret.

Für den Entwicklungsablauf gibt es einen ausgereiften Prozess, der auf dem V-Modell beruht und in mehreren Stufen abläuft, wobei bei einem bestimmten Reifegrad von der Vor- an die Serienentwicklung übergeben wird. Entwicklungszeit und –kosten werden über intensive Modellierung und Simulation verringert. Auch eine Reihe von Methoden, wie z. B. FMEA oder QFD, werden eingesetzt und durch die Stellung in einem Großunternehmen auch von eigens dafür zuständigen Abteilungen entwickelt und angepasst.

Anforderungen sind oft nur unscharf definiert, besonders wenn sie durch Vorgaben von außerhalb z. B. aus der Automobilindustrie vorgegeben sind.

Die Auswahl der Herstellungstechnologien bzw. Dokumentationen der Herstellungsanlagen spielt eine wichtige Rolle, um zu den Eigenschaften der Produkti-

onsanlagen kompatible Designs zu entwickeln. Gestaltungsrichtlinien werden insbesondere für die herstellungsgerechte Gestaltung genutzt, sind aber gleichzeitig Firmen-Know-How. Sie werden deshalb nur eingeschränkt, z. B. bei Fertigungsaufträgen von Externen, nach außen gegeben. Auch der Einsatz von Konstruktionskatalogen wäre sinnvoll, um Lösungen zu dokumentieren und verfügbar zu machen. Entwicklungen werden selbstverständlich dokumentiert, dennoch spielen die Experten als Wissensträger eine bedeutende Rolle. Das Sammeln von Informationen und die Pflege wird aufgrund der Schnelligkeit der eingesetzten Techniken als Herausforderung betrachtet.

Die vorgestellte Entwicklungsmethodik wird als „schöne Beschreibung des aktuellen Status Quo“ gesehen, würde also auf reale Entwicklungsabläufe passen. Von den Methoden erscheint insbesondere die Wirkstruktur interessant, die als Grundlage für die Arbeit einer Abteilung, die sich mit der Simulation von Wirkzusammenhängen beschäftigt, dienen könnte.

Die Umsetzung einer anderen Entwicklungsmethodik erscheint in einem großen Konzern schwierig, da organisatorische Veränderungen nur mit großem Aufwand durchsetzbar sind.

Aktuelle Arbeitsgebiete mit Forschungsbedarf sind naturgemäß die Entwicklung neuartiger Produkte und dabei insbesondere die Aufbau- und Verbindungstechnik und der Bereich der Modellierung und Simulation, in dem beispielsweise mit Methoden des robusten Designs den unvermeidlichen Toleranzen in der mikro-systemtechnischen Fertigung begegnet wird.

Lebenslauf

Name: Robert Watty
Geburtsdatum: 12. Juni 1967
Familienstand: Ledig
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Schulbildung:

1973-1977 Grundschule Garather Straße, Düsseldorf
1977-1986 Gymnasium Koblenzer Straße, Düsseldorf
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst:

10.1986 - 09.1988 Luftwaffenausbildungsregiment II, Budel/NL

Studium:

10.1988 - 07.1994 Maschinenbau, Fachrichtung Fertigungstechnik
RWTH Aachen
Abschluss: Diplomingenieur
10.1990 – 09.1993 Betriebswirtschaftslehre, RWTH Aachen
10.1994 – 06.2003 Wirtschaftswissenschaften, FernUniversität Hagen
(mit Unterbrechungen) Abschluss: Diplomkaufmann

Berufstätigkeit:

08.1994 – 12.1995 Entwicklungsingenieur, Braas Dachsysteme GmbH,
Heusenstamm
12.1995 – 12.1997 Referendar Lehramt für die Sekundarstufe II (berufliche
Fachrichtung), Studienseminar Düsseldorf
Abschluss: 2. Staatsexamen
12.1997 – 07.1998 Dozent, Handwerkskammer Düsseldorf
08.1998 – 12.2001 Studienrat, Thomas Esser Berufskolleg, Euskirchen
Technikerschule und Berufsschule
seit 01.2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Konstruktions-
technik und Technisches Design (IKTD) (ehemals Ma-
schinenkonstruktion und Getriebebau (IMK)), Universität
Stuttgart