

Methode zur zielorientierten Varianten-Findung bei der Entstehung mikrotechnischer Produkte

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Claudia Neumeister

geboren am 19.10.1969, in Minden

2005

Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Heinrich Gatzen

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker

Tag der Promotion: 22.April 2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am „Institut für Mikrotechnologie“ (imt) der Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. H. H. Gatzert, dem Leiter des imt, für die zahlreichen Anregungen und Hilfestellungen während der Betreuung dieser Arbeit sowie für die intensive Unterstützung meiner Forschungstätigkeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Redeker, ehemaliger Leiter des Instituts für Qualitätssicherung (IQ) der Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ferner gilt mein Dank dem Vorsitzenden der Prüfungs-Kommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Poll, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, Konstruktions-technik und Tribologie (IMKT) der Universität Hannover, für das entgegengebrachte Interesse.

Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Steffen Christian Sprenger, der durch fachliche Unterstützung und zahlreiche Diskussionen wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Mein größter Dank gilt an dieser Stelle meinem lieben Mann Arno, der mich in unermüdlicher Weise in all den Jahren unterstützt hat und mir stets zur Seite stand.

Porta Westfalica , im April 2004

Claudia Neumeister

Abstrakt

Mikrotechnische Produkte sind in vielen Anwendungsfeldern wie z.B. Medizintechnik, Fertigungstechnik, Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Kommunikationstechnik zu finden. Bei ihrer Produktentstehung liegt ein großes Augenmerk auf den Entwurfs- und Fertigungskriterien. Um die daraus abgeleiteten Design- und Technologieanforderungen zu charakterisieren ist es notwendig, den Entwurf mikrotechnischer Produkte bzgl. seiner Besonderheiten zu analysieren. Nur so kann die Produktentwicklung gezielt unterstützt und optimiert werden. Bislang existieren keine strukturierten Vorgehensweisen zur Produktentstehung in der Mikrotechnologie. Daher liefert diese Arbeit einen Beitrag zur zielorientierten Variantenfindung (ZVF) bei der Entstehung mikrotechnischer Produkte, wobei es Ziel ist, ein Optimum aus Funktionalität und Fertigbarkeit zu erzielen. Zu Beginn einer Entwicklung werden mehrere Produktvarianten definiert, deren Beurteilung das zentrale Thema dieser Arbeit darstellt. Zur Charakterisierung der Varianten wird ihre Entwicklung in drei Bereiche aufgeschlüsselt: Produkt-Konfiguration, Produkt-Design und Produkt-Technologie. Die Produkt-Konfiguration dient der Definition von einzelnen Varianten. Das Produkt-Design und die Produkt-Technologie kommen zur Beurteilung von Simulationsergebnissen und Technologieschritten zum Einsatz. Die Ergebnisse der Entwicklung werden mittels Formblättern (Matrizen) betrachtet und ausgewertet. Auf Grund der Berechnung von Kennzahlen werden die Produktvarianten direkt miteinander vergleichbar, so dass die beste für die spätere Fertigung ausgewählt wird. Der Ansatz der Methode zur zielorientierten Variantenfindung wird durch eine Software zusätzlich computergestützt umgesetzt. Diese computerunterstützte Variantenfindung (CoVaFind) wird im Rahmen einer Fallstudie, zur Entwicklung eines Wirbelstromsensors als Beispiel für ein mikrotechnisches Produkt, validiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen Beitrag zur Unterstützung bei der Entstehung mikrotechnischer Produkte. Dazu ist die Vorgehensweise der Methode, durch eine gezielte Varianten-Bewertung, an die Besonderheiten der Mikrotechnologie angepasst.

Schlagerworte: Zielorientierte Varianten-Findung, mikrotechnische Produkte,
Kennzahlen

Abstract

Microsystems can be found in many fields, e.g. in medical technology, production engineering, process engineering, environmental technology, and communications. When the respective products are developed, the focus is on design and production criteria. In order to describe the resulting design and technology requirements, it is necessary to analyse the design of microsystems in light of their special features. Only such an analysis will provide good support for product development and its optimization. Up to now, no structured procedures exist for product development in micro-technology. Therefore, this thesis contributes to the focussed finding of variants (ZVF) when micro-technological products are developed. At the beginning of such a development several product variations are determined. Their evaluation is the main subject of this thesis. In order to characterise these variants, their development is divided into three fields: product configuration, product design and product technology. Product configuration serves for the definition of individual variants. Product design, and product technology are used for the evaluation of simulation results and technological stages. Results of the development are fixed and evaluated by means of printed forms (matrices). Based on the calculation of the figure of merit, product variants become comparable and one specific variant can be selected later on for production. The method for the focussed finding of variants is realised additionally by a computer-aided variant finding (CoVaFind). This program approach is validated in a case study for the development of an eddy current sensor, which serves as an example for a micro-technological product. The results of this thesis contribute in supporting the creation of microsystems. For this purpose the stages within this procedure are adapted to the specialities of micro-technology through the focussed evaluation of variants.

Key words: finding of variants, micro-technological products, figure of merit

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	8
1 Einleitung	10
2 Stand der Kenntnisse	11
2.1 Mikrotechnische Produkte	11
2.1.1 Bedeutung der Mikrotechnologie	11
2.1.2 Besonderheiten bei mikrotechnischen Produkten	14
2.2 Produktentstehung – Grundlagen	16
2.3 Produktentstehung makroskopischer Erzeugnisse – Methoden, Strategien und Werkzeuge	17
2.3.1 Concurrent Engineering (CE) als Entwicklungsstrategie für die Produktentstehung	20
2.3.2 Einsatz von Qualitätswerkzeugen	27
2.3.2.1 Total Quality Management (TQM)	27
2.3.2.2 Quality Function Deployment (QFD)	30
2.3.2.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	32
2.4 Produktentstehung mikrotechnischer Erzeugnisse	33
2.4.1 Entwurfsaspekte	36
2.4.2 Fertigungsaspekte	41
2.5 Rechnerunterstützung des Produktentstehungsprozesses	42
2.5.1 Datenmanagement mit Rechnerunterstützung	42
2.5.2 Kennzahlen	44
3 Aufgabenstellung und Zielsetzung	49
4 Vorgehensweise	50
5 Zielorientierte Varianten-Findung – ZVF	52
5.1 Struktur der ZVF	52
5.2 Einbindung der ZVF in den Entwicklungsprozess	53
5.3 Definition der Produktvarianten	57
5.3.1 Modul-Tabelle	58
5.3.2 Konfigurations-Matrix	58
5.4 Beurteilung des Designs	61
5.4.1 Design-Tabelle	63
5.4.2 Design-Matrix	63

5.4.3	Design-Kennzahlen.....	65
5.5	Beurteilung der Technologie	68
5.5.1	Technologie-Tabelle	70
5.5.2	Technologie-Matrix	70
5.5.3	Technologie-Kennzahlen	72
5.6	Kennzahlenberechnung zur Auswahl der optimalen Produktvariante	75
6	Computerunterstützung für die Anwendung der ZVF	79
6.1	Vorgehensweise zur Entwicklung von CoVaFind.....	79
6.2	Systemanforderungsanalyse für CoVaFind.....	80
6.3	Entwicklung von CoVaFind	82
6.3.1	Konzept der Softwarearchitektur.....	82
6.3.2	Datenbanksystem	84
6.3.3	Integrationsplan	86
6.3.4	Entwurf der Softwareoberflächen.....	88
6.4	Systemtest	90
7	Fallstudie: Entwicklung eines Wirbelstromsensors.....	96
7.1	Bauteilbeschreibung des Wirbelstromsensors	97
7.2	Definition der Produktvarianten des Wirbelstromsensors.....	99
7.3	Beurteilung des Designs des Wirbelstromsensors.....	104
7.4	Beurteilung der Technologie des Wirbelstromsensors	107
7.5	Auswahl der optimalen Produktvariante.....	111
7.6	Vergleich Sensorentwicklung - Fallstudie.....	112
8	Diskussion der Ergebnisse	114
9	Zusammenfassung und Ausblick	116
10	Literaturverzeichnis	118

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
<i>BL</i>	Blindleistung
CE	Concurrent Engineering
CSE	Concurrent Simultaneous Engineering
CoVaFind	Computerunterstützte Varianten-Findung
CMOS	Complementary Metal Oxide Silicon
D_i	Design-Kennzahl
DNY_{jLWi}	Design-Teilkennzahl
dRAM	Dynamic Random Access Memory
D_{Si}	Design-Teilkennzahl (aufsummiert aus einer Simulation)
ECAx	Electrical Computer Aided Methods
EW_i	Eingangswert Simulation
FEM	Finite Elemente Methode
<i>FL</i>	Fehlleistung
g_i	Merkmalspez. Gewicht mit i = Leistungsmerkmal
K_{bt}	Bauteilkennzahlen
K_{fix}	Kosten (fest)
KPE	Kooperatives Produktengineering
K_M	Komplexität (nur betrachtet bei Maskenschritten)
K_{Mi}	Komplexität (Maskenschritt)
$K_{variabel}$	Kosten (variabel)
K_w	Werkstoffkennzahlen
<i>KZI</i>	Kundenzufriedenheitsindex
LW_i	Leistungswert Simulation
LIGA	Lithographie, Galvanoformung, Abformung
MCAx	Mechanical Computer Aided Methods
<i>NL</i>	Nutzleistung
NY_{jLWi}	Normiertes Simulationsergebnis
PMMA	Polymethylmethacrylat
<i>R</i>	Reifegrad
R_{Ri}	Reifegrad (Prozessschritt)
S_{EW_i}	Spezifikationswert (Eingangswert Simulation)
S_{LW_i}	Spezifikationswert (Leistungswert Simulation)

S	Teilkennzahl Schwierigkeitsgrad
Si	Silizium
S_{si}	Schwierigkeitsgrad Prozessschritt
S	Aufsummierte Teilkennzahl pro Produktvariante (Schwierigkeitsgrad)
STL	Stützleistung
T_i	Technologie-Kennzahl
W_{LWi}	Wertigkeit (Leistungswert)
W_{Mi}	Wertigkeit (Maskenschritt Technologie)
W_P	Prozesswirkungsgrad
W_{Ri}	Wertigkeit (Reifegrad Technologie)
W_{si}	Wertigkeit (Prozessschritt Technologie)
X_{jLWi}	Simulationswert
Y_{jLWi}	Simulationsergebnis
Z	Merkmalsspez. Zufriedenheitsurteil
ZVF	Zielorientierte Varianten-Findung

1 Einleitung

Unternehmen unterliegen heute einem hohen Wettbewerbsdruck, denn umfassende und anspruchsvolle Kundenanforderungen bedingen den Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt. Da die Markt- und Wettbewerbsumfelder dynamisch sind, gehören lange Produktlebenszyklen der Vergangenheit an. Aus diesem Grund finden systematische Vorgehensweisen zur Unterstützung von Innovationen und zur Absicherung des Markterfolges immer mehr Beachtung [LIN01]. Um in Zukunft erfolgreich zu sein, müssen innovative Produkte in immer kürzeren Zeitabständen entstehen [GIS99, ZE100]. Im Hochtechnologiebereich, zu dem die Mikrotechnologie zählt, zeichnen sich die Innovationsläufe der Produkte ebenfalls durch eine hohe Dynamik aus [PEL03]. Der Produktentwurf ist dabei ausschlaggebend und steht in direktem Zusammenhang mit den Fertigungsverfahren. Für die Herstellung dieser Produkte sind beispielsweise unterschiedliche Verfahren aus der Dünnfilmtchnik wie Beschichtungstechnik, Ätztechnik und Photolithografie im Einsatz, um einzelne Elemente oder Strukturen der Produkte zu fertigen [GER97].

Mikrotechnische Produkte haben in nahezu allen Bereichen technischer Applikationen Einzug gehalten. Um den Bedarf an mikrosystemtechnischen Komponenten zu erfüllen, reichen konventionelle Vorgehensweisen der Produktentwicklung nicht aus [KAS00]. Es besteht der Wunsch nach einer optimierten Methode, um spezielle Entwicklungsschritte auf Grund der Besonderheiten der Mikrotechnologie bzgl. des Designs und der Technologie berücksichtigen zu können [FIS00]. Damit gewinnt eine verbesserte Produktentstehung immer mehr an Bedeutung. Gezielte Methoden kommen bisher nur selten zum Einsatz. Obwohl Unternehmen sich der Bedeutung von Techniken und Methoden zur Unterstützung der Unternehmensabläufe bewusst sind, lassen Umfragen erkennen, dass viele kleinere und mittelgroße Unternehmen Defizite in der Anwendung von beispielsweise Qualitätsmanagement-Methoden haben [PFE99].

Ziel ist es zur Unterstützung der Realisierung mikrotechnischer Produkte mehrere Varianten hinsichtlich des Produkt-Designs und der Produkt-Technologie zu analysieren und mittels Formblättern (Matrizen) sowie mit Kennzahlen zu bewerten. Es ist notwendig eine optimale Lösung aus Anforderungen an das Design und an die Fertigungstechnologien zu finden, um einen geeigneten Entwurf auswählen zu können. Die mikrotechnische Produktentstehung kann im Rahmen eines Concurrent Engineering-Umfeldes stattfinden, da eine enge Verzahnung zwischen Produktentwurf und der zur Herstellung des Produktes eingesetzten Prozesse zu beachten ist. Weitere Ziele dieser Arbeit sind die computergestützte Umsetzung der Methode und ihre Validierung im Rahmen einer Fallstudie. Als Anwendungsbeispiel dient die Entwicklung eines Wirbelstromsensors.

2 Stand der Kenntnisse

Der Entstehungsprozess von mikrotechnischen Produkten ist geprägt durch eine starke Abhängigkeit von Entwurfs- und Fertigungsaspekten. Wie in kaum einem anderen Produktbereich ist es deshalb notwendig, eine vernetzte Entwicklung des Produktes und der zu seiner Herstellung notwendigen Fertigungsverfahren durchzuführen. Aus diesem Grund spielen beim Produktentstehungsprozess eine Reihe von Bereichen eine Rolle. Einer ist das mikrotechnische Produkt und seine Besonderheiten. Die Fertigung der mikrotechnischen Erzeugnisse läuft wie folgt ab: Auf einem Wafer entstehen im Nutzen viele gleiche Bauteile, die aus strukturierten, übereinander angeordneten Einzelschichten bestehen.

Der Stand der Kenntnisse liefert einen Überblick über die Bedeutung der Mikrotechnik und die Besonderheiten ihrer Produkte. Bei makroskopischen Produkten wurde der Nutzen von entwicklungsbegleitenden Systemen schon lange erkannt. Daher werden Strategien und Methoden wie Concurrent Engineering (CE), Total Quality Management (TQM), Quality Function Deployment (QFD) und Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) zur Verbesserung der Produktentstehung vorgestellt. Um die Entstehung von mikrotechnischen Produkten optimal unterstützen zu können, wurden Entwurfssysteme wie z.B. von IntelliSuiteTM geschaffen. Diese Systeme werden mit Focus auf Entwurfs- und Fertigungsaspekte erläutert. Abschließend zeigen das rechnerunterstützte Datenmanagement sowie der Einsatz von Kennzahlen weitere Unterstützungsmöglichkeiten für die Produktentstehung.

2.1 Mikrotechnische Produkte

Die Mikrosystemtechnik hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Sie ist zu einer Querschnittstechnologie geworden, die unterschiedliche Materialien, Komponenten und Basistechnologien (z.B. Mikroelektronik, Optik oder Bio- und Nanotechnologien) in Gesamtsystemen integriert. Lyshevski erläutert, dass es in mikrotechnischen Anwendungen wie z.B. in der Datenperipherie, der Kommunikations- oder Automobiltechnik darum geht, mit höchster Präzision Dinge zu bewegen, Funktionen zu schalten und Mengen zu messen. Zur Einordnung der Mikrotechnologie in die Bereiche des aktuellen Technologieverständnisses bietet Lyshevski folgende Unterteilung von elektromechanischen Systemen: In konventionelle elektromechanische Systeme, in Mikro-Electro-mechanical Systems (MEMS) und in Nano-Electro-mechanical Systems (NEMS) [LYS01].

2.1.1 Bedeutung der Mikrotechnologie

Als langfristiger Trend zeigt sich, dass sich der Markt und die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Mikrosystemtechnik dynamisch entwickeln und in den nächsten Jahren noch deutlich wachsen werden. Aktuell sind die Mikrosystemtechnik-Märkte – wie andere Industriezweige auch – von einer konjunkturellen Schwäche betroffen. Dies zeigt sich z.B. darin, dass zwischen 2001 und 2002 die Umsätze für MEMS-Komponenten nur um 4,4 % stiegen [STE04]. Grund dafür waren

vor allem teils massiv gesunkene Preise. Vor dem Hintergrund einer angespannteren Marktsituation kam es auch zu einem deutlichen Rückgang von Venture Capital Engagements, einzelne Herstellerfirmen mussten aus dem Markt aussteigen. Trotz der damaligen Konjunkturflaute sind am MEMS-Markt zwischen 2001 und 2002 gleichzeitig die umgesetzten Stückzahlen um 47,6 % angestiegen. Dies ist ein Indiz für einen grundsätzlich hohen Bedarf von diversen Anwenderindustrien. Die Nutzer wissen die Vorteile der Mikrosystemtechnik zu schätzen: Die Verbesserung bestehender Funktionen oder neue Funktionalitäten, Erhöhung der „Intelligenz“ von Produkten (Schaffung eines hohen Wertschöpfungspotenzials), Optimierung von Produktionsprozessen (Erhöhung der Effizienz), Produktion hoher Stückzahlen (Preisvorteile) sowie eine verbesserte Steuerungspräzision und Zuverlässigkeit. Die genannten Vorteile zeigen zusammengefasst weitere entscheidende Nutzen der Mikrosystemtechnik auf: Sie trägt zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz bei [STE04].

Bild 2.1 zeigt die ökonomische Bedeutung der Mikrosystemtechnik sowie die Anzahl der Beschäftigten in den entsprechenden Anwenderbranchen. Der Weltmarkt für einzelne, heute bereits vorhandene MEMS-Komponenten wuchs von ca. 2,9 Mrd. US \$ (1996) über 3,2 Mrd. US \$ (2000) auf 3,9 Mrd. US \$ (2002). Bis 2007 wird für diesen Produktbereich ein Anstieg auf 8,3 Mrd. US \$ erwartet. Damit beträgt in der Zeitspanne 2002 bis 2007 die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate knapp 16 %. Für die Stückzahlen ist ein höheres Wachstum anzusetzen: Von ca. 1 Mrd. Einheiten (2002) auf 3,3 Mrd. Einheiten (2007) mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von ca. 26 %. Gegenwärtig sind ca. zwei Drittel der Umsätze dem Bereich der Sensorik zu zurechnen. Beispiele sind hier Beschleunigungsmesser, Gyroskope und Drucksensoren. Mit weiterem Preisverfall wird zukünftig das Spektrum der Anwendungen z.B. im Bereich Konsumeranwendungen oder Weiße Ware/Haushalt noch erweitert. Für das Marktsegment der Drehratensensoren wird mit einem Wachstum von ca. 279 Mio. US \$ (2002) auf 396 Mio. US \$ (2007) gerechnet. Dieser Anstieg lässt sich vor allem mit der Substitution etablierter, d.h. nicht-MEMS-basierter Lösungen erklären. Die Anzahl marktrelevanter Sensortypen steigt inzwischen ständig. Beispiele hierfür sind Sensoren für chemische, biologische und biometrische Messgrößen sowie für Infrarot oder Ultraschall [STE04]. Ferner werden ca. 40 % des Umsatzes am MEMS-Komponentenmarkt durch Komponenten erzielt, die nicht aus dem Bereich der Sensorik kommen. Dazu zählen beispielsweise Aktoren wie Mikromotoren, -pumpen, -düsen, -ventile und -spiegel (z.B. für optische Netzwerke), aber auch miniaturisierte Mikrofone sowie Bio-Chips. Bedingt durch eine höhere Komplexität sind für diese Komponenten am Markt insgesamt im Schnitt deutlich höhere Stückpreise zu erzielen als für MEMS-Sensoren (Prognose ca. 50 % des Marktumsatzes ab 2005) [STE04].

Marktanalysen zu Mikrosystemen beachten nicht nur MEMS-Komponenten, sie beziehen auch Produktionsprozesse und die Systemintegration ein. Von zentraler Bedeutung sind Untersuchungen von „The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems“ (NEXUS).

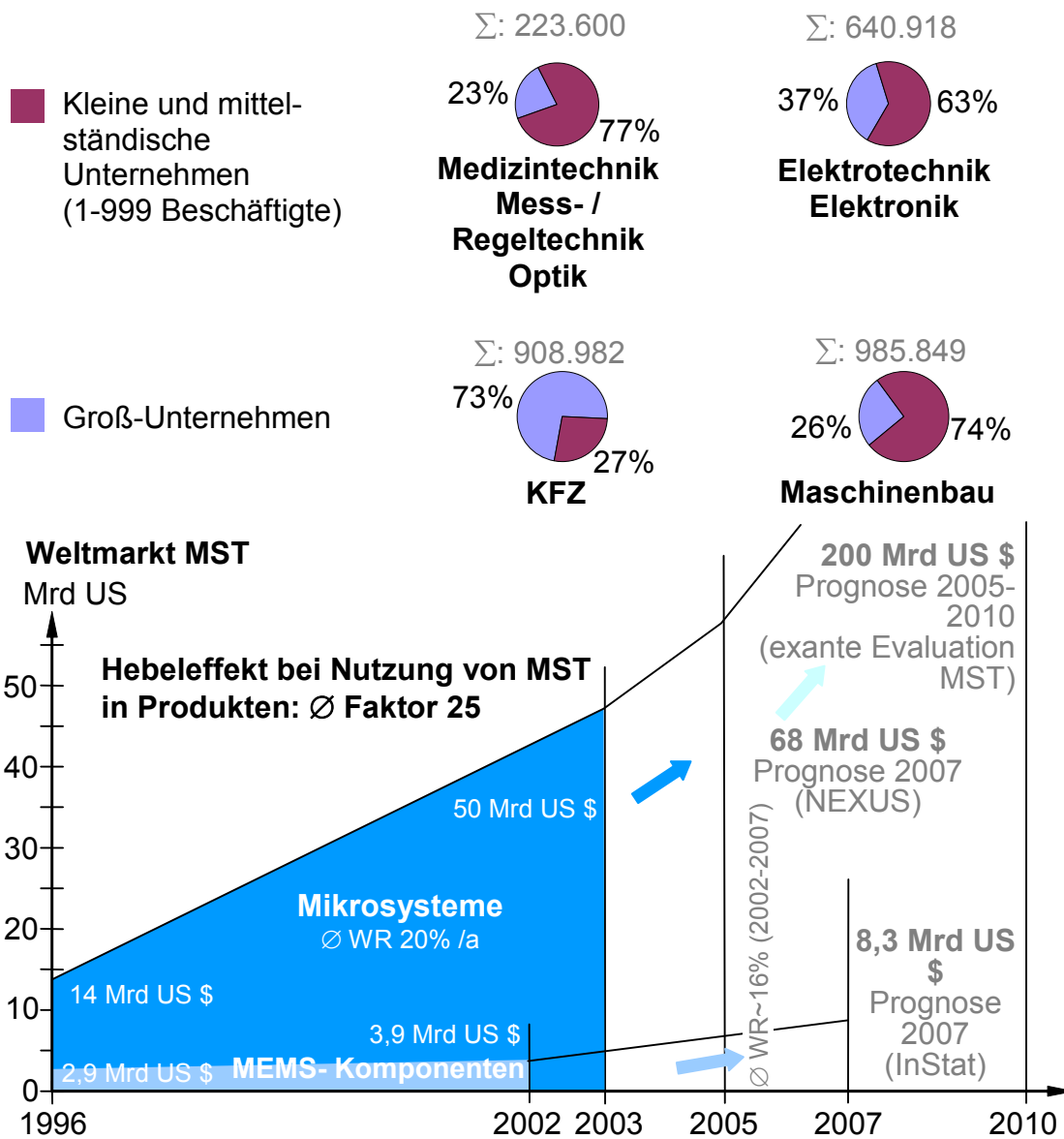


Bild 2.1: Ökonomische Bedeutung der Mikrosystemtechnik [STE04]

Nexus erläutert dazu, welche Produkte berücksichtigt werden: „...that are microstructured in design including all monolithic and hybrid components and silicon-based devices as well as micromachined products fabricated in plastics or metals“ [NEX02]. Damit bezieht NEXUS entgegen anderer Marktanalysen ein weiteres Spektrum an Produktionstechnologien ein. In einer älteren Studie (NEXUS 1998) wird für das Gesamtvolumen des Mikrosystemtechnik-Marktes ein Wert von rund 14 Mrd. US\$ im Jahr 1996 festgestellt. Die aktuelle Studie prognostiziert für den Weltmarkt ein Wachstum von 30 Mrd. US \$ (2000) bzw. ca. 50 Mrd. US \$ (2003) auf insgesamt ca. 68 Mrd. US \$ im Jahr 2005 [NEX02]. Das durchschnittliche Wachstum der Märkte wird auf ca. 20 % p.a. geschätzt. Bedeutende Anwendungsfelder laut NEXUS-Studie sind: IT-Peripherie (Druckköpfe für Tintenstrahldrucker, PC-Schreib-Lese-Köpfe, optische Maus), Biomedizin (Bio-Chips, Fingerprint-Sensoren, ...), Medizintechnik

(Herzschrittmacher, Hörgeräte, Teststreifen für In-vitro-Diagnostika, ...) und Automotive (Sensoren, Beschleunigungsmesser) [STE04]. Beispielsweise sind heute in einem Mittelklassewagen ca. 30 mikrotechnische Produkte als Drucksensoren, Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren im Einsatz. Ziel ihres Einsatzes ist erhöhte Sicherheit, bessere Betriebsökonomie und höherer Komfort [DET03].

Während einzelne MEMS-Komponenten und Mikrosysteme schon seit den siebziger Jahren auf dem Markt sind, begann eine umfassende Kommerzialisierung, mit Fokus auf Automobil- und Medizintechnik, erst mit Anfang der neunziger Jahre. Ferner waren die Bereiche IT-Peripherie sowie Luft- und Raumfahrt/Verteidigung von Interesse. In der jüngeren Vergangenheit haben Telekommunikation und Biotechnologie/Pharma an Bedeutung gewonnen. Es werden zukünftig neue Produkte, Anwendungen und Funktionalitäten entstehen. In einer „Vision 2010“ werden hier von NEXUS z.B. Smart-Cards, Wearable Computers, intelligente Textilien, Systeme im Kontext mit virtueller Realität, Mikrotherapie, künstliche Organe, Mikroroboter und intelligente Häuser genannt [STE04]. Der Weg in diese Zukunft wird durch Forschung geebnet. Auf europäischer Ebene, hier speziell in Deutschland und in der Schweiz, wird Mikrosystemtechnik zum Teil mit staatlicher Unterstützung erforscht und gefördert. An Forschungsinstituten wurde in den letzten Jahren bereits Entwicklungswissen in Theorie und Praxis gesammelt und für andere zugänglich gemacht. Die Industrie verweigert dagegen häufig eine Zusammenarbeit aus Wettbewerbsängsten. Fachtagungen sorgen dafür, dass Spezialisten aus Forschung, Lehre und Industrie sich untereinander austauschen [GRU00].

2.1.2 Besonderheiten bei mikrotechnischen Produkten

Bereits Anfang der neunziger Jahre beschreibt der Fachausschuss der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik die Mikrosystemtechnik wie folgt: „Mikrosystemtechnik ist der Überbegriff für die gemeinsame Verwendung verschiedener, mindestens zweier, Basistechnologien. Unter diesen Basistechnologien haben die Mikroelektronik, Mikromechanik und Mikrooptik einen hohen Reifegrad erreicht, der zu ihrer häufigen Anwendung in Mikrosystemen führt“ [VDE91]. Die Art der Anwendung des Mikrosystems erfolgt als Sensoren und/oder Aktoren, Komponenten zur Signalverarbeitung und optischen Subsystemen, die aus aufeinander aufbauenden Prozessfolgen hergestellt werden. Der Aufbau beinhaltet spezielle Entwicklungsschritte aus den oben genannten unterschiedlichen Basistechnologien sowie hoch entwickelter Aufbau- und Verbindungstechniken [FIS00, KAS00].

Mescheder stellt die Besonderheiten von mikrotechnischen Produkten auf Grund der Zusammensetzung des Wortes Mikrosystemtechnik aus den Bestandteilen Mikro, System und Technik dar. Die Mikrosystemtechnik beschäftigt sich demnach folglich mit Objekten, die in mindestens einer Dimension Abmessungen im Mikrometerbereich aufweisen ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) und aus vernetzten Komponenten bestehen, die im System mehr zu leisten vermögen als die Summe der Einzelkomponenten. Zusätzlich werden hier auch die Verfahren zur Herstellung von Mikro-

systemen berücksichtigt [MES00]. Pelka bezieht sich in erster Linie ebenfalls auf kleine Abmessungen, die bei einigen Komponenten zumindest in einer Dimension typischerweise im Mikrometerbereich liegen. Ferner enthalten mikrotechnische Produkte elektronische und nicht-elektronische Komponenten, Komponenten zur Signalverarbeitung und Regelung sowie z. T. weitere Komponenten, die von mechanischer, optischer, fluidischer oder akustischer Natur sind [PEL03]. Beim Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) ist folgende Definition zu finden: „Werden Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft, daß sie „empfinden“, „entscheiden“ und „reagieren“ können, spricht man von einem Mikrosystem. Hierbei ist entscheidend, daß die Funktionen eigenständig erfolgen. Sensoren entsprechen den menschlichen Sinnesorganen, die Signalverarbeitung entspricht dem Gehirn und die Aktoren den Gliedmaßen“ [BMB99].

Wie können mikrotechnische Produkte voneinander abgegrenzt werden? Senturia schlägt folgende Klassifizierung vor: Technologie-Demonstratoren, Forschungsobjekte und kommerzielle Produkte [SEN01]. Technologie-Demonstratoren sind Komponenten oder Systeme, die im Entwicklungsbereich zur Überprüfung von Bauteilkonzepten oder Herstellungsprozessen dienen. In dieser Kategorie sind nur geringe Stückzahlen notwendig, da die Komponenten nur Demonstrationszwecken dienen. Forschungsobjekte sind fast ausschließlich Komponenten, die für spezielle Aufgaben wie z.B. Messen eines Wertes von ausgewählten Materialeigenschaften geschaffen werden. Ihre Stückzahl ist abhängig von der jeweiligen Anwendung. Die dritte Kategorie sind kommerzielle Produkte, die Komponenten oder komplette Systeme in Bezug auf Fertigung und Verkauf verkörpern. Hier wird die erforderliche Stückzahl durch den Markt bestimmt [SEN01].

Die technologische Umsetzung der mikrotechnischen Produkte, bestehend aus einer Vielzahl von Komponenten, erfolgt mittels Dünnschichttechnik. Diese Prozesse beinhalten bestimmte Bearbeitungsverfahren (z.B. Schichtabscheidung), welche die entscheidenden Wirkparameter der gewünschten Produkteigenschaften erzeugen. Für die Entwicklung ist ausschlaggebend, dass auf einem einzigen Substrat, durch speziell geeignete Prozessschritte eine Vielzahl von Einzelelementen mit identischen Eigenschaften angefertigt werden. Dieses Verfahren wird als „Batch Processing“ oder als „Fertigung im Nutzen“ bezeichnet [GER97, SEN01]. Batch-Prozesse, bestehend aus dünnfilmtechnischen Fabrikationstechniken, bilden die Basis einer Reihe von Herstellungs-„Tools“ für Produkte aus dem Mikrobereich. Beispielsweise werden Lithografie-, Ätz-, additive Prozesstechniken, usw. für die technologische Umsetzung eines Produktes eingesetzt [MAD02].

Auf Grund hoher Komplexität und zunehmender Miniaturisierung kommt der Entwurfsphase von Mikrosystemen, im Vergleich zu herkömmlichen aus Maschinenbau und Feinwerktechnik, eine erheblich höhere Bedeutung zu. Im Entwurfsprozess müssen daher die spezifischen Bedingungen in Bezug auf Modellierung und Simulation beachtet werden, wobei aber immer der gesamte Entwurfsprozess in das methodische Vorgehen einfließen muss [GER97].

2.2 Produktentstehung – Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen einige Begriffe aus dem Bereich der Produktentstehung und dem Umfeld kurz erläutert werden. Die Bedeutung des Begriffes der Produktentwicklung ist auf Grund branchenspezifischer Unterschiede nicht eindeutig festgelegt. Produktentwicklung wird häufig synonym mit Produktentstehung verwendet, die ebenfalls nicht einheitlich definiert ist [KOM98]. Trotzdem herrscht weitgehende Übereinstimmung darin, dass während des Prozesses der Produktentwicklung neue oder verbesserte Produkte marktgerecht erarbeitet und bereitgestellt werden und so eine entscheidende Voraussetzung für einen Unternehmenserfolg geschaffen wird [KAM98, SPA01]. Da für die Entstehung von mikrotechnischen Produkten sowohl die Produkt- als auch die Prozessentwicklung zu betrachten sind, soll der Begriff Produktentstehung zum Ausdruck bringen, dass eine Betrachtung des Gesamtprozesses erfolgt.

In den Phasen der Produktentstehung kommen verschiedene Hilfsmittel wie z.B. Methoden, Strategien und Werkzeuge zur Unterstützung zum Einsatz. Methoden wirken strukturierend und fördern die Transparenz sowie die Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsergebnisse [SPA01]. Unter dem Begriff Methode versteht Berger „... ein Bündel aus Handlungsanweisungen und Hilfsmitteln zum Lösen von Problemen“ [BER98]. Müller beschreibt Methode als eine Menge von Vorschriften, die einen Prozess festlegen, der zu vollziehen ist, um ein angestrebtes Ziel zu erreichen [MÜL90]. Gausemeier gibt eine Definition des Begriffes Methode, die analog zu der von technischen Systemen ist: Während einer Produktentwicklung werden anhand verschiedener Methoden Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen transformiert (Bild 2.2) [GAU00].

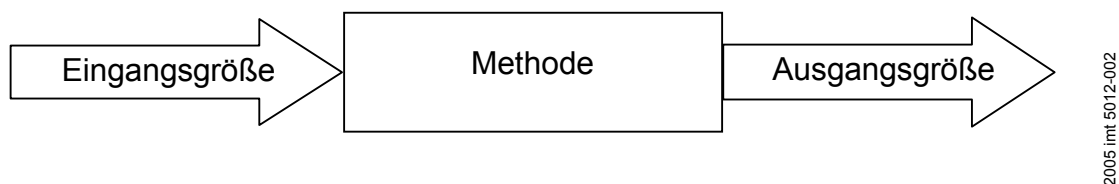


Bild 2.2: Methode zur Transformation von Eingangs- in Ausgangsgrößen

Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems sind beispielsweise Energien, Stoffe oder Signale. Ziel dabei ist es, bestimmte Funktionen zu realisieren. Zur Erfüllung dieser Funktionen existieren üblicherweise mehrere Lösungen, die Lösungsprinzipien. Eine Methode ist mit einem Lösungsprinzip vergleichbar. Daher kann man sagen, dass auch eine Methode die Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen umwandelt und damit die gewollte Funktion erfüllt.

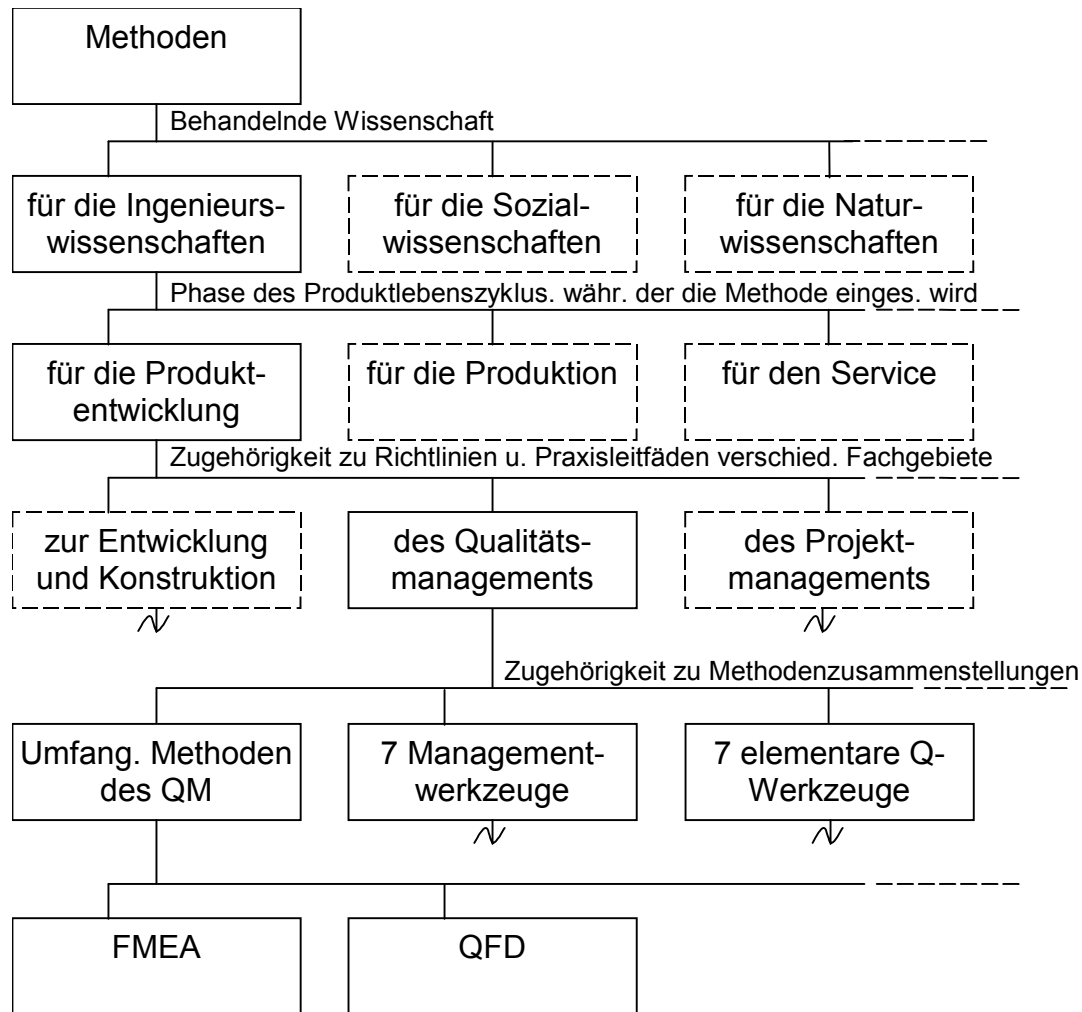
Im Gegensatz zur Methode, die auf die Anwendung einer Vorgehensweise bezogen ist, strebt die Strategie ein bestimmtes Ziel an. Beispielsweise zeigt die Strategie in der Unternehmensführung auf, wie ein mittelfristiges (ca. 2 - 4 Jahre) oder langfristiges (ca. 4 - 8 Jahre) Unternehmensziel erreicht werden kann. Die

Unternehmensstrategie wird von der Vision und dem Leitbild des Unternehmens abgeleitet und kann in Teilstrategien untergliedert werden [NET04]. Anders verhält sich ein Werkzeug als ein System, das aus physikalischen Komponenten und/oder Informationen besteht, dessen Anwendung eine bestimmte Arbeit erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht. Das Werkzeug ist dabei im Gegensatz zur Maschine nicht unabhängig einsetzbar. Es erfüllt seinen Zweck nur im Rahmen seiner Handhabung durch einen Menschen oder als Komponente innerhalb einer Maschine bzw. eines Apparates [NET04].

Bei der Produktentwicklung entstehen häufig mehrere Produktvarianten. In diesem Zusammenhang ist der Begriff der Variantenbildung von den folgenden zwei Definitionen geprägt: „Varianten weichen in verschiedenen Ebenen eines gesamtheitlichen, strukturierten Systems oder Konzepts voneinander ab. Für jede Aufgabe gibt es generell mehrere Lösungsvarianten“ [DAE99]. Mehrere Varianten, die verschiedene Lösungen für das zu entwickelnde Produkt darstellen, werden als Lösungsvarianten bezeichnet. Dementsprechend bietet die Variantenbildung die Möglichkeit, sich gezielt einen Überblick über möglichst viele Lösungsvarianten zu verschaffen, um dann die beste auswählen zu können [RAU97]. „Varianten-Findung“ soll im Rahmen dieser Arbeit den Prozess der Entstehung von mehreren Lösungen eines Produktes bezeichnen. Hier ist vor allem eine Abgrenzung zu dem Begriff Produktfamilie zu sehen. Eine Produktfamilie fasst mehrere Produkte zu einer Gruppe zusammen. Die Produkte sind dabei in ihren Anwendungen und Ausführungen sehr ähnlich, aber jedes für sich hat einen eigenen Aufgabenbereich.

2.3 Produktentstehung makroskopischer Erzeugnisse – Methoden, Strategien und Werkzeuge

Dieser Abschnitt stellt verschiedene Methoden, Strategien und Werkzeuge vor, die bei der Produktentstehung makroskopischer Erzeugnisse von Bedeutung sind. Heute sind bereits standardmäßig Vorgehensweisen der vernetzten Entwicklung, wie z.B. das Concurrent Engineering, im Einsatz. Aktuell geht die Entwicklung von unterstützenden Ansätzen weiter, beispielsweise in Richtung Kooperatives Produktengineering von Gausemeier. Alle Strategien, Methoden oder Werkzeuge sind dabei der Qualität als zentrales Ziel unterzuordnen. Daher wird in diesem Zusammenhang das Total Quality Management als umfassender Ansatz näher erläutert. Die Methoden für die Produktentwicklung lassen sich klassifizieren. Nach einer Unterteilung für die jeweilige behandelnde Wissenschaft erfolgt eine Gliederung in Methodenklassen wie z.B. Ingenieurwissenschaften oder Sozialwissenschaften [DOB02]. Phasen in denen Methoden für die Produktentwicklung zum Einsatz kommen sind Produktentstehung, Produktion oder Service (Bild 2.3).



2005 int 5012-003

Bild 2.3: Eingrenzung und Klassifizierung der Methoden für die Produktentwicklung [nach DOB02]

Der Produktentwicklung gehören einerseits Richtlinien zur Entwicklung und Konstruktion des Produktes z. B. Methoden zur Analyse und Zielvorgabe oder Methoden zur Entwicklung von Lösungsideen [VDI93] und andererseits Methoden des Qualitätsmanagements (7M-Methode oder Q7-Qualitätswerkzeuge) [KAM03] sowie Methoden des Projektmanagements z.B. Methoden zur Projektdefinition oder zur Projektplanung [BUR02] an. Methoden des Qualitätsmanagements wie z.B. Quality Function Deployment (QFD), Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), Computer-Aided Design (CAD), Design for Manufacturing (DFM), Design for Assembly (DFA) und Design Review (DR) unterstützen das systematische Vorgehen und bewirken, dass nachvollziehbare und wieder verwertbare Ergebnisse erlangt werden. Sie sind ein formalisierter Ausgangspunkt der Problemlösung, um von einer gegebenen Anfangssituation zu einer gewünschten Zielsituation zu kommen [WEB02].

Viele der Methoden ähneln einander in einzelnen Schritten. Fast alle Methoden haben als Ausgangsbasis eine Aufgabenstellung. Daran schließt sich als zweite Phase die Aufgabenformulierung mit ersten Planungen an, gefolgt von der dritten

Phase, die Konzipieren, Prinzipien-Finden sowie Funktionen-Synthetisieren und Entwickeln beinhaltet. Die nächste Phase dient dem Gestalten, dem Entwerfen und der qualitativen Synthese. Einen Überblick über Einsatzfelder und Aufwand von verschiedenen Methoden zeigt Tabelle 2.1. Hier sind Benchmarking, Quality Function Deployment, Design Review, Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, Design of Experiments, Prozesskostenrechnung und Wertanalyse dargestellt. Sie repräsentieren nur einen Teil aus einer Vielzahl von Möglichkeiten. Diese Methoden werden zu unterschiedlichen Entwicklungsphasen in der Produktentwicklung eingesetzt. Ihr gemeinsamer Ansatz ist die Erfassung und Konkretisierung der Qualitätsanforderungen. Durch die Anwendung der Methoden werden Abweichungen bei der schrittweisen Konkretisierung von Qualitätsanforderungen identifiziert.

Tabelle 2.1: Einsatzfelder und Aufwand von Methoden zur Unterstützung der Produktentwicklung nach Schmalzl [SCH98]

Methoden	Produkt- planung	Produkt- entwick- lung	Prozess- entwick- lung	Zeitl. Aufwand z. Durchf. d. Methode
Benchmarking	a	a	a	x
Quality Function Deployment	a	a	a	xx
Design Review		a	a	xx
Fehlermöglichk. - u. Einflussanal.		a	a	xx
Design of Experiments		a	a	xx
Prozesskostenrechnung	b	a		x
Wertanalyse	a	a	b	xx

(a = primäre Einsatzfelder; b = sekundäre Einsatzfelder. Aufwand: x = gering, xx= mittel, xxx = hoch)

Gut erkennbar ist, dass die Methoden nur bedingt in der Produktplanung, jedoch vollständig in der Produktentwicklung und annähernd komplett für die Prozessentwicklung verwendet werden können. Benchmarking und Quality Function Deployment sind dabei die einzigen Methoden, die in allen drei Bereichen einsetzbar sind. Benchmarking hat nur bewertenden Charakter, während Quality Function Deployment zusätzlich auch Lösungswege aufzeigt. Laut Schmalzl verursacht der Gebrauch solcher Methoden einen mittleren zeitlichen Aufwand [SCH98]. In der Praxis zeigt sich aber häufig, dass vor allem für die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse der Aufwand eher als sehr hoch einzustufen ist. Es existiert noch ein weitaus größeres Spektrum an Methoden und Vorgehensweisen, die aber hier nicht von Bedeutung sind. Beispielsweise ist die Statistische Prozessregelung im Produktlebenszyklus der Produktion zugeordnet und kommt somit für Überlegungen der Produktentwicklung nicht in Betracht. Weitere Methoden

sorgen für ein besseres Verständnis für das Verhalten von Prozessen, Produkten, Mechanismen, u. a., um diese daraufhin optimal gestalten zu können [WEB02]. Dagegen werden Strategien, wie beispielsweise das Concurrent Engineering, eher ganzheitlich eingesetzt. Concurrent Engineering ist darauf ausgerichtet, den Produktentwicklungsprozess und das Produkt kontinuierlich zu analysieren und frühzeitig Fehler zu vermeiden.

2.3.1 Concurrent Engineering (CE) als Entwicklungsstrategie für die Produktentstehung

Charakteristisch für integrierte Mikrosysteme sind starke Wechselwirkungen der Komponenten und Subkomponenten, die eine interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Entwicklung wie z.B. das Concurrent Engineering verlangen [MEH00]. Vor ca. zwei Jahrzehnten war vornehmlich der Begriff Simultaneous Engineering (SE) zu finden. Dies ist eine ältere Bezeichnung für den gleichen Prozess. Hauptziel von Concurrent Engineering ist eine bedeutende Verkürzung der Markteinführungszeit für ein neues, prinzipiell besseres Produkt [GAT98]. Durch eine vernetzte Produkt- und Prozessentwicklung steht, neben den zu berücksichtigenden Kundenwünschen, die Fertigbarkeit im Vordergrund. Bereits 1987 erläuterte Canty wie folgt Simultaneous Engineering: „Simultaneous Engineering is both a philosophy and an environment. As a philosophy, SE is based on each individual's recognition of his/her own responsibility for quality of the product. As an environment, it based on the parallel design of the product and the processes that affect it throughout its life-cycle“ [CAN87]. Ein Jahr später (1988) entwickelte das US Department of Defence in Zusammenarbeit mit der US Rüstungsindustrie ein Concurrent Engineering-Programm: „Concurrent Engineering: A systematic approach to the integrated, concurrent design of products and their related processes, including manufacture and support. This approach is intended to cause the developers, from the outset, to consider all the elements of the product life cycle from conception through disposal, including quality, cost, schedule and user requirements“ [WIN88]. 1993 gibt Parsaei die folgende Definition: „... Concurrent Engineering (CE) has been recently recognized as a viable approach in which the simultaneous design of a product and all its related processes in a manufacturing system are taken into consideration, ensuring required matching of the product's structural with functional requirements and associated manufacturing implications“ [PAR93]. Lincke zeigt ebenfalls, dass der Begriff Concurrent Engineering häufig in der Raumfahrtindustrie und im militärischen Anwendungsbereich Verwendung findet [LIN95].

In der Automobilindustrie wird der Begriff „Simultaneous Engineering“ synonym zu Concurrent Engineering benutzt [GAU00]. Beispielhaft soll hier Eversheim genannt werden, der den Begriff Simultaneous Engineering verwendet und wie folgt definiert: „Simultaneous Engineering ist die integrierte und zeitparallele Abwicklung der Produkt- und Prozeßgestaltung mit dem Ziel, die Frist von der Produktidee bis zur Einführung des Produktes („Time to Market“) zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu verringern und die Produktqualität im umfassenden Sinn zu verbessern!“ [EVE95].

In dieser Arbeit soll für die weitere Betrachtung von Anwendungen, zeitlichen Aspekten, usw., ausschließlich der Begriff Concurrent Engineering und nicht Simultaneous Engineering benutzt werden. Für seinen Gebrauch wurden sowohl technische, als auch organisatorische Schnittstellen zwischen einzelnen Unternehmen oder zwischen den Abteilungen eines Unternehmens geschaffen. Dadurch ist es möglich, dass einzelne Bauteile eines Produktes schon in der frühen Phase der Produktentwicklung aufeinander abgestimmt werden können [OEH96]. In diesem Abschnitt beschränkt sich Concurrent Engineering nicht nur auf die eigentliche Entwicklungsphase der Produktentstehung. Der gesamte Prozess wird berücksichtigt – beginnend mit der ersten Idee für das Produkt über seine Fertigung bis hin zu seinem Markteintritt. Hierbei wird Concurrent Engineering durch verschiedene Methoden und Werkzeuge wie z.B. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Design for Assembly (DFA), Design of Manufacturing (DFM) oder Controlled Concept Convergence (Con Con) unterstützt [MED97, LIN95]. Durch den Einsatz des Concurrent Engineerings ergeben sich einige Vorteile für den Produktentstehungsprozess, die von einigen grundsätzlichen Bedingungen abhängen [CLA04]:

1. Start all tasks as early as possible.
2. Utilize all relevant information as early as possible.
3. Empower individuals and teams to participate in defining the objectives of their work.
4. Achieve operational understanding for all relevant information.
5. Adhere to decisions and utilize all previous relevant work.
6. Make decisions in a single trade-off space; that is, treat design, production, and field support as a single system within which trade-offs can be made.
7. Make lasting decisions, overcoming a natural tendency to be quick and novel.
8. Develop trust among teammates.
9. Strive for team consensus.
10. Use a visible concurrent process.

Die Aufzählung der Bedingungen wirkt auf den ersten Blick nicht ungewöhnlich. Vergleicht man sie jedoch mit dem klassischen Entwicklungsablauf, bei dem ausschließlich von einander klar gegliederte, sequentielle Schritte abgearbeitet werden, so sind hier andere Ansätze zu erkennen. Beispielsweise zeigt Bedingung Nr. 1, dass Aufgaben so früh wie möglich zu starten sind und nicht erst, wenn sie als Schritt in einer Reihenfolge erforderlich sind. Ferner spielt auch die soziale Komponente der Teamarbeit eine entscheidende Rolle. Für eine gute Teamarbeit muss zwischen den Teammitgliedern Vertrauen aufgebaut werden. Dieses und weitere soft

skills werden in der klassischen Entwicklung nicht berücksichtigt [CLA04]. Den Vorteilen stehen auch einige Nachteile wie z.B. ein anfängliches „Chaos“ durch viele gleichzeitig laufende Maßnahmen gegenüber.

Wie aus den oben dargestellten Ausführungen zu erkennen ist, spielt die Zeit beim Concurrent Engineering eine ausschlaggebende Rolle. Bild 2.4 zeigt einen Soll/Ist-Plan der Entwicklungsphasen in Abhängigkeit von der Zeit von „Innovative Prozesse und Bauweisen für Elektronik- und verwandte mikrotechnische Produkte“ (PRONova). Die Einteilung erfolgt in die Phasen System-Analyse & Spezifikation, System-Design, Verifikation & Iteration sowie System-Test & Dokumentation.

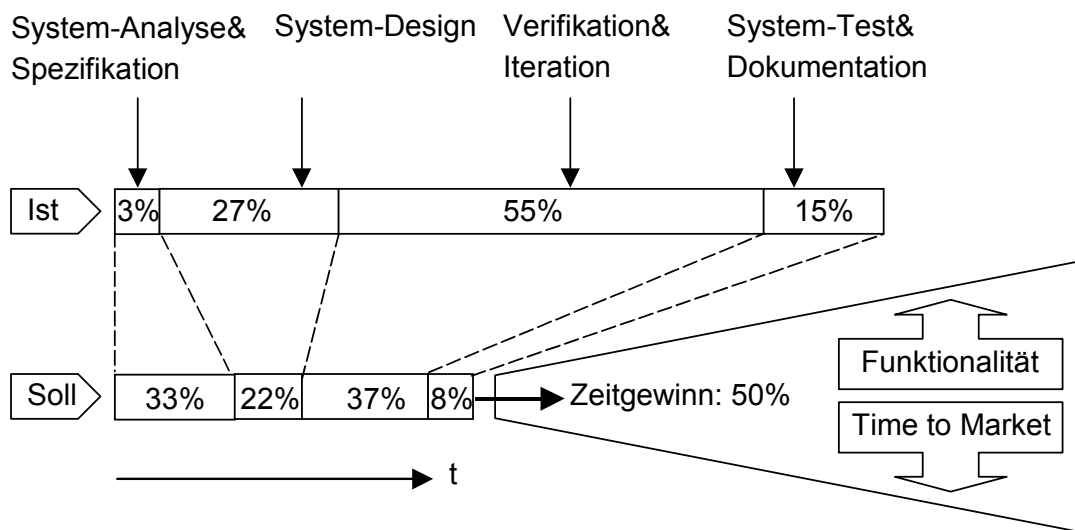


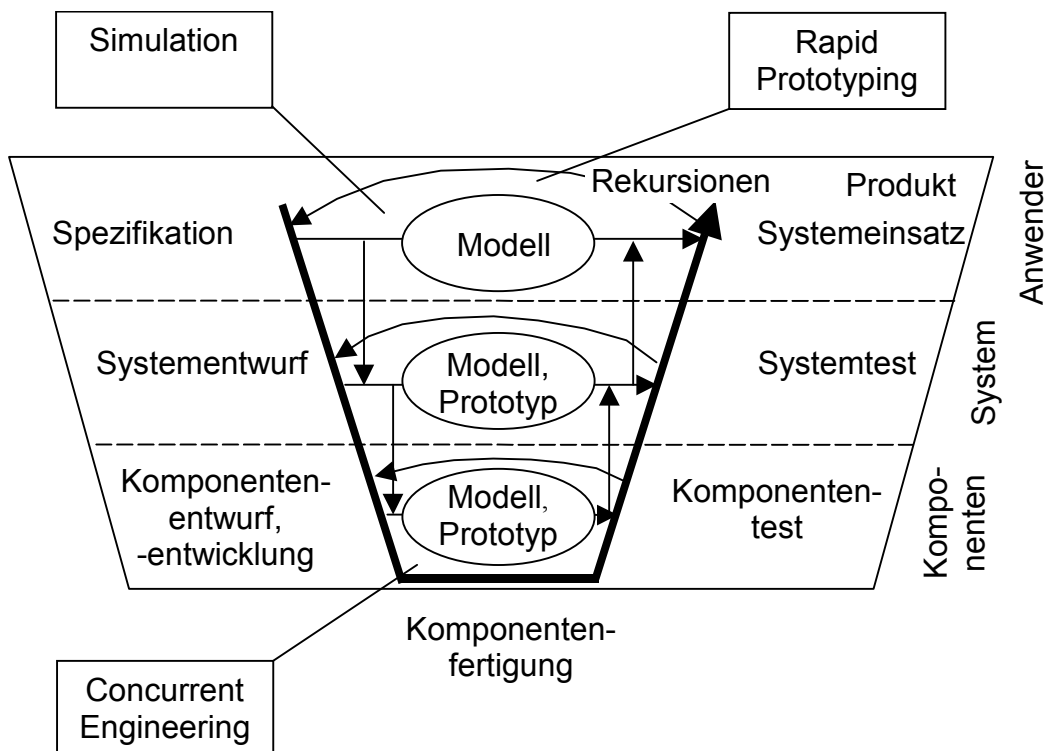
Bild 2.4: Zeitgewinn der Produktentwicklung durch Neugestaltung der Produktentstehung [PRO99]

Innerhalb einer firmenübergreifenden Analyse der Entwicklungszeiten komplexer Systeme aus der Telekommunikation wird demonstriert, dass heute auf Grund notwendiger Redesigns die Phase „Verifikation&Iteration“ 55% der Produktentwicklungszeit in Anspruch nimmt. Um die Produkte der kommenden Generationen bei gesteigerter Funktionalität und reduzierter Time to Market entwickeln zu können, muss die Prozesskette der Produktentstehung neu gestaltet werden [PRO99]. Es ist zu erkennen, dass bei einem angestrebten Zeitgewinn von 50% künftig erheblich mehr Zeit in den Beginn der Produktentstehung investiert werden muss, wodurch der Zeitbedarf der anderen Phasen gesenkt wird.

Die vernetzte Produkt- und Prozessentwicklung beim Concurrent Engineering wird hier deutlich: Angeregt durch Technologiesprünge wie z.B. Miniaturisierung oder höhere Datenraten werden die Systemkomponenten zunehmend funktionell verkoppelt, d.h. sie lassen sich nicht mehr isoliert entwickeln und optimieren. Daher soll das Systemdesign ganzheitlich erfolgen: Bisher getrennte Design-Disziplinen wie Electrical Computer Aided Methods (ECAx) und Mechanical Computer Aided

Methods (MCAX) müssen stärker vernetzt und die jeweils nachgeschalteten Prozesse vermehrt berücksichtigt werden. Um Redesigns zu vermeiden, benötigen Systemdesigner exakte und vollständige Spezifikationen sowie funktionale Modelle zur Systemsimulation [PRO99].

Sowohl Simulation, Rapid Prototyping als auch Concurrent Engineering kommen im „V-Modell“ zum Einsatz (Bild 2.5). In ihm sind die Zusammenhänge der Phasen der Produktentstehung dargestellt.



2005 Int 5012-005

Bild 2.5: V-Modell

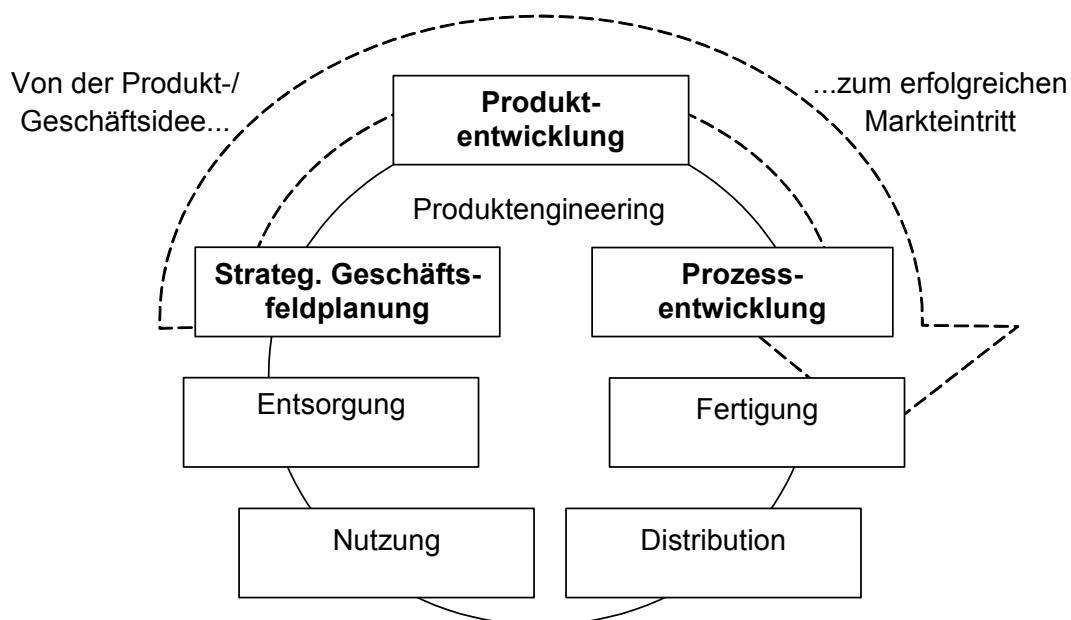
Die einzelnen Schritte, die im V-Modell durchlaufen werden und ein Produkt entstehen lassen, sind: Spezifikation, Entwurf von System und Komponenten sowie Komponentenentwicklung, gefolgt von Komponentenfertigung und ihren Tests, Systemtest und letztlich der Systemeinsatz. Die Modellbildung erfolgt auf Anwender-, System- und Komponentenebene und ist im Sinne der Ganzheitlichkeit vertikal und horizontal vernetzt. Simulation, Rapid Prototyping und Concurrent Engineering ermöglichen kurze Rekursionen und eine schnelle Modellverifizierung.

Einige wesentliche Aktionsfelder lassen sich aus dem V-Modell ableiten: Strategische Produktplanung basierend auf belastbaren Marktanalysen, Technologie-Roadmaps sowie ein umfassendes Innovationsmanagement. Außerdem sind Modellierungs- und Simulationsmethoden für ein ganzheitliches Systemdesign, Werkzeuge für Abstraktionen und Systemreduktionen mit den notwendigen funktionalen Beschreibungssprachen sowie neue Methoden zur verbesserten Systemanalyse und -spezifikation zu sehen. Letztlich können Qualitätskriterien und

Werkzeuge zur Überprüfung sowie ein durchgängiges Produktdatenmanagement über den gesamten Lebenszyklus des Produkts hinweg zum Einsatz kommen [PRO99].

Aktuelle Entwicklungstrends

Die rasante Entwicklung von Technologien, Informations- und Kommunikationstechniken bringt auf dem Weg zu Produkten der Zukunft neue bzw. erweiterte Vorgehensweisen hervor, darunter auch das bereits erwähnte Kooperative Produktengineering (KPE) von Gausemeier [GAU00]. Dies besteht aus den folgenden drei Kernbereichen: der strategischen Geschäftsfeldplanung, der Produktentwicklung und der Prozessentwicklung (Bild 2.6). Damit ergänzt Gausemeier die zwei Kernbereiche des Concurrent Engineering, Produktentwicklung und (Fertigungs-) Prozessentwicklung um den dritten Kernbereich Strategische Geschäftsfeldplanung.



2005 int 5012-006

Bild 2.6: Kooperatives Produktengineering nach Gausemeier [GAU00]

Er zielt aber auch auf eine ganzheitliche Betrachtung des Gesamtprozesses und berücksichtigt deshalb Fertigung, Distribution, Nutzung und Entsorgung. Im Wesentlichen verfolgt die Geschäftsfeldplanung den Weg von der Geschäfts- bzw. der Produktidee zum erfolgsversprechenden Geschäftsplan und zum Entwicklungsauftrag. Die Produktentwicklung wird hier im Bereich vom Entwicklungsauftrag bis hin zur Produktkonstruktion abgebildet. Als letztes beinhaltet die Prozessentwicklung den Weg von der Produktkonstruktion bis zur Realisierung von technologischen und logistischen Produktionssystemen [GAU00]. Kooperatives Produktengineering soll ermöglichen, frühzeitig die Produkte und Dienstleistungen für die Märkte von morgen zu erkennen sowie diese rechtzeitig und effizient zu erstellen. Zielsetzung ist vor allem die Integration der oben genannten drei Kernbereiche in die Entwicklung. Im

Vordergrund steht hierbei einerseits die „... Entwicklung neuer Problemlösungen für völlig neue Produkte bzw. für die Steigerung des Preis-/Leistungsverhältnisses heute bekannter Produkte, auf der Grundlage der Integration von Technologien (z.B. Mechatronik) und neuer Technologien, zur Miniaturisierung (Produktinnovation, Produktentwicklung)“. Andererseits ist die „... Sicherstellung des Produkterfolgs und Erhöhung der Umsetzungsgeschwindigkeit durch frühzeitiges Einbeziehen aller Aspekte und Schlüsselpersonen aus dem Produktlebenszyklus (Effizienz in der Umsetzung)“ zu nennen [GAU00].

Das Kooperative Produktengineering baut auf bestehenden Methoden und Konzepten auf und ist daher generell kein neuer Ansatz der Produktentwicklung. Ihm liegen Vorgehensweisen des Simultaneous bzw. Concurrent Engineerings und des Qualitätsmanagements sowie weiterer Konzepte und Methoden zugrunde [GAU00]. Um eine gemeinsame und langfristige kooperative Basis zu schaffen, ist es unerlässlich, alle am Produktengineering beteiligten Bereiche unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen in die strategische Planung einzubinden. Neben der strategischen Geschäftsfeldplanung werden die Aufgabenbereiche der Produkt- und Prozessentwicklung in einem Modell zusammengeführt (Bild 2.7). Ziel ist es, die Produkt- und Prozessentwicklung auf eine gemeinsame, strategisch begründete Basis zu stellen und somit auf die für das Unternehmen wettbewerbsentscheidenden Faktoren auszurichten. Diese Faktoren werden durch Einflussbereiche wie Märkte, Branchen, Produkttechnologien, Fertigungstechnologien, usw. bestimmt. Ihre Ausprägungen können durch gezielten Gestaltungsmiteinsatz, wie z.B. durch Methoden und Spezifikationstechniken im Produktengineering beeinflusst werden [GAU00]. Gegenstand der strategischen Produktentwicklung ist die Entwicklung von Produkten und komplementären Dienstleistungen gemäß einem auf den unternehmerischen Erfolgspotenzialen basierenden Geschäftsplan. Ziel der strategischen Prozessentwicklung ist eine mittel- bis langfristige, gezielte Herausbildung und Entwicklung produktionstechnischer Kernkompetenzen. Die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung strebt eine (wie auch beim Konzept des Concurrent Engineerings angestrebte) aufbauorganisatorisch integrierte Lösung von Entwicklungsaufgaben, z.B. in bereichs- oder unternehmensübergreifenden Projektteams, an. Letztlich entsteht dabei ein Kooperationskern [GAU00]. Einen als Collaborative Engineering bezeichneten Prozess schlägt Friedmann vor [FRI03]. Trotz der Ähnlichkeit der Namen unterscheidet sich dieser Ansatz inhaltlich von dem Gausemeiers. Hier werden eine enge Abstimmung und Optimierung in den Collaborative Engineering-Handlungsfeldern Organisation, Prozess, System und Projektmanagement verfolgt. Von allen Beteiligten ist eine hohe Flexibilität gefordert, um sich an die ständig wandelnden Rahmenbedingungen anpassen zu können. Die Organisation soll eine flexible Entwicklungsorganisation sein, bei der sich beispielsweise die Rolle des Einkäufers wandelt in die eines Partnermanagers. Die Kernprozesse sind trotzdem in erster Linie stabil zu gestalten. Zusätzlich sollen mit Wissensmanagement Synergieeffekte quer über alle Projekte erschlossen werden. Im nächsten Handlungsfeld, dem der Systeme, ist angestrebt, neueste Technologien, wie z.B. virtuelle Produktentwicklungen mit Entwicklungspartnern, zu nutzen. Im Projektmanagement muss auf

wachsende Verantwortung, steigende Komplexität und wechselnde Partner reagiert werden. Somit ist es möglich, in diesem ganzheitlichen Ansatz gleichzeitig interne sowie firmenübergreifende Nutzenpotenziale zu erschließen [FRI03].

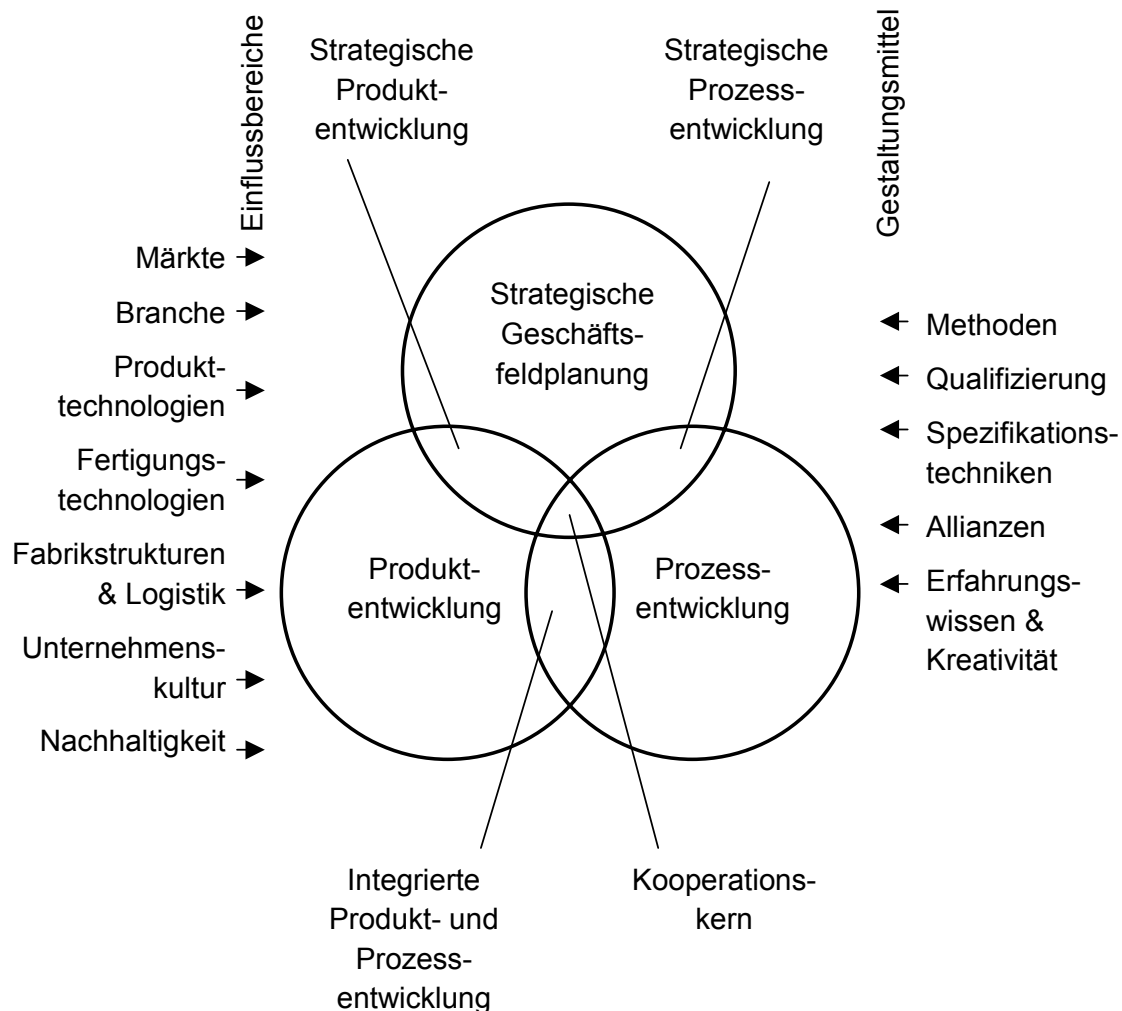


Bild 2.7: Referenzmodell des Kooperativen Produktengineerings [nach GAU00]

Vergleicht man die beiden Ansätze Kooperatives Produktengineering und das Collaborative Engineering, so ist im Wesentlichen ein Unterschied zu erkennen. Das Collaborative Engineering stellt einen Ansatz dar, bei dem das Managen von Entwicklungsaktivitäten im Vordergrund steht. Eine flexible Entwicklungsorganisation bildet hierbei die Basis mit den Schwerpunkten Organisation, Systeme, Partner, Projekte und Prozesse. Das Kooperatives Produktengineering legt dagegen die drei Kernbereiche strategische Geschäftsfeldplanung, Produkt- und Prozessentwicklung zu Grunde, deren beteiligte Einflussbereiche und mögliche Gestaltungsmittel integrativ zusammenwirken.

2.3.2 Einsatz von Qualitätswerkzeugen

Die Entwicklung innovativer Produkte ist für Unternehmen äußerst wichtig, sie beinhaltet aber gleichzeitig ein hohes Risiko [GAU00]. Das wachsende Entwicklungsrisiko steht mit der Verkürzung der Entwicklungszyklen in direktem Zusammenhang. Zur Verringerung des Risikos sind neuartige Ansätze, Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung der Entwickler erforderlich [SPA98]. Beispiele für Methoden sind das Total Quality Management (TQM) als umfassende Qualitätsmanagementstrategie, das Quality Function Deployment (QFD) und die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), usw.

2.3.2.1 Total Quality Management (TQM)

Total Quality Management beinhaltet den Begriff Qualität, der heute vielfach in technischen und nichttechnischen Bereichen mit teilweise differenzierter Bedeutung verwendet wird. Ursprünglich leitet sich Qualität aus dem Lateinischen ab und kommt vom Wort „qualitas“ („Beschaffenheit, Verhältnis, Eigenschaft“) und von „qualis“ („wie beschaffen“). Eine Definition des Begriffes Qualität liefert die ISO-Norm 8402: „Quality is defined as the totality of characteristics of an entity that bear on its ability to satisfy stated and implied needs“ [ISO94]. Ferner definiert Wahrig: Qualität ist Art, Beschaffenheit, Eigenschaft, Fähigkeit, Brauchbarkeit und kann unterteilt werden in hervorragende, gute, beste und mittlere Qualität [WAH02]. Die folgenden Definitionen des Begriffes Qualität zeigen, dass sie dennoch nicht hundertprozentig greifbar ist: „Quality is fitness for use“ (Juran), „Quality means conformance to requirements“ (Crosby), „Qualität ist das anständige“ (Heuss) und „Even though quality cannot be defined, you know what it is“ (Pirsig) [nach INS97].

Nach einigen Definitionen soll nun die Entwicklung des Qualitätsverständnisses erläutert werden. Es hat sich in den letzten Jahrzehnten von einer ursprünglichen Kontrollfunktion hin zu einem ganzheitlichen Managementansatz entwickelt. Die Qualität ist damit zu einem Ansatz gekommen, dem sich alle anderen Aspekte wie z.B. finanzielle und zeitliche Auswirkungen in der Produktentstehung unterzuordnen haben. Dadurch ist ein Qualitätsmanagement entstanden, welches alle Tätigkeiten des Gesamtmanagements, die im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems die Qualitätspolitik, die Ziele und Verantwortungen festlegen sowie diese durch Mittel wie Qualitätsplanung, Qualitätssicherung, Qualitätsmanagement-System-Darlegung und Qualitätsverbesserung verwirklicht [DIN95]. Dabei werden die Rahmenbedingungen und Zielsetzungen für das Qualitätsmanagement durch Faktoren wie Kundenzufriedenheit, Rentabilität, Umweltverträglichkeit und Gesetzeskonformität vorgegeben. Der Umfang und Inhalt des Qualitätsmanagements ist in einem Qualitätsmanagementhandbuch festgelegt, das sich in den meisten Fällen an den ISO-9000-Normen orientiert. Die erforderliche Umsetzung des Qualitätsmanagements entsteht im Unternehmen durch ein geeignetes Qualitätsmanagementsystem wie z.B. Total Quality Management. Diese als TQM bezeichnete Managementstrategie postuliert die ständige Verbesserung der Qualität von Produkten und Dienstleistungen als übergeordnetes Unternehmensziel. Es wurde erstmals in den 60er Jahren von japanischen Unternehmen eingeführt und wird heute als Weiterentwick-

lung aus der klassischen – auf die Produkte und die Produktion beschränkte – Qualitätssicherung verstanden [KAMI03]. Seit den achtziger Jahren ist es auch in den USA und Europa verbreitet. Total Quality Management ist gemäß DIN 8402 wie folgt definiert: „Auf der Mitwirkung aller ihrer Mitglieder basierende Führungsmethode einer Organisation, die Qualität in den Mittelpunkt stellt und durch Zufriedenstellung der Kunden auf langfristigen Geschäftserfolg sowie auf Nutzen für die Mitglieder der Organisation und für die Gesellschaft zielt“ [DIN95].

Ferner propagiert Ishikawa als Hauptziel des Total Quality Managements die Kundenorientierung, was zur Folge hat, dass alle Aktivitäten auf die Kundenwünsche ausgerichtet sind. Kunden können sowohl von externer als auch von interner Natur, also innerhalb des Unternehmens, sein [ISH85]. Hieraus lässt sich eine besondere Verpflichtung des Managements ableiten. Sie besteht darin, die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen zu motivieren und die Qualitätsstrategie festzulegen. Tabelle 2.2 zeigt die Entwicklung des Qualitätsverständnisses von einer einfachen Qualitätskontrolle über das Qualitätsmanagement hin zum Total Quality Management, wobei jeweils der Umfang der Qualitätsorientierung in gering, mittel und hoch unterteilt ist.

Tabelle 2.2: Entwicklung des Qualitätsverständnis [INS97]

Umfang der Qualitätsorientierung	gering		mittel		hoch
Bezeichnung	Qualitätskontrolle	+	Qualitätsmanagement	+	Total Quality Management
Konzept	Prüfung	+	Organisation	+	Lernende Organisation
Adressat	Kapitalgeber	+	Kunde	+	Mitarbeiter
Objekt	Produkte	+	Prozesse	+	Unternehmensstrategie

Zunächst gab es die Qualitätskontrolle (geringe Qualitätsorientierung) deren Konzept die Prüfung von Produkten war und die Kapitalgeber als Adressaten hatte. Die mittlere Qualitätsorientierung brachte dann das Qualitätsmanagement mit einem Konzept der Organisation von Prozessen für den Kunden hervor. Die letzte Entwicklungsstufe (mit höchster Qualitätsorientierung) ist das Total Quality Management. Hier verbirgt sich hinter dem Konzept eine lernende Organisation. Als Objekt fungiert die Unternehmensstrategie während ihre Adressaten die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen sind. Bild 2.8 zeigt das Total Quality Management als eine umfassende Managementmethode einer Organisation, an der alle Mitglieder derselben beteiligt sind.

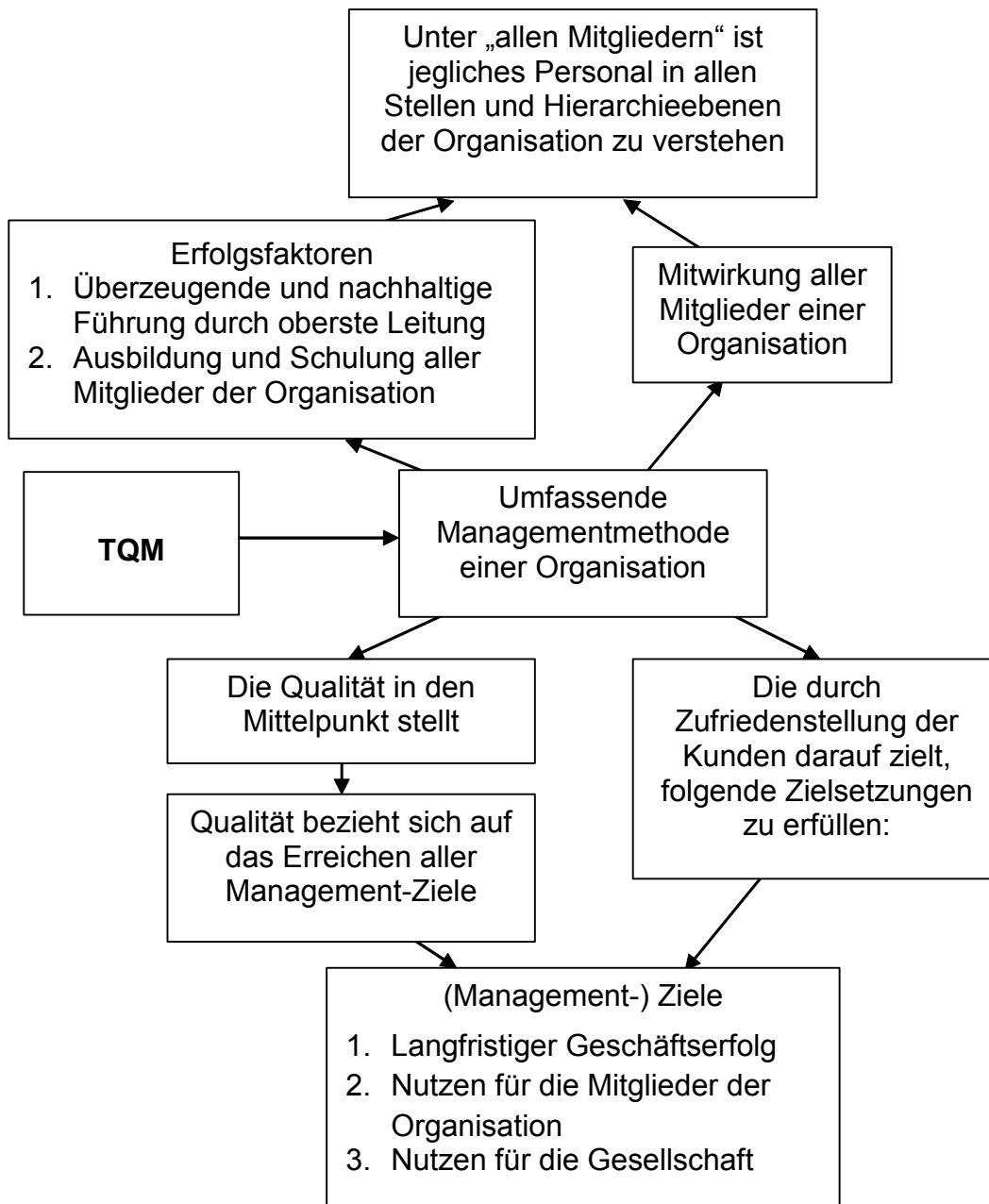


Bild 2.8: Aufbau des Total Quality Management [HUM02]

Es werden alle im Unternehmen, d.h. jegliches Personal aller Stellen und Hierarchieebenen, berücksichtigt. Unter Beachtung der Erfolgsfaktoren wie z.B. Führung und Ausbildung aller Mitglieder einer Organisation, steht die Qualität zum Erreichen der Managementziele im Mittelpunkt. Um den Einsatz von Total Quality Management in Unternehmen zu bewerten, existieren mehrere Modelle. Die zwei bekanntesten Modelle bzw. Qualitätspreise, die auch die Entwicklung des Total Quality Managements in den letzten Jahrzehnten mit beeinflusst haben, sind der Deming Application Prize und der Malcom Baldrige National Quality Award. Europa-weit existieren weitere Qualitätspreise: European Quality Award (EU), Ludwig-Erhard-Preis (D), The UK Quality Award (Großbritannien), Prix Francais de la Qualité (Frankreich), The Price Felipe Industrial Quality Award (Spanien), The Swedish

Quality Award (Schweden) und The Polish Quality Award (Polen). Durch die Zusammenarbeit der EFQM (European Foundation for Quality Management), der EU-Kommission und der EOQ (European Organization for Quality) wurde ein europäisches Referenzmodell entwickelt, auf dessen Basis 1992 erstmalig der European Quality Award verliehen wurde.

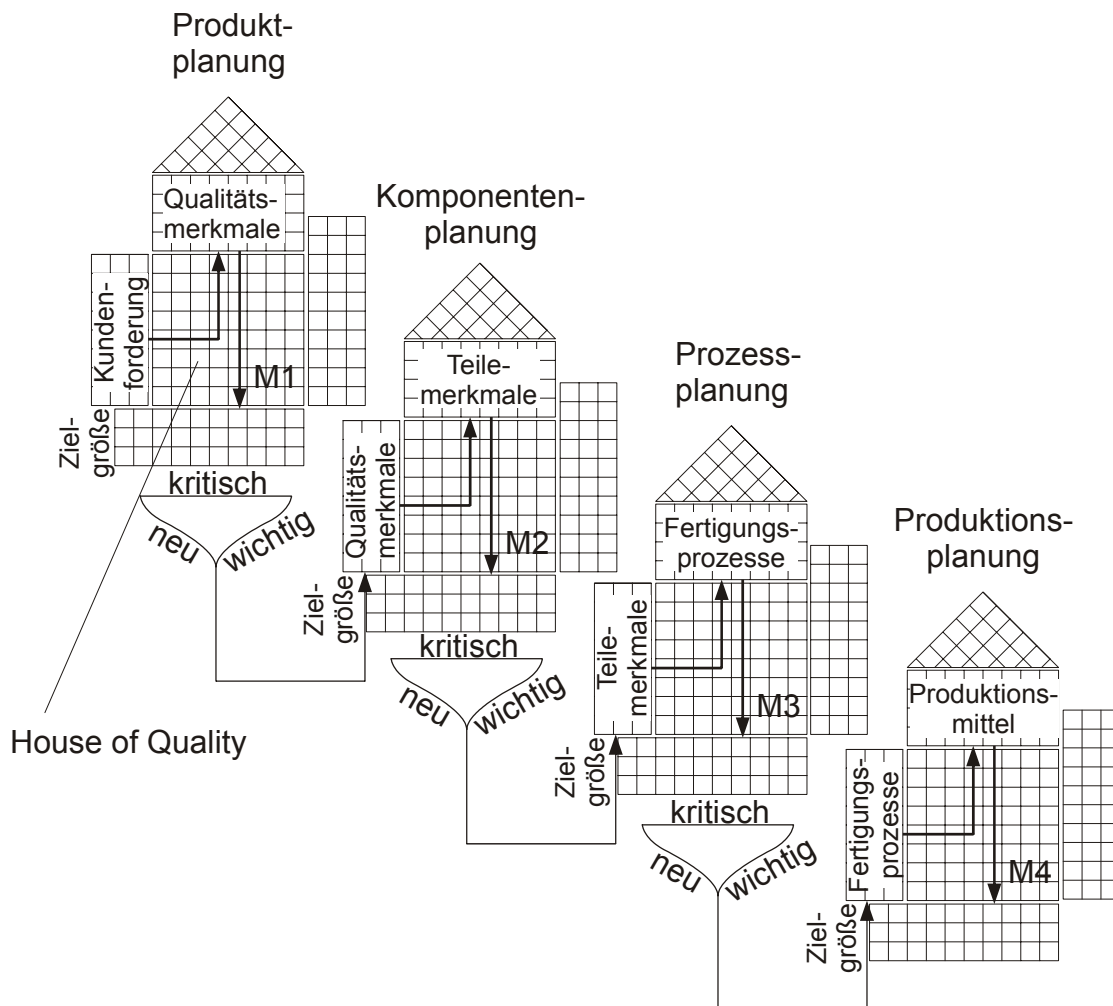
2.3.2.2 Quality Function Deployment (QFD)

Quality Function Deployment dient der Umsetzung des Lastenheftes in das Pflichtenheft. Es ist eine von mehreren Qualitätsmethoden, die Akao in den siebziger Jahren in Japan entwickelt hat: „Quality Function Deployment ist die Planung und Entwicklung der Qualitätsfunktionen eines Produktes entsprechend den von den Kunden geforderten Qualitätseigenschaften“ [AKA90]. Brunner verbindet mit seiner Definition QFD und Simultaneous Engineering: „QFD – kundenorientierte Produktentwicklung – bietet den strategischen Ansatz, die Kundenwünsche und damit die geforderte Produktqualität konsequent als Leitlinie zu betrachten und Produktmerkmale, Konstruktionskriterien und Produktionstechnologien danach auszurichten. Quality Function Deployment wird damit zum Rückgrat eines Simultaneous Engineering“ [BRU99]. Herzwurm beschreibt Quality Function Deployment als methodischen Weg, der als Ziel hat, die Aspekte der Produktentwicklung, wie z.B. Festlegung der Produktmerkmale durch die Entwicklung, anschließende Auswahl der Produktionsmittel, Methoden und Kontrollmechanismen, ausschließlich von den Forderungen der zukünftigen Kunden zu bestimmen. Sinngemäß wird Quality Function Deployment übersetzt mit „Aufmarsch der Qualitätsmerkmale“. Ferner erläutert Herzwurm QFD als ein präventives Werkzeug zur Produktdefinition, das über den Umweg USA den Eingang nach Europa gefunden hat. Quality Function Deployment ist ferner ein wichtiger Bestandteil der präventiven Qualitätssicherung und erfüllt damit teilweise die Erfordernisse von ISO 9000ff bzw. QS9000 [HER02].

Im Folgenden werden die Schritte des Quality Function Deployment erläutert. Die QFD-Methode umfasst ein vierstufiges Vorgehen mit den Schritten [SOH01]:

1. Analyse und Gewichtung der Zusammenhänge zwischen den ermittelten Kundenanforderungen und den Qualitätsmerkmalen des Gesamtproduktes
2. Konkretisierung durch Detaillierung, d.h. hierarchische Zerlegung und Gewichtung der Merkmale auf der Ebene von Baugruppen und Einzelteilen
3. Bewertung der einzelnen Prozessschritte und der resultierenden Zusammenhänge in der Produktentwicklung bezüglich der festgelegten Merkmale
4. Erarbeitung von Prüf- und Prozessregelplänen für die als wichtig betrachteten Fertigungsschritte aus der Gesamtheit aller Maßnahmen der Qualitätsplanung.

Durch den Einsatz von Matrizen konzentriert sich der beschriebene Ablauf auf die Bewertung und Gewichtung anhand von Kennzahlen, wobei nur Qualitätsaspekte Berücksichtigung finden. Die Vorgehensweise erfolgt mittels einer Kombination aus Matrizen, dem House of Quality, und ist auf viele Problematiken anwendbar und kann bei Bedarf entsprechend erweitert werden [RED01, HOF99]. Bild 2.9 zeigt die vier Stufen Produktplanung, Komponentenplanung, Prozessplanung und Produktionsplanung zur Erstellung eines House of Quality.



2005 int 5012-009

Bild 2.9: Vierstufenansatz zu QFD [MAS99]

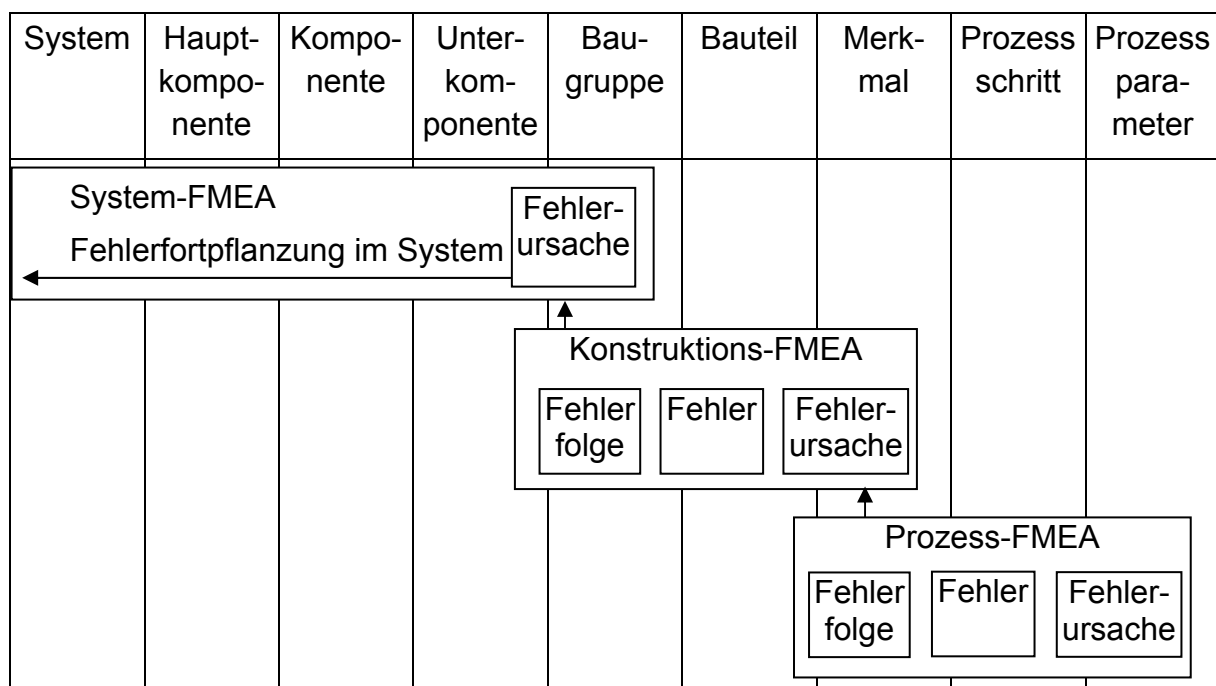
Ursprüngliches Ziel von Quality Function Deployment war eine zielgerichtete Qualitätsplanung in Produktentwicklungsprojekten. Um eine verbesserte Vorgehensweise und ein Hilfsmittel zur Umsetzung des Konzeptes zu erreichen, wurde das Wirkprinzip von Zischka aufgearbeitet, präzisiert und als projektspezifisches Quality-Deployment handhabbar vorgestellt [ZIS00]. Ferner existieren noch Weiterentwicklungen der QFD-Methode wie z.B. als Prozess-QFD. Diese wird zur Minimierung des Ausschusses bei der Leiterplattenherstellung in der Firma Photo Print Electronic GmbH eingesetzt. Hierbei wird das Expertenwissen über alle Produktionsprozesse durch ein methodisches Vorgehen zusammengeführt und die ursprüngliche QFD-

Matrix hinsichtlich Outputparameter sowie Prozessparameter erweitert und bewertet. Durch die so entstehende Darstellung können die wesentlichen Charakteristika eines Prozesse erkannt und abgeleitet werden [BIS02].

2.3.2.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ist eine formalisierte, analytische Methode zur systematischen und vollständigen Erfassung bzw. Vermeidung möglicher Risiken bei der Realisierung von Konzeptionen, Entwicklungen und Prozessen (Tabelle 2.3). Bei ihr werden potenzielle Fehler des Produktes systematisch erfasst, aufgelistet und auf ihre möglichen Auswirkungen und Ursachen hin analysiert.

Tabelle 2.3: Einbindung der FMEA in den Entwicklungsprozess [KAM03]



Im Anschluss daran werden entsprechende Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Fehlerentdeckung aufgelistet. Ziel dabei ist, eine vom Kunden gewünschte Qualität von vornherein in das Produkt hineinzukonstruieren und dadurch Änderungen am Produkt oder Prozess und somit Ausschussquoten zu vermeiden [KAM03]. Je nach Aufgabe unterscheidet man zwischen System-, Konstruktions- und Prozess-FMEA, wobei die prinzipielle Vorgehensweise bei allen FMEA-Arten identisch ist. Die System-FMEA untersucht das funktionsgerechte Zusammenwirken der einzelnen Komponenten eines komplexen Systems in der Phase des Systementwurfs. Die Aufgabe der Konstruktions-FMEA ist es, das Produkt gegen Schwachstellen aller Art in der Entwicklungs- und Produktionsplanungsphase abzusichern. Die Prozess-FMEA untersucht einen bestimmten Fertigungs-, Montage- oder Prüfprozess in der Produktionsplanungsphase, um einen einwandfreien Prozessablauf zu gewährleisten.

Wie läuft eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ab? Ihr stufenweises Vorgehen beinhaltet fünf Punkte [SOH01]:

1. Eingrenzung des Betrachtungsraums und Festlegung der Funktionsbereiche
2. Analyse durch systematische Ermittlung potentieller Fehler, ihrer Ursachen und Folgen
3. Numerische Fehlerbewertung mittels Kennzahlenbildung durch Berechnung einer Risiko-Prioritäts-Zahl (RPZ) nach der Formel: $RPZ = \text{Wahrscheinlichkeit des Auftretens} \times \text{Bedeutung der Folgen} \times \text{Wahrscheinlichkeit der Entdeckung}$
4. Festlegung und Einleitung von Maßnahmen zur Reduzierung des Fehlerrisikos
5. Analyse und Neubewertung nach Durchführung der Maßnahmen.

2.4 Produktentstehung mikrotechnischer Erzeugnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Produktentstehung allgemein eingegangen, wobei die Entwurfsaspekte teilweise schon im Vordergrund stehen. In den sich anschließenden Unterkapiteln werden diese und die Fertigungsaspekte detailliert betrachtet.

Bei der Produktentstehung mikrotechnischer Erzeugnisse ist vor allem das Zusammenspiel von Entwurfs- und Fertigungsaspekten zu beachten. Da hier die Produktentwicklung völlig gleiche Wertigkeit besitzt wie die Entwicklung der Dünnfilmprozesse, stellt die Technologiebetrachtung einen Schwerpunkt innerhalb der Entwurfsphase dar. Unterstützend wirken dabei moderne Systemarchitektur- und Signalverarbeitungskonzepte. Sie helfen bei der Entwicklung der mikrotechnischen Erzeugnisse, die durch innovative Aufbau- und Verbindungstechniken gefertigt werden. Mit diesen Techniken werden komplexe, heterogene Systeme gefertigt, die aus funktional und technologisch verschiedenen Komponenten bestehen. Ferner werden zur Beschleunigung der Produktentwicklung (Verkürzung der Markteinführung) ein ganzheitlicher Concurrent System Design-Ansatz und Designtools mit integrierten Simulationstechniken verwendet [PRO99]. Mehner fasst zusammen, dass der Entwurfsablauf in der Mikrosystemtechnik besondere Anforderungen an die Entwurfsmethodik, an die Entwurfswerkzeuge und an die durchgängige Rechnerunterstützung stellt [MEH00]. Ferner unterscheidet Senturia bzgl. des Entwurfs drei Arten von Produkten. Sie werden hinsichtlich ihres Einflusses auf den Entwurf anhand von fünf Themenkreisen bewertet: Markt, Einfluss, Wettbewerb, Technologie und Fertigung (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Relative Bedeutung der Einflüsse auf den Entwurf von Mikrosystemen [SEN01]

Kategorie	Markt	Einfluss	Wettbewerb	Technologie	Fertigung
Technologie-Demonstrator		++		+++	
Forschungsobjekt	++	++	+	+++	++
Kommerzielles Produkt	+++	+++	+++	+++	+++

Bedeutung: + = gering, ++ = mittel, +++ = hoch

Senturia erläutert die Themenkreise wie folgt. Bei kommerziellen Produkten ist zunächst zu klären, ob überhaupt Bedarf an dem Produkt besteht. Daher hat hier der Markt einen starken, bei Forschungsobjekten einen mittleren und bei Technologie-Demonstratoren gar keinen Einfluss. Ferner ist für den Markt zu entscheiden wie groß er für dieses Produkt ist und wie schnell seine Entwicklungszeit sein wird. Der Einfluss geht mit erfolgreichen Produkten einher, die häufig durch eine völlig neue Art von Mikrosystem entstehen [SEN01].

Ferner legt Senturia dar, dass in Bezug auf den Wettbewerb ein besonders starker Einfluss bei kommerziellen Produkten zu sehen ist. Hier stellt sich die Frage, ob andere Wege der Fertigung existieren, die zu äquivalenten Produkten führen oder ob andere Unternehmen ähnliche Produkte fertigen. Nur der Einfluss für den Technologiebereich ist bei allen Produktarten gleich. Zu klären ist: Kann das Produkt mit den im Hause vorhandenen Technologien gefertigt bzw. zusammengefügt werden? Ist die Technologie im eigenen Unternehmen verfügbar oder muss sie zugekauft werden? Letztlich kommen finanzielle Aspekte zum Tragen und damit die Frage, ob die Fertigung zu akzeptablen Kosten im vorgesehenen Kostenrahmen durchzuführen ist. Dies spielt vor allem bei kommerziellen Produkten auf Grund großer Stückzahlen eine Rolle [SEN01].

Nach den Ausführungen der Einflüsse auf den Entwurf soll nun der globale Entwicklungsansatz von Senturia erläutert werden (Bild 2.10). Einen zentralen Punkt stellt hier das kreative Denken dar, auf das verschiedene Faktoren einwirken. Zu diesen Faktoren gehören die Evaluierung der Konkurrenz, eine Marktvorhersage, Fertigungsüberlegungen sowie die Überprüfung der technologischen Möglichkeiten. Der kreative und iterative Prozess wird durch Modellierung und Analyse unterstützt, deren Input Produktideen sind. Als Output wird eine Leistungsabschätzung geliefert [SEN01]. Welche weiteren Aspekte sind für den Entwurfsprozess zu beachten? Der Entwicklungsprozess wird durch externe und interne Faktoren des Unternehmens beeinflusst.

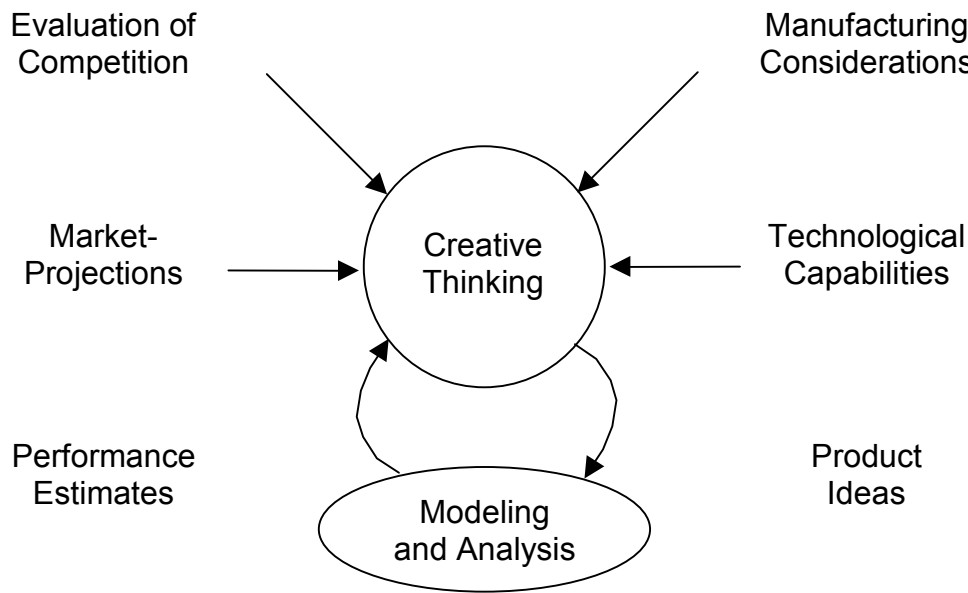


Bild 2.10: Entwurfsaspekte mikrotechnologischer Produkte nach Senturia [SEN01]

Bei Raupach sind die folgenden Einflussfaktoren auf die Produktentstehung zu finden [RAU00]:

1. Extern durch Markt, kulturelle Aspekte, Gesetzgebung und Wirtschaft
2. Produktspezifisch durch Losgröße, Preis, Produktlebenszeit und Komplexität
3. Projektspezifisch durch Konstruktionsart und Innovationsgrad
4. Unternehmensspezifisch durch Organisation, Mitarbeiter, Informationstechnik und Ressourcen.

Um die Entwicklungen hinsichtlich eines technologiegerechten Entwurfs unterstützen zu können, sind zunehmend Technical Computer Aided Design (TCAD) Systeme verfügbar wie z.B. von Corning IntelliSense. Das Produkt von Corning IntelliSense ist IntelliSuite™ (Bild 2.11), ein modular aufgebautes umfassendes Gesamtsystem, welches aus den drei Bereichen Fabrikation/Simulation, Element- und Knotengenerierung und Bauteilanalyse besteht. Der erste Bereich Fabrikation/Simulation enthält die Prozesssimulation, die Materialdatenbank für Dünnfilmtechnik und die Simulation für das anisotrope Ätzen. An ihn schließt sich der Bereich zur weiteren Verarbeitung mittels externer FEM-Simulationen (Finite Elemente Methode) an. Der dritte Bereich analysiert die Eigenschaften des Bauteils hinsichtlich der mechanischen, elektrostatischen, thermischen, fluidischen, piezoelektrischen und magnetischen Eigenschaften. Durch Schnittstellen zu anderen Entwicklungsdaten integriert es sich in der Weise in den Entwicklungsprozess [INT02].

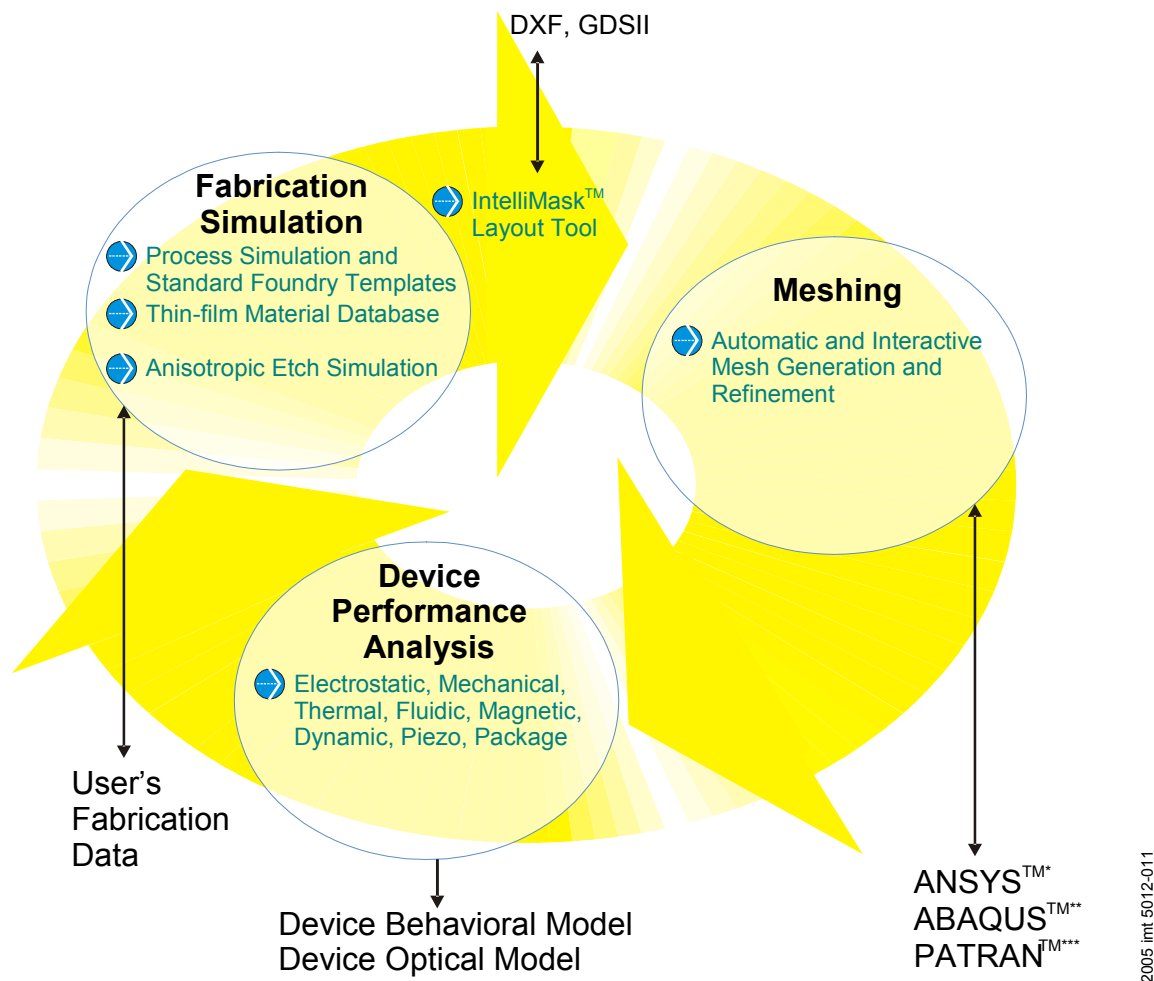


Bild 2.11: Gesamtsystem IntelliSuite™

2.4.1 Entwurfsaspekte

Der Mikrosystem- und Komponentenentwurf ist nach Mehner durch iteratives Vorgehen in den einzelnen Entwicklungsphasen gekennzeichnet, d.h. ein gradliniger Entwurfsdurchlauf von der Anforderungsbeschreibung bis zur Prototypenfertigung ist nicht möglich. Die Entwurfsphasen Spezifikation, Systementwurf, Komponentenentwurf, Integration und Fertigung werden mehrfach durchlaufen, stückweise verbessert und wiederholen sich bei der Entwicklung der Komponenten und ihrer Subkomponenten [MEH00]. Für die Entwicklung existieren grundsätzlich zwei Vorgehensweisen: Top-Down und Bottom-Up. Wird in einem Entwicklungsprozess „Top-Down“ vorgegangen, bedeutet dies, dass von oben nach unten der Entwurf mit Objekten (teilweise abstrahiert) beginnt und dann immer weiter konkretisiert wird. Umgekehrt verhält es sich beim Bottom-Up-Vorgehen. Während der Entwicklung wird dort aus mehreren Einzelkomponenten ein Gesamtsystem zusammengesetzt. Eine ideale Top-Down-Vorgehensweise, bei der die vom System gestellten Forderungen durch die Komponenten vollständig erfüllt sind, ist in der Mikrosystemtechnik kaum möglich

(Bild 2.12). In vielen Fällen muss erst die Komponentenbeschreibung angefertigt werden, bevor das Zusammenspiel der Systembausteine verifizierbar ist. Auch die Rückführung der Ergebnisse des Komponentenentwurfes auf den übergeordneten Systementwurf, mit dem Erfordernis, aus diesen Daten ein überarbeitetes System zu entwickeln, wird als Bottom-Up-Strategie bezeichnet [MEH00].

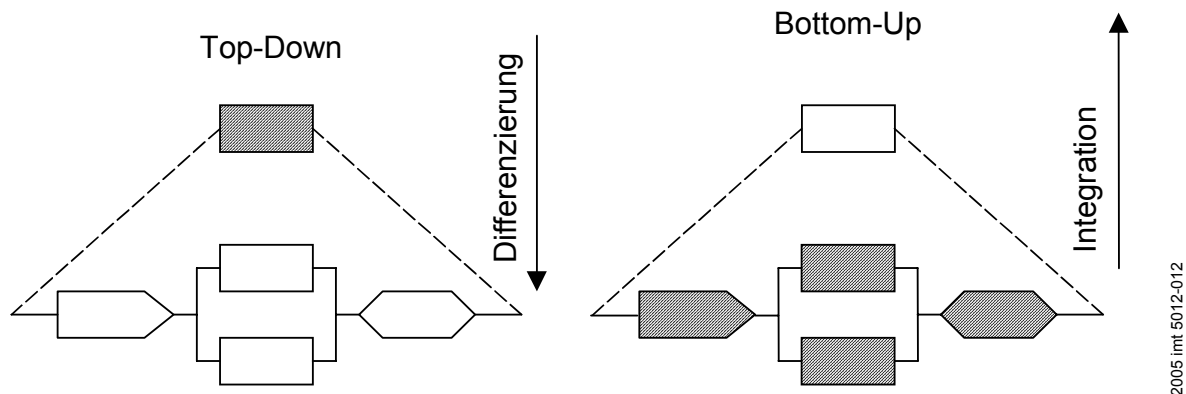


Bild 2.12: Top-Down- und Bottom-Up-Vorgehensweise [VDI00]

Peters erläutert, dass auf Grund der komplexen Systeme in der Mikrosystemtechnik üblicherweise eine Bottom-Up-Strategie verfolgt wird [PET01]. Die einzelnen Systemkomponenten werden gesondert voneinander, häufig auf sehr geringen Abstraktionsebenen, entworfen. Machbarkeitsstudien sind nur ansatzweise und Systemoptimierungen gar nicht durchführbar. Daher kann es bei der Erstellung der Komponentenspezifikationen zu Fehlern, Widersprüchen und Lücken kommen, die kostspielige und zeitintensive Redesigns nach sich ziehen. Ferner ist zu beachten, dass ein Test des Gesamtsystems erst an den Prototypen durchführbar ist.

Die Vorteile der Top-Down-Vorgehensweise zeigen sich in der sicheren Problemerkennung durch den ganzheitlichen Ansatz und durch schnelleres Verständnis der Gesamtzusammenhänge mittels strukturierter Modellerstellung. Demgegenüber sind die hohen Anforderungen an das Abstraktionsvermögen der Modellersteller als Nachteile zu nennen. Dagegen hat die Bottom-Up-Vorgehensweise die Vorteile einfacher Verständlichkeit. Ursachen sind der geringe Abstraktionsgrad zu Beginn der Arbeiten und die Möglichkeit zur Verwendung von vorgefertigten Strukturen. Als Nachteil ist hier z.B. das schwierige Erkennen der Gesamtzusammenhänge anzuführen [VDI00]. Darüber hinaus wird eine Kombination aus beiden Vorgehensweisen als „meet in the middle“ Strategie ausgedrückt [MEH00].

Die oben beschriebenen Vorgehensweisen zur Entwicklung mikrotechnischer Erzeugnisse beinhalten die Schritte Modellierung, Simulation, Validierung und Verifikation. Gerlach beschreibt als ersten Schritt die Modellierung, die zur Abbildung eines Sachverhalts als graphisches oder körperliches Modell sowie als Rechenmodell dient. Die folgende Simulation dient der Berechnung des Sachverhaltes der

durch das Modell dargestellt wird. Hierbei entsteht eine Lösung der mathematischen Beschreibung des Modells unter vorgegebenen Randbedingungen. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Abhängigkeit von Parametern [GER97].

Der nächste Schritt ist die Validierung, die zur Bestimmung und Erklärung der Gültigkeit des Modells führt. Letztlich stellt die Verifikation die Bewertung der Simulationsergebnisse dar, wobei ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Referenzdaten erfolgt und eine Bestätigung der Anwendbarkeit des Modells gesucht wird [GER97]. Bild 2.13 zeigt vier verschiedene Modellierungsniveaus von Senturia: in Gesamtsystem (System), Bauteil (Device), physikalische Eigenschaften (Physical) und Fertigungsprozess (Process). Zwischen den Modellierungsniveaus erfolgen Iterationen. In Richtung Top-Down-Vorgehensweise erfolgt die Simulation und in Richtung Bottom-Up die Verifikation [SEN01].

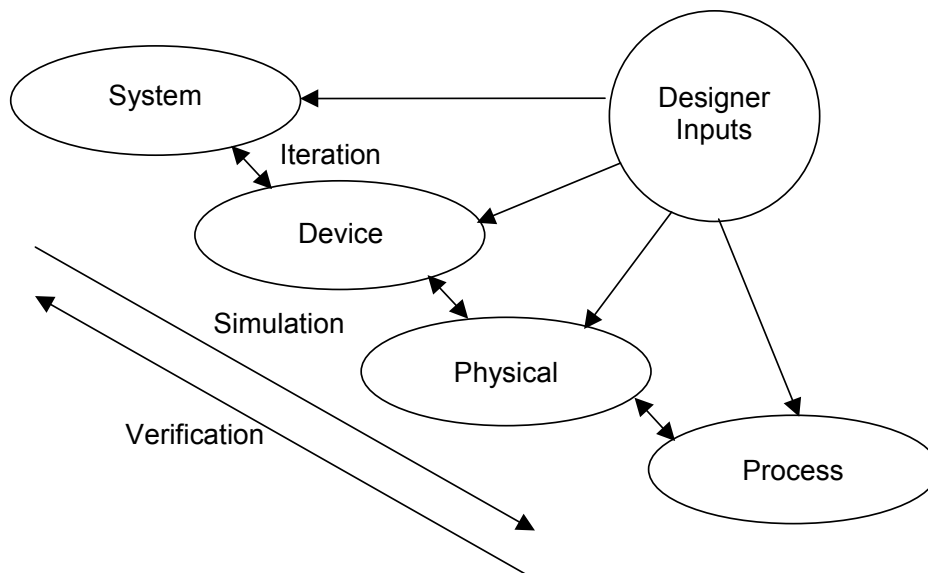
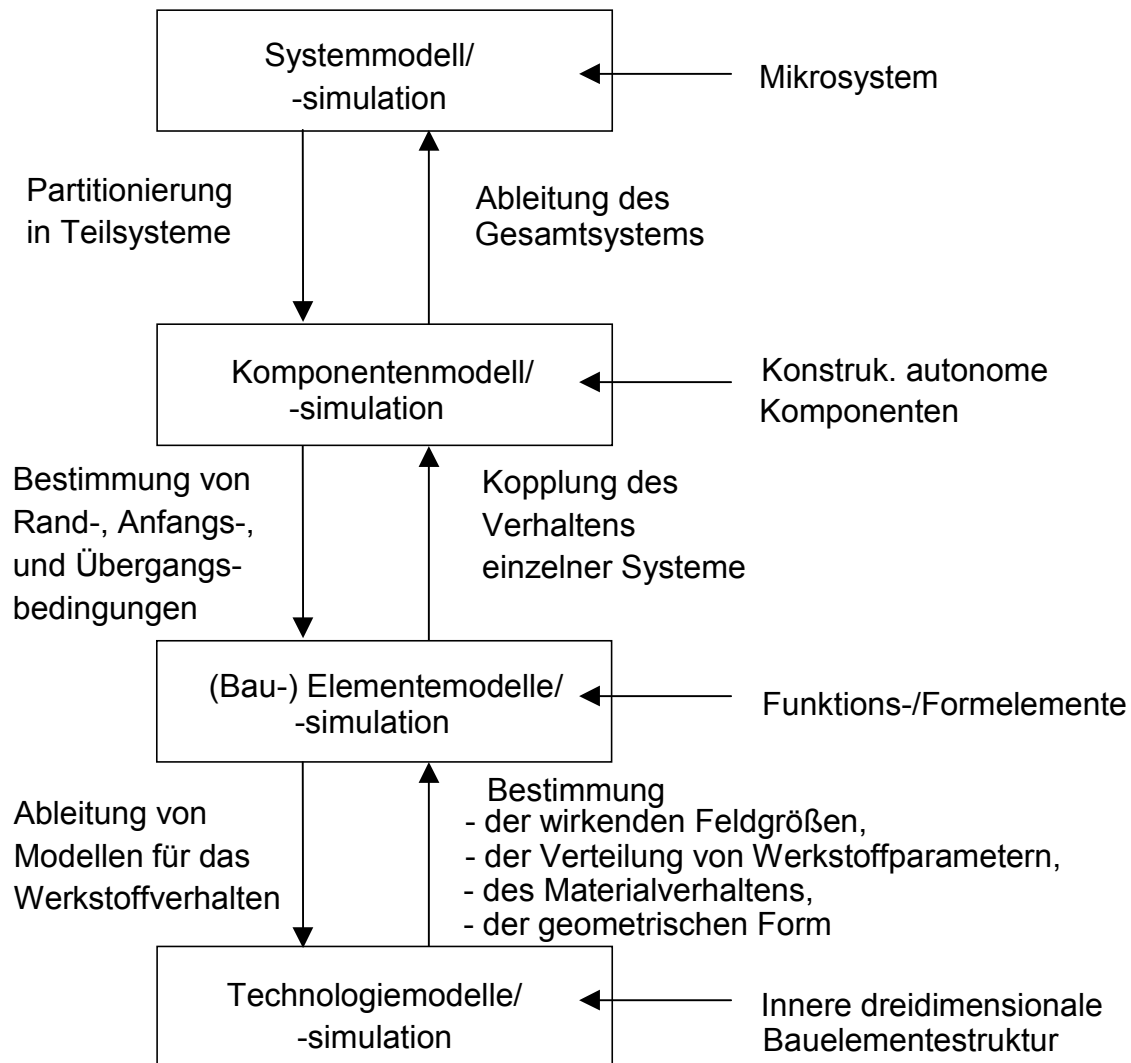


Bild 2.13: Darstellung verschiedener Modellierungsniveaus nach Senturia

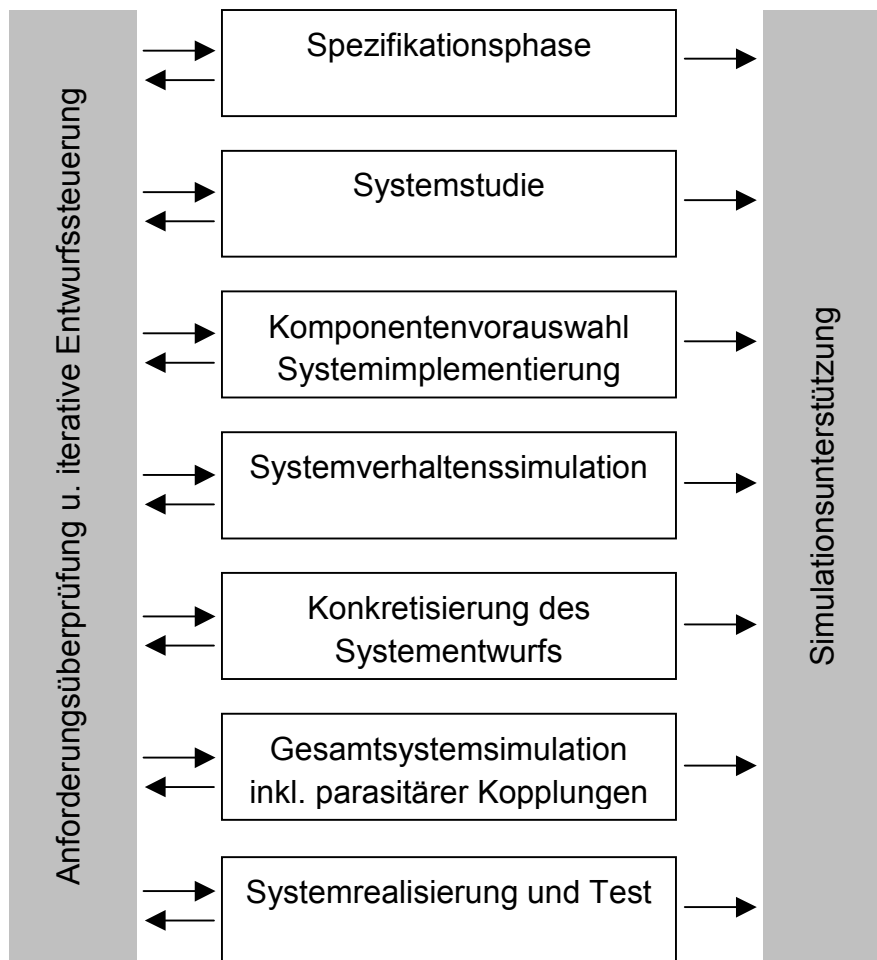
Im Gegensatz zu Senturia schlüsselt Gerlach die Simulation noch weiter auf (Bild 2.14) und wählt einen anderen Detaillierungsgrad. Ähnlich dem schon erwähnten „V-Modell“ (Bild 2.5) von PR*Onova* sind die Phasen der Produktentstehung zunächst steigend im Detaillierungsgrad (Pfeile nach unten) und dann wiederum abnehmend (Pfeile nach oben) bzgl. der Detaillierung, bis letztlich das Gesamtsystem erstellt ist [GER97]. Gerlach berücksichtigt für jeden Schritt der Entwicklung eine Modellbildung, an die sich eine Simulation anschließt. Die vier verwendeten Modelle sind das Systemmodell, das Komponentenmodell, das Elementenmodell und das Technologiemoell. Das Systemmodell beschreibt das gesamte Mikrosystem, während das Komponentenmodell die konstruktiv autonomen Komponenten wiedergibt. Es folgen Funktions- und Formelemente, die in Elementenmodellen dargestellt sind. Der letzte Detaillierungsgrad befasst sich mit Technologiemoellen und bezieht sich auf die innere dreidimensionale Bauelementestruktur [GER97].



2005 int 5012-014

Bild 2.14: Modellbildung und Simulation im Entwicklungsprozess nach Gerlach [GER97]

Obwohl die oben beschriebene Simulationstechnik innerhalb des Entwicklungsprozesses von großer Bedeutung ist, muss für eine optimale Nutzung der Fertigungspotenziale die Gestaltung der Mikrostrukturen ausführlich geplant werden, weil hieraus Konsequenzen für den gesamten Fertigungs- und Montageprozess entstehen. Da die technologischen Einflüsse bereits Auswirkungen auf die Produktgestaltung haben, ist es von großer Wichtigkeit, diese bereits in der Entwurfsphase zu berücksichtigen. Die Fertigung entfällt hier und wird ausschließlich durch den Simulationsanteil im Entwicklungsprozess einer virtuellen Fertigung berücksichtigt. Kasper zeigt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [VDI93] eine Betrachtung des Entwurfsablaufs in der Mikrosystemtechnik. Dabei verfolgt er mit jeder Stufe eine gesteigerte Detaillierung der Simulationsmodelle (Bild 2.15).



2005 imt 5012-015

Bild 2.15: Entwurfsablauf für die Mikrosystemtechnik [KAS00]

Die Spezifikations- oder Konzeptphase ist die Ausgangsbasis des Entwurfsprozesses. Alle Aspekte des geforderten Produktes sind gemeinsam vom Auftraggeber und vom Kunden zu erstellen und später durch Experten zu prüfen. Ferner sind Vorgaben für die Optimierung des Systems notwendig, d.h. es ist festzulegen, welche Aspekte von besonderer Bedeutung sind. Im nächsten Schritt, während der Systemstudie, erfolgt eine Aufgabensplittung in einzelne Blöcke, die funktionell ausgerichtet ist und bereits fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt [KAS00]. Mit der Definition der Komponentenfunktionen und der Systemimplementierung wird daraufhin die Systemstruktur in einer ersten Simulation überprüft. Es folgen weitere Simulationen zur Ermittlung der Spezifikationen der Komponenten für eine anschließende Systemverhaltenssimulation. Vor der weiteren Konkretisierung des Systementwurfs findet eine Variantenbewertung statt. Die nächsten Schritte umfassen den Entwurf der Komponenten, die Festlegung der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie den physikalischen Entwurf mit weiterer Simulation. Sind nun alle Teilmodelle bekannt, wird eine Gesamtsystemsimulation durchgeführt, die eine erneute Variantenbewertung ermöglicht. Bei Kasper fehlt allerdings ein wesentlicher Punkt in der Vorgehensweise: Er berücksichtigt die Prozesssimulation (der

beteiligten Fertigungsprozesse) nicht. Als vorletzter Schritt wird ein Prototyp erstellt, für den gleichzeitig eine Testumgebung zu entwickeln ist. Letztlich kann mit Abschluss dieser Phase ein Redesign eingeleitet werden bzw. der Start zur Nullserie beginnen [KAS00].

Vergleicht man Senturia, Gerlach und Kasper so unterscheiden sich diese im Wesentlichen darin, wie weit die Detaillierungsebenen herunter gebrochen sind und die jeweiligen Entwicklungsschritte in Kombination mit Simulationen betrachtet werden. Allerdings trifft keiner der drei Aussagen zum Maskenentwurf, der ein wichtiges Zwischenergebnis im Entwurfsablauf repräsentiert. Senturia hat als einziger einen globalen Ansatz mit Focus auf den Entwickler selbst, als zentrale Figur zwischen den Modellierungsniveaus.

2.4.2 Fertigungsaspekte

Fertigungssysteme für mikroelektronische/-technische Bauelemente sind überwiegend für hohe Stückzahlen ausgelegt. Dabei werden weitestgehend Standardprozesse verwendet, wie z.B. CMOS. Die Standardisierung führt zu beherrschbaren und sicheren Prozessen. Neben der Beherrschung der Fertigungsprozesse benötigt die erfolgreiche Herstellung von Mikrosystemen spezifische Fertigungskonzepte und Fertigungseinrichtungen speziell in Fällen, in denen nicht auf die Fertigungstechnologien der Mikroelektronik gesetzt werden kann [MST04]. Die Mikrosystemtechnik unterscheidet sich von der Mikroelektronik in den nachstehenden wesentlichen Punkten: Kombination unterschiedlicher Materialien und Technologien, Verbindungen zur Außenwelt (neben elektrischen Verbindungen bestehen auch optische, fluidische und mechanische Kontakte zur Umwelt) sowie Fertigung geringer Stückzahlen anwendungsspezifischer Mikrosysteme [MST04].

Schäfer stellte bereits 1994 die folgenden prinzipiellen Anforderungen an die Mikroproduktionstechnik zusammen: Definition von Standardbauelementen, die in großen Stückzahlen gefertigt und in unterschiedlichen Endprodukten genutzt werden können, Realisierung unterschiedlichster Schnittstellen durch entsprechende Verbindungs- und Montagetechniken, Berücksichtigung der für das gestellte Problem bedarfsweise genutzten Fertigungseinrichtungen, um optimale Abläufe in der Produktion zu ermöglichen sowie Definition mikrosystemtechnik-spezifischer Prozessketten einschließlich Design-Rules [SCH94]. Aus fertigungstechnischer Sicht ist die effiziente Nutzung der Fertigungspotenziale für die optimierte Gestaltung des Produktentwurfs von großer Bedeutung. Beispielsweise sollte die Geometrie eines Produktes, soweit von den funktionalen Anforderungen möglich, an das Fertigungsverfahren angepasst werden. Dazu gehört das Ausschließen prozesstechnisch ungünstiger oder nicht realisierbarer Konstellationen. Die Voraussetzung für einen derartigen Entwicklungsprozess ist die Kenntnis technologischer Einflüsse auf die Produktgestalt, die aus dem Herstellungsverfahren resultieren [BUC97].

Zur Fertigung von mikrotechnischen Produkten werden verschiedene Einzelprozesse durchlaufen, die in der Summe ein Produkt realisieren. Dahinter verbergen

sich technologische Bearbeitungsverfahren wie Schichtabscheidung, Strukturierung von Schichten oder Verbindung von Einzelementen [GER97].

2.5 Rechnerunterstützung des Produktentstehungsprozesses

Die bisher dargestellten Methoden, Strategien und Werkzeuge die eine Unterstützung für die Produktentwicklung liefern, können darüber hinaus kann sie durch den Einsatz von Software weiter ergänzt bzw. verbessert werden. Durch Aufkommen leistungsfähigerer Rechner in den letzten Jahren können immer mehr Aufgaben in immer kürzerer Zeit bearbeitet werden. Damit hat auch der Einsatz von Software für die Produktentstehung an Bedeutung gewonnen. Vielfach ist in ihr die Berechnung von Kennzahlen integriert, die äußerst nützliche Endaussagen zu einer Entwicklung liefert.

2.5.1 Datenmanagement mit Rechnerunterstützung

Software wird mit Hilfe von Programmiersprachen entwickelt. Stand der Technik ist die objektorientierte Softwareentwicklung mit etablierten Vorgehensmodellen wie z.B. „Unified Modeling Language“ (UML) [OES04]. Das Datenmanagement soll die flexible Verarbeitung beliebiger Daten ermöglichen. Dadurch wird es möglich, die Produktentstehung softwaregestützt mit Hilfe von entwicklungsunterstützenden Systemen, bestehend aus verschiedenen Elementen und ganzheitlichen Ansätzen, durchzuführen. Der Einsatz der Software ermöglicht dabei, auf vorgefertigte Elemente, automatisierte Abläufe und bestehende Informationen zurückzugreifen. Dieses verbesserte Datenhandling wird mittels Softwaretools realisiert.

Entwicklungsunterstützende Systeme lassen sich in die drei Kategorien Wissensmanagement, Entscheidungsunterstützung und Bewertung unterteilen [LUS99, SPA00]. Zu den Wissensmanagementsystemen gehören z.B. Konstruktionskataloge und CAD (Computer Aided Design). Als Beispiel für ein Bewertungssystem ist COMMET (Constructing and Design of Machines and Mechanisms using Environment-friendly Technology) zu nennen, während die Nutzwertanalyse und der Hierachy Process den entscheidungsunterstützenden Systemen zu zuordnen sind. Ein weiteres Beispiel für ein entscheidungsunterstützendes System ist das Softwarewerkzeug Product Generation Tool (ProGenT) von Sprenger, das eine Unterstützung des methodischen Ablaufs der umweltgerechten Produkterzeugung mittels Analytischer Produktgenerierung (APG) liefert. Die Analytische Produktgenerierung gliedert sich in drei Phasen. Sie beginnt mit der Definition von umweltgerechten Kriterien und deren Selektion. Die zweite Phase dient dazu, die Auswahl aus Standardteilen für das zu optimierende Produkt einzugrenzen. In der abschließenden dritten Phase entstehen nach der Marktanalyse oder im Anschluss an die Entwicklung verschiedene Kennzahlen, die entsprechend dem Kundenwunsch zur Bewertung eingesetzt werden. Die Auswahl und Bewertung der möglichen Kennzahlen-Rangfolge erfolgt durch die Analytische Produktgenerierung und die Rechnerunterstützung durch das Product Generation Tool [SPR02].

Die Firma PTC programmiert Softwarelösungen für die Produktentwicklung, die ebenfalls den entscheidungsunterstützenden Systemen zu zuordnen sind, aber auch einen hohen Anteil von Wissensmanagement aufweisen. Mit Hilfe der Software sind Fertigungsunternehmen in der Lage hochwertige Produkte zu entwickeln und diese schnell auf den Markt zu bringen [PTC03]. Zunächst wird der Produktentstehungsprozess analysiert und Schritt für Schritt optimiert. Mit der Software Pro/CONCEPT können Konstrukteure anschließend neue Ideen nicht nur erfassen, sondern auch auf einfache Weise prüfen und erweitern lassen sowie zahlreiche Varianten eines Produkts erzeugen. Das entstehende Produkt liegt in digitaler Form vor und wird elektronisch innerhalb der „digitalen Wertschöpfungskette“ weitergegeben. Durch die Software ist es möglich, gleichzeitig Lieferanten, Entwicklungspartner und Kunden – oder sonstige am Produktentstehungsprozess Beteiligte – zu integrieren. Die frühzeitige Variantenbildung innerhalb der Produktentwicklung, durchgeführt von den Konstrukteuren, verbessert den Fertigungsprozess und reduziert den Aufwand für die Nachbearbeitung des Produktes. Der Grundgedanke ist hier, die Entwurfsphase eines neuen Produkts für alle Beteiligten zugänglich zu machen. In dieser Phase können Ideen schnell und einfach erfasst und beurteilt werden, um dann die Besten davon an Konstruktion, Entwicklung und schließlich an die Fertigung weiterzugeben. Softwareunterstützung ermöglicht den Ingenieuren, eine Verbindung zu anderen Anwendungen und Beteiligten im Konstruktionsprozess herzustellen. Zusätzlich lässt sie sich in zahlreiche CAD-Systeme integrieren, so dass Konstrukteure alle Daten aus Pro/CONCEPT im Anschluss nutzen können. Dies vereinfacht außerdem die weitere Entwicklungsarbeit hinsichtlich der Konstruktion für die Fertigung [PTC03].

Die oben beschriebenen Verknüpfungen von verschiedenen beteiligten Abteilungen eines Unternehmens lassen vermuten, dass während der Entwicklung Schnittstellenprobleme zwischen unterschiedlichen Bearbeitern auftreten. Diese sind häufig Hindernisse für ein effektives Concurrent Engineering. Die Problematik liegt in der heterogenen Entwicklungsumgebung, in der Design- und Entwicklungsaufgaben oft nur nacheinander statt gleichzeitig und kooperativ realisiert werden können. In diesem Zusammenhang wird von Interoperabilität zwischen Mechanical Automation Tools (MDA) gesprochen. Damit ist die Harmonisierung zwischen den Tools, wie z.B. Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM) und Computer Aided Engineering (CAE) gemeint. Hilfe zum Datenaustausch liefert hier wiederum die Firma PTC mittels ihres Assoziativen Topologie Busses (ATP). Das verbindende Merkmal (Feature) zwischen diesen Werkzeugen (Tools) ist der ATP Bus, der seinen Anwendern große Kompatibilität bietet und es ermöglicht, sich ohne Daten- und Zeitverlust auszutauschen und in Echtzeit zusammenzuarbeiten [NEW00].

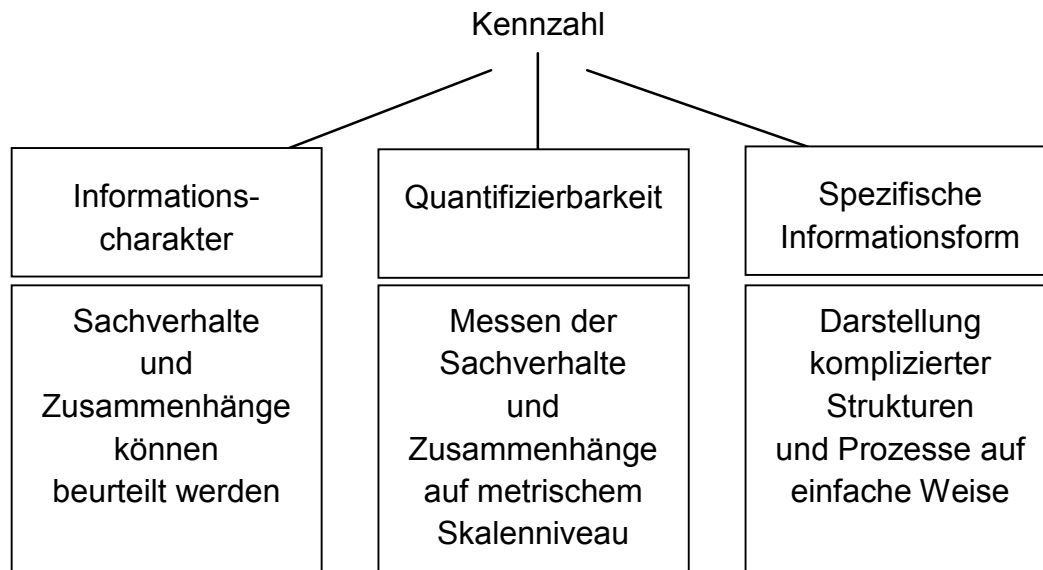
Von den drei entwicklungsunterstützenden Systemen werden die entscheidungsunterstützenden Systeme und die Bewertungs-Systeme für die Produktentstehung von mikrotechnischen Erzeugnissen verwendet.

2.5.2 Kennzahlen

Der Einsatz von Kennzahlen erlaubt, komplexe Prozesse oder Zustände miteinander zu vergleichen. Zunächst sollen einige Definitionen dargelegt werden. Nach Grochla dienen Kennzahlen dazu, sowohl das innerbetriebliche Geschehen als auch außerbetriebliche Vorgänge transparent zu machen, um insgesamt eine bessere Handhabbarkeit und Steuerbarkeit des Unternehmens und seiner Teilbereiche zu erreichen [GRO83]. Erst 1990 wurde auf Grund der betriebswirtschaftlichen Diskussion zu Kennzahlen und ihren Definitionen weitgehend Einigkeit erreicht. Reichmann definierte eine Kennzahl als eine Zahl, die quantitativ erfassbare Sachverhalte in konzentrierter Form aufgreift und diese vergleichbar macht [REI90]. Groth beschreibt die grundlegende Aufgabe von Kennzahlen als Erfassung von Abläufen aus allen Unternehmensbereichen. Hier ist vor allem die ökonomische Betrachtung von Bedeutung, da Kennzahlen und ihre Systeme z.B. für Vergleiche mit Wettbewerbern o. ä. herangezogen werden [GRO91]. Noch später führt Aichele aus, dass weitere Bezeichnungen wie Kennziffer, Messziffer oder auch Kontrollziffer benutzt werden, um nahezu die gleiche Aussage zu treffen [AIC96].

Die Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ) definiert Kennzahlen als Zahlen, die in präziser und konzentrierter Form Aussagen über wichtige, zahlenmäßig erfassbare Tatbestände und Entwicklungen einer Organisation liefern. Kennzahlensysteme können gemäß DGQ als eine systematische Zusammenführung von Kennzahlen betrachtet werden, die über den selben Sachverhalt aus verschiedenen Perspektiven oder über unterschiedliche Aggregationsstufen informieren und die in ihrem Zusammenhang auf ein übergeordnetes Ziel ausgerichtet sind [DGQ99]. Ferner liefert Gabler eine unternehmensweite Betrachtung: Im Rahmen der Informationspyramide innerhalb eines Unternehmens unterstreichen Kennzahlen, entsprechend aufbereitet, eine ganzheitliche Unternehmensführung und tragen dazu bei, Entscheidungen zu objektivieren sowie mehrstufige Entscheidungsprozesse wesentlich zu unterstützen [GAB01]. Im Folgenden sollen Kennzahlen, Kennzahlenbereiche, Ansätze und Berechnungsbeispiele vorgestellt werden.

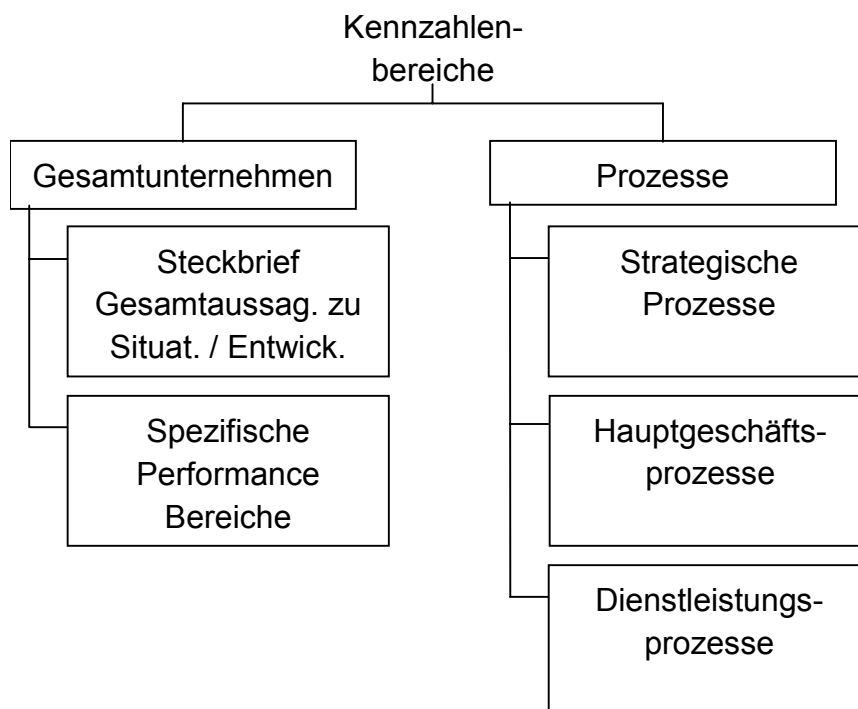
Einen Ansatz liefert Hauer durch die Gliederung von Kennzahlen in die drei Kernelemente Informationscharakter, Quantifizierbarkeit und spezifische Informationsform (Bild 2.16). Die Funktionen der Kernelemente sind z.B. die Bildung von Kennzahlen zur Operationalisierung von Zielen und Zielerreichung (Leistungen). Als Anregungsfunktion dienen die Kernelemente der laufenden Erfassung von Kennzahlen zur Erkennung von Auffälligkeiten und Veränderungen. In Form von Vorgabefunktion unterstützen sie die Ermittlung kritischer Kennzahlenwerte als Zielgrößen für unternehmerische Teilbereiche. Ferner sind Kennzahlen als Steuerungsfunktion, zur Vereinfachung von Steuerungsprozessen und als Kontrollfunktion für die laufende Erfassung zur Erkennung von Soll-Ist-Abweichungen im Einsatz [HAU98].



2005 int 5012-016

Bild 2.16: Charakteristische Merkmale von Kennzahlen nach Hauer [HAU98]

Nührich unterteilt Kennzahlen nach verschiedenen Aussagebereichen (Bild 2.17). Er betrachtet einerseits das Gesamtunternehmen und andererseits die beteiligten Prozesse.



2005 int 5012-017

Bild 2.17: Kennzahlen nach Aussagebereichen [NÜH01]

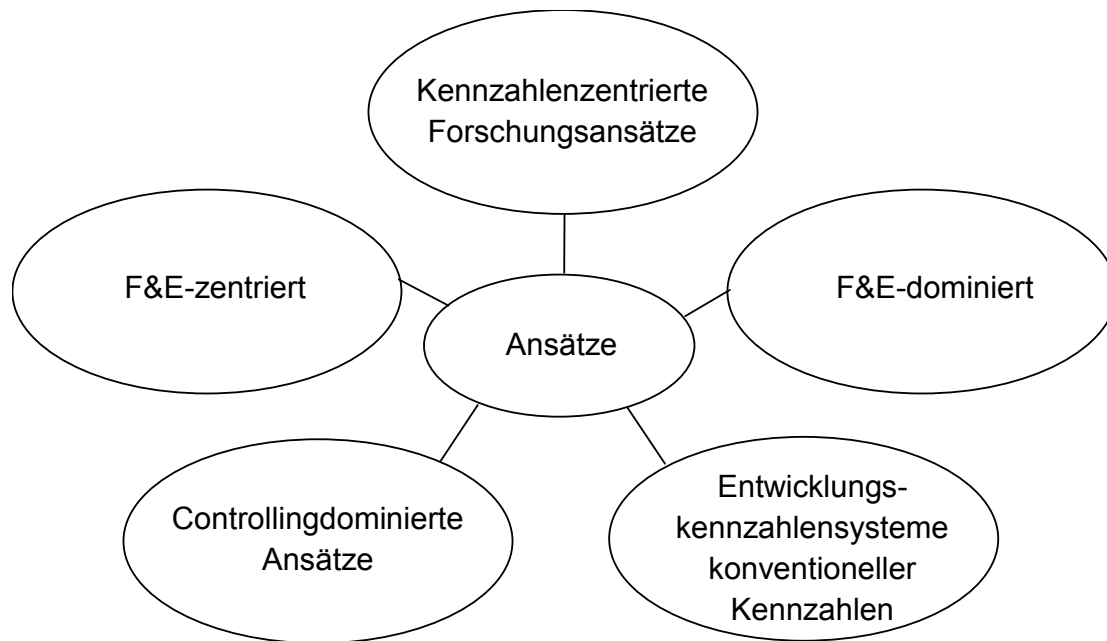
Dem Bereich des Gesamtunternehmens sind der „Steckbrief“ und spezifische Performancebereiche zu zuordnen. Der Steckbrief eines Unternehmens bezieht sich auf Rahmendaten bzw. Kennzahlen des Geschäfts und der Geschäftsfelder. Die

spezifischen Performancebereiche umfassen Kennzahlen, die Einschätzungen und Beurteilungen des Unternehmens von außen liefern. Demgegenüber wird auf der Prozessseite die Leistungsfähigkeit von strategischen Prozessen, Hauptgeschäfts- und Dienstleistungsprozessen mit Kennzahlen beurteilt. Die Kennzahlen weisen dabei auf schädliche Einstellungen und falsche Annahmen im Unternehmen hin sowie auf Verletzungen von Grundkenntnissen und die Vernachlässigbarkeit von Grundfähigkeiten. Nutzen und Zweck von Kennzahlen liegen allein in ihrer Signalwirkung für Sachverhalte und Entwicklungen begründet [NÜH01].

Eine Unterteilung der Kennzahlen in die zwei Bereiche „absolute Zahlen“ und „Verhältniszahlen“ beschreibt Depolt. Absolute Zahlen werden als Grundzahlen verstanden, da sie auf Mengen- oder Wertgrößen beruhen. Diese Zahlen sind Einzelzahlen, Summen, Differenzen oder Mittelwerte. In ihrer Hauptverwendung dienen absolute Zahlen als Vorgabezweck, während Verhältniszahlen besonders zu Analyse Zwecken geeignet sind. Sie entstehen aus absoluten Zahlen, die zueinander in Beziehung zu setzen sind. Werden relevante Zahlen miteinander in einen schlüssigen Zusammenhang gebracht, so lassen sie sich wiederum in Beziehungszahlen, Gliederungszahlen und Indexzahlen differenzieren. Beziehungszahlen ermöglichen es, absolute Zahlen – die vom Wesen her völlig ungleichartige Größen sind – miteinander in Bezug zu setzen, sofern ein grundsätzlicher Zusammenhang existiert. Gliederungszahlen stellen Größenordnungen und strukturelle Beziehungen dar, indem sie ein Verhältnis wiedergeben, welches einen Teil einer Gesamtmasse zu dieser in Beziehung setzt. Die Indexzahlen stellen ähnlich wie die Beziehungszahlen Verhältnisse von Teilen zum Gesamten dar, allerdings zeitlich oder räumlich voneinander getrennt [DEP00, VOL98].

Gentner unterscheidet fünf Ansätze von Kennzahlen im Forschungs- und Entwicklungsbereich (F&E-Bereich). Die dargestellten Ansätze (Bild 2.18) kommen zwar grundsätzlich alle im F&E-Bereich zum Einsatz, benutzen aber unterschiedliche Daten für die wissenschaftliche Verwendung oder den unternehmensweiten Bezug [GEN94]. Der kennzahlenzentrierte Ansatz berücksichtigt die Gesamtunternehmensperspektive und der F&E-zentrierte Ansatz beinhaltet Ausgestaltungs-, Organisations- und Steuerungsmodi. Sie sollen hier nur der Vollständigkeit halber genannt werden, sind aber von untergeordneter Bedeutung. Controllingdominierte und F&E-dominierte Ansätze sowie Entwicklungskennzahlensysteme konventioneller Kennzahlen werden im weiteren Verlauf dieses Abschnitts an Hand einiger bekannter Kennzahlensysteme erläutert [GEN94].

Wenn es erforderlich ist, gleichzeitig mit mehreren Zahlen zu arbeiten, wird ein Kennzahlensystem verwendet. Dies kann von Nutzen sein, wenn ein größerer Zusammenhang zu berücksichtigen ist oder die Auswirkungen des Ergebnisses auf mehrere Aspekte gleichzeitig zu beziehen sind. Die wohl bekanntesten Kennzahlensysteme sind die des Chemiekonzerns DuPont und des Zentralverbandes der Elektrotechnischen Industrie (ZVEI).



2005 int 5012-018

Bild 2.18: Kennzahlenansätze im Forschungs- und Entwicklungsbereich nach Gentner [GEN94]

Das DuPont-Kennzahlensystem ist ein betriebswirtschaftliches System, welches eine rechnerische Betrachtung verfolgt und pyramidenförmig aufgebaut ist. Die Hauptkennzahl dieses Systems ist die Kapitalrentabilität [BOT93]. Das ZVEI-Kennzahlensystem ist eine Kooperation des betriebswirtschaftlichen Ausschusses des Zentralverbandes der Elektrotechnischen Industrie e.V. [ZVE76]. Dieses System ist nicht alleine auf die Bedürfnisse dieser Branche angelegt und somit ebenfalls für andere Branchen nutzbar. Das entscheidende Merkmal ist hier die Unterteilung in eine Wachstumsanalyse und eine Strukturanalyse [GRO88]. Es existiert eine Reihe von weiteren Kennzahlensystemen, die auch Aussagen im Bereich von Forschung und Entwicklung ermöglichen. Genter stellt einige Kennzahlensysteme vor. Beispielsweise liefert das System nach Schulte eine Entwicklungsquote. Diese berechnet sich aus der Anzahl erfolgreicher Entwicklungsprojekte, dividiert durch die Anzahl der gesamten Entwicklungsprojekte. Ein anderes Kennzahlensystem stammt von Thoma. Dieses betrachtet einerseits den Projekt-ROI (Return on Investment), andererseits wird ein Projektdeckungsbeitrag ermittelt, der sich aus der Subtraktion des projektinduzierten Umsatzes abzüglich der variablen Kosten des Projektes ergibt [GEN94].

Worauf ist bei der Entwicklung von Kennzahlen zu achten? Messgrößen von Prozessen und die Überführung der Messgröße in Kennzahlen einschließlich deren Gewichtung ermöglichen eine Prozessbeurteilung. Es ist notwendig, dass jede Kennzahl mit einer Vorgabe oder einem Ziel verbunden ist, was jeweils von der Aufgabe abhängig ist. Folgende Anforderungen und Kriterien sind zu berücksichtigen: Zweck-eignung, Genauigkeit, Aktualität und Verfügbarkeit sowie Kosten-Nutzen-Relation. Die Zweckeignung bezieht sich auf die Güte der Kennzahl und ihre Eignung, die

gestellte Aufgabe zu lösen. Die Genauigkeit zeigt an, wie präzise die Informationswiedergabe ist. Bezüglich Aktualität und Verfügbarkeit ist es wichtig, Kennzahlen so schnell wie möglich zu bilden und sofort zur Verfügung zu stellen. Die Kosten-Nutzen-Relation stellt den Aufwand der Erhebung dem Nutzen gegenüber [DGQ99, MEY76]. Kamphausen zeigt, dass für technologieorientierte Aussagen vielfältige Kennzahlenansätze existieren, die teilweise speziell auf bestimmte Arbeitsgebiete bezogen sind, branchenabhängig definiert werden oder einen Umweltbezug haben [KAM98]. Beispielsweise werden Werkstoffkennzahlen ($K_w = \text{Summe Abfälle/Werkstoff}$) oder Bauteilkennzahlen ($K_{bt} = \text{Summe Abfälle/Bauteil}$) eingesetzt [HUN00]. Weiterhin sind Führungskennzahlensysteme entwickelt worden, die der Unternehmensleitung eine differenzierte Analyse des Erfolges nach finanziellen und nicht finanziellen Ergebnisgrößen liefern. Hier gibt es eine Bewertung in einer Total Quality Management-Umgebung, die beispielsweise die folgenden Kennzahlen beinhaltet [KAM98]:

Kundenzufriedenheitsindex:
$$KZI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i * Z_i$$

mit Z = Merkmalspezifische Zufriedenheitsurteil, g = Merkmalspezifische Gewicht und i = Leistungsmerkmal ($i=1,2,\dots,n$).

Prozesswirkungsgrad:
$$W_p = \frac{NL}{NL + BL + STL + FL}$$

mit W_p = Prozesswirkungsgrad ($0 < W_p < 1$), NL = Nutzleistung, STL = Stützleistung, BL = Blindleistung und FL = Fehlleistung.

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zur Optimierung der Produktentstehung kommen heute in der Industrie eine Reihe von Strategien und Methoden zur Anwendung. Sie unterstützen Entwicklungsschritte, angefangen von der ersten Produktidee bis hin zum fertigen Entwurf eines serienreifen Produktes. Bei makroskopischen Produkten ist der Einsatz von entwicklungsbegleitenden Systemen schon Standard; dagegen sind für die Produkt- und Fertigungsprozessentwicklung von mikrotechnischen Produkten nur wenige Ansätze vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine gezielte Vorgehensweise zur Unterstützung der Systematisierung des Entwicklungsvorgangs, insbesondere in der Mikrotechnologie, geschaffen werden.

Die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der Produktentstehung von mikrotechnischen Produkten. Dabei sollen die Besonderheiten, die für die Mikrotechnologie gelten, wie z.B. die ausreichende Abstimmung der Entwurfs- und Fertigungskriterien, im Vordergrund stehen. Es erfolgt einerseits die Bewertung der Güte des Produktentwurfs, andererseits wird die Güte der zur Herstellung des Produktes eingesetzten Fertigungstechnologien ermittelt. Mittels einer Kombination aus verschiedenen Modulen, die jeweils unterschiedliche Elemente eines Produktes repräsentieren, werden mehrere Produktvarianten definiert. Zur Charakterisierung der Entwurfskriterien werden Simulationen eingesetzt, die auf Grund der erzielten Ergebnisse beurteilt werden. Dabei kommen zusätzlich Kennzahlen zum Einsatz, deren Berechnung zur Unterstützung der Bewertung erfolgt. Mit einer Analyse der verwendeten Prozesse sollen die Fertigungskriterien hinsichtlich der Technologie-Komplexität beurteilt werden. Hierzu sollen die einzelnen Schritte charakterisiert und ebenfalls eine Kennzahlenberechnung durchgeführt werden. Alle Entwicklungsdaten werden in Formblättern (Tabellen und Matrizen) dargelegt.

Ziel dieser Arbeit ist es, alle während des Entwicklungsprozesses definierten Produktvarianten vergleichend zu beurteilen und einen optimierten Produktentwurf auszuwählen. Darüber hinaus soll die zu erarbeitende Methode die Definition, Bewertung und Auswahl von Produktvarianten innerhalb des Produktentstehungsprozesses mittels Computerunterstützung ermöglichen. Abschließend wird die computerunterstützte Methode im Rahmen einer Fallstudie zur Entwicklung eines Wirbelstromsensors als Beispiel für ein mikrotechnisches Produkt validiert. Da die Vorgehensweise der Methode durch eine gezielte Varianten-Bewertung an die Besonderheiten der Mikrotechnologie angepasst wird, sollen die Ergebnisse dieser Arbeit einen Beitrag zur Unterstützung bei der Entwicklung mikrotechnischer Produkte leisten.

4 Vorgehensweise

Die aus der Aufgabenstellung und Zielsetzung abgeleitete Vorgehensweise zur Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der Produktentstehung von mikrotechnischen Produkten zeigt Bild 4.1.

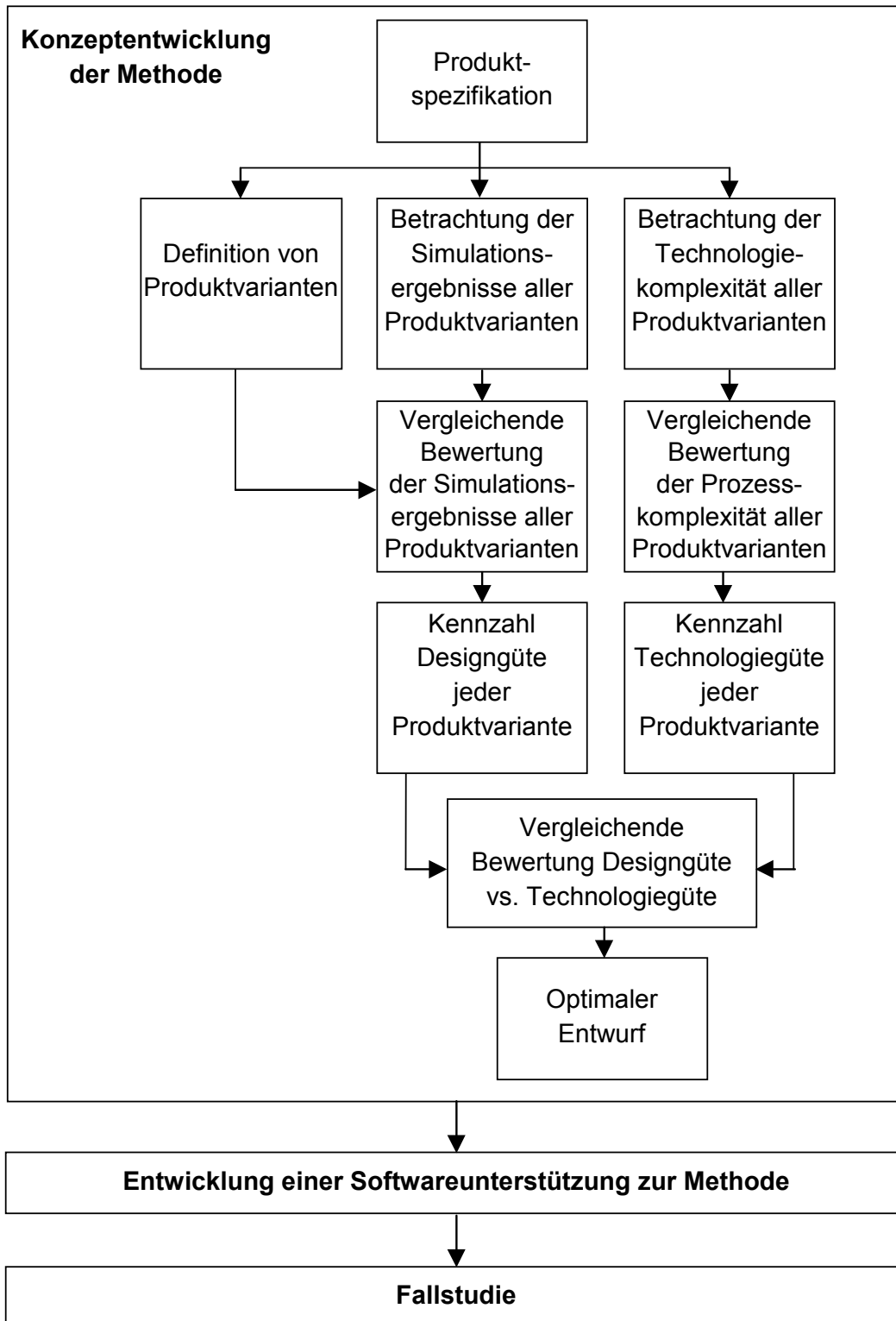


Bild 4.1: Vorgehensweise der Methode

Die Vorgehensweise gliedert sich in die drei Bereiche Konzeptentwicklung der Methode, Entwicklung einer Softwareunterstützung zur Methode und Fallstudie. Die Definition von Produktvarianten ist die Grundlage der Konzeptentwicklung. Sie bildet die Ausgangsbasis für alle weiteren Schritte. Ferner sind die Design- und Technologiebetrachtungen zur Beurteilung der Güte des Entwurfs von zentraler Bedeutung, welche die Schwerpunkte der Arbeit darstellen. Da bei der Produktentwicklung in den Bereichen Definition und Beurteilung viele Daten entstehen und weiter verarbeitet werden müssen, ist eine strukturierte Handhabung und Ablage erforderlich. Hierfür werden Formblätter wie z.B. Tabellen und Matrizen verwendet. Darüber hinaus soll ein Kennzahlensystem geschaffen werden, das eine vergleichende Bewertung bzgl. des Designs und der Fertigungstechnologien gestattet.

Ausgangsbasis der Konzeptentwicklung ist die Spezifikation (Pflichtenheft) des zu entwickelnden Produkts. Auf Grund dieser Daten sollen mehrere Produktvarianten (verschiedenen Alternativen eines Produkts) definiert werden und die Produktdaten auf geeignete Weise erfasst werden. Die Erfassung der Eigenschaften dieser verschiedenen Varianten soll – wie in der Mikrotechnik üblich – mittels Simulation erfolgen. Hierzu liefert der zu entwickelnde Prozess keinen Beitrag. Er soll aber die Simulationsergebnisse in geeigneter Weise erfassen, da diese Daten im Laufe des weiteren Prozesses benötigt werden. Die Güte des Designs jeder Produktvariante soll beurteilt werden, in dem die durch die Simulation vorhergesagten Leistungsdaten mit den vorgegebenen Spezifikationswerten verglichen werden. Dabei soll ein Kennzahlensystem dazu dienen, die Designgüte jeder Produktvarianten vergleichend auszudrücken. Um die Komplexität der Fertigungstechnologie zu erfassen, muss zunächst für jede betrachtete Produktvariante die jeweilige Fertigungsprozessfolge festgelegt werden. Auch dieser Schritt soll außerhalb des hier behandelten Prozesses erfolgen. Die so ermittelten Daten sollen als Ausgangspunkt für eine vergleichende Bewertung der Prozesskomplexität aller Produktvarianten dienen. Auch hier soll das bereits erwähnte Kennzahlensystem Aussagen liefern, wie komplex der jeweilige Fertigungsprozess ist. Den Abschluss der Konzeptentwicklung soll eine vergleichende Bewertung von Designgüte und Technologiegüte bilden. Der optimale Entwurf zeichnet sich durch die beste Kombination von Entwurfs- und Technologiekriterien aus.

Im Anschluss an die Konzeptentwicklung der Methode soll die Entwicklung einer Softwareunterstützung erfolgen, die einen Beitrag zur Handhabbarkeit der Methode hinsichtlich des Datenmanagements liefert. Mit Hilfe einer handelsüblichen Software sollen Bedienungsoberflächen geschaffen werden, welche die Benutzer durch die Methode führen und die benötigten Tabellen und Matrizen generieren. Die Anwendung der Methode soll zum Schluss im Rahmen einer Fallstudie in der computergestützten Form validiert werden, wobei als Demonstrator ein Wirbelstromsensor dienen soll.

5 Zielorientierte Varianten-Findung – ZVF

Aus den Ausführungen im Stand der Kenntnisse wird deutlich, wo die Schwerpunkte einer mikrotechnischen Entwicklung liegen: In der Betrachtung ihrer Design- und Technologieaspekte. In diesem Kapitel wird zunächst die Entwicklung der Methode hergeleitet und ihre Vorgehensweise erläutert. Diese Methode soll als zielorientierte Varianten-Findung (ZVF) bezeichnet werden. Die computerunterstützte Anwendung und die Validierung der Methode im Rahmen einer Fallstudie wird anschließend in den Kapiteln sechs und sieben dargestellt.

5.1 Struktur der ZVF

Im Folgenden werden Struktur und Ablauf der Methode dargestellt. Auf Grund der erforderlichen Produktbeschreibung und der Berücksichtigung von design-relevanten und technologierelevanten Aspekten setzt sich die Methode aus drei Bereichen zusammen, die diese Punkte repräsentieren (Bild 5.1).



2005 imt 5012-020

Bild 5.1: Struktur der zielorientierten Varianten-Findung

Ausgangsbasis ist die Erfassung und Definition der verschiedenen Produktvarianten, die im Rahmen dieses Prozesses verglichen werden sollen. Der nächste Bereich dient der Beurteilung des Designs, zu der die Simulationsergebnisse

herangezogen werden. Hierbei liefern die Spezifikationswerte die Eingabe (Input) für die Simulationen. Die erzielten Ergebnisse (Output) werden anschließend für eine vergleichende Betrachtung der Varianten verwendet. Zur Beurteilung der Technologie wird der Prozessablauf zur Fertigung des Produktes betrachtet. Die vergleichende Beurteilung der Technologie-Komplexität bildet den dritten Bereich der Methode. Somit ist die Struktur der zielorientierten Varianten-Findung festgelegt. Zur Unterstützung der Beurteilung der Produktvarianten werden das Design und die Technologie mittels Kennzahlen vergleichend bewertet.

Der Ablauf des Entstehungsprozesses spielt bei der Entwicklung mikro-technischer Produkte eine tragende Rolle. Um zu erarbeiten, wie sich ein Produktenstehungsprozess am besten durch einen geeigneten Prozess gestalten lässt, wird zunächst der Ablaufplan zur Entstehung eines mikrotechnischen Produktes des Instituts für Mikrotechnologie der Universität Hannover betrachtet. Er dient zur Aufnahme des Ist-Zustandes für die Entwicklung mikrotechnischer Bauteile.

5.2 Einbindung der ZVF in den Entwicklungsprozess

Den Ablaufplan zur Entstehung eines mikrotechnischen Bauteils (in Dünnschichttechnik aufgebaut) zeigt Bild 5.2. Der Entwicklungsablauf beginnt mit der Zusammenstellung der Spezifikationen, aus denen ein Konzept für das künftige Produkt zu erstellen ist. Im nächsten Schritt wird ein Modell erarbeitet, bei dem bereits Entwicklungsaspekte hinsichtlich des Designs zu berücksichtigen sind. Diese fließen mit Hilfe von Design Rules ein. Zur Überprüfung des Produkts erfolgt eine Abbildung des Produkts als Modell und eine Bestimmung der Produkteigenschaften durch Simulation. Auf Grund dieser Untersuchungen liegen anschließend erste Ergebnisse vor. Alle bisher zu berücksichtigenden Aspekte werden nun in einem Design Review überprüft. Parallel dazu wird ein Konzept für die zu verwendenden Fertigungstechnologien erstellt. Der Prozessplan und die Verknüpfbarkeit der zur Fertigung erforderlichen technologischen Schritte sind nach ihrer Darlegung sorgfältig zu untersuchen. Dieses findet im Rahmen eines Prozess Reviews statt.

Bestätigen die Reviews die bisherigen Entwicklungsschritte als den Vorgaben entsprechend durchgeführt, so wird für den Entwurf eine Freigabe erteilt. Die Freigabe ist die Voraussetzung dafür, dass der Maskenentwurf initiiert werden kann. In Folge dessen sind die Fertigungsschritte des Produktes festgelegt. Liegt ein vollständig geprüfter Maskenentwurf vor, so kann mit der Maskenfertigung begonnen werden. Mit dem nächsten Schritt setzt die Technologieentwicklung ein. Zunächst ist zu überprüfen, ob alle Technologieschritte im Unternehmen vorhanden sind. Häufig liegt eine Mischung aus unterschiedlichen Prozessreife vor. Einerseits werden bereits etablierte Prozesse verwendet, andererseits sind Prozesse im Einsatz, die noch einer Nachentwicklung bedürfen.

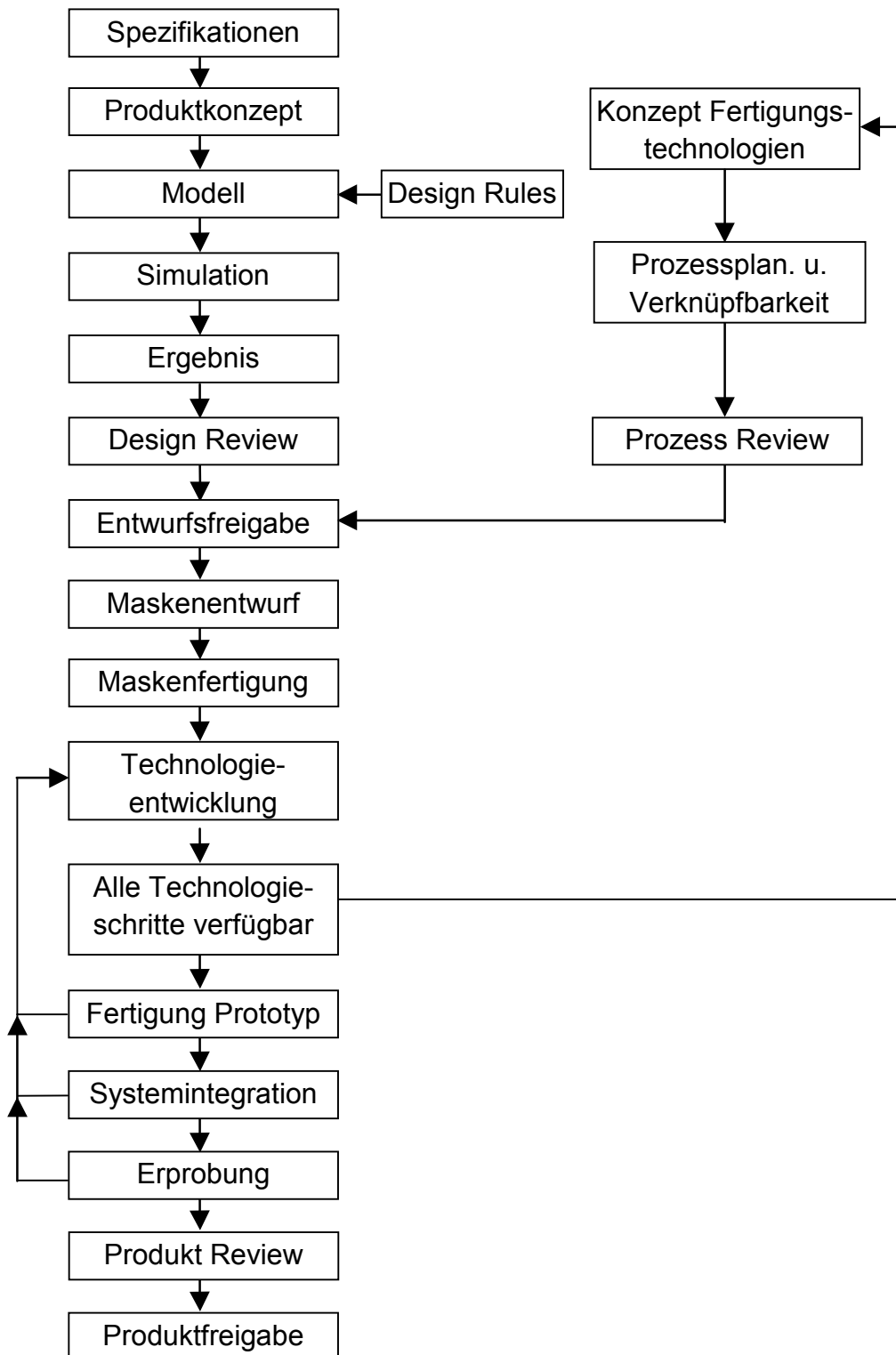


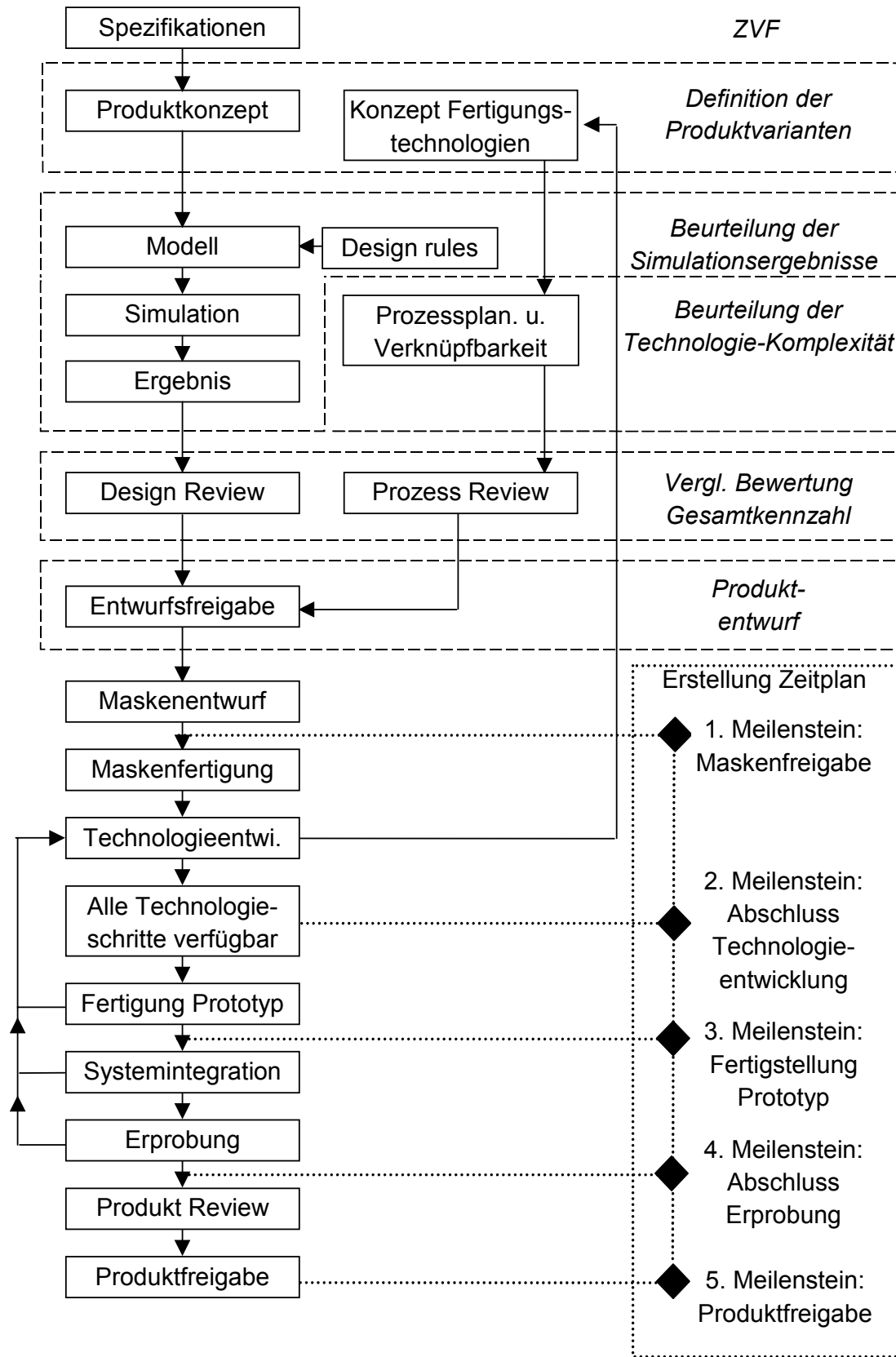
Bild 5.2: Ablaufplan zur Entstehung eines mikrotechnischen Produktes des Instituts für Mikrotechnologie der Universität Hannover

Die Überprüfung der Technologieschritte zieht ggf. einen Rücksprung in das Konzept der Fertigungstechnologien nach sich. Im Extremfall ist ab hier ein Neuentwurf notwendig. Es kann nun die Fertigung eines Prototyps erfolgen, für den eine Systemintegration durchgeführt wird. Anschließend findet eine Erprobung statt. Die genannten drei Schritte – Fertigung des Prototyps, Systemintegration und Erprobung – sind u. U. an die Entwicklung anzupassen und haben möglicherweise dann einen Rücksprung zur Technologieentwicklung zur Folge. Der vorletzte Schritt des Entwicklungsablaufes ist das Produkt Review. Es dient zur Beurteilung des gesamten Produktes. Wird hier ein positives Ergebnis erzielt, d.h. durch die Entwicklungsschritte können die Produktvorgaben erreicht werden, so resultiert daraus die Produktfreigabe.

Dieser Ablaufplan des Instituts für Mikrotechnologie zur Entstehung eines mikrotechnischen Produktes nimmt die Vorgehensweise der zielorientierten Varianten-Findung als Basis. Hierbei wird der eigentliche Prozess zum Finden eines Optimums aus Design- und Technologieanforderungen durch eine Terminverfolgung ergänzt. Bild 5.3 zeigt die Vorgehensweise der ZVF und den sich anschließenden Meilensteinplan. Die gestrichelten Elemente lassen erkennen, an welchen Stellen die ZVF zum Tragen kommt: Beim Produktkonzept, beim Modell, beim Prozessplan, bei Design und Prozess Review und bei der Entwurfsfreigabe. Das Produktkonzept und das Konzept für die zu verwendenden Fertigungstechnologien entsprechen bei der ZVF der Definition von Produktvarianten.

Der Abschnitt von Modellerstellung bis zu den Ergebnissen aus den Simulationen bezieht sich auf die Beurteilung der Simulationsergebnisse. Entsprechend dazu werden der Prozessplan und die Verknüpfbarkeit der zur Fertigung erforderlichen technologischen Schritte geprüft, was bei der ZVF der Beurteilung der Technologie-Komplexität entspricht. Die Reviews für Design und Prozess bzgl. der bisherigen Entwicklungsschritte entsprechen der Berechnung der Gesamtkennzahl. Liegt für den imt-Ablaufplan die Entwurfsfreigabe vor, ist die ZVF mit der Auswahl des optimierten Produktentwurfs abgeschlossen.

Mit Beginn des Maskenentwurfs kann ein Zeitplan erstellt werden. Dies setzt voraus, dass die Entwicklung von evolutionärer Natur ist, die somit planbar ist [GAT98]. Für eine revolutionäre Entwicklung ist dies jedoch nicht gegeben, solch eine Entwicklung ist nicht planbar. Die terminliche Verfolgung ist durch die gepunkteten Linien dargestellt. Verläuft die Überprüfung des Maskenentwurfs positiv erfolgt die Maskenfreigabe, die den ersten Meilenstein darstellt. Zweiter Meilenstein ist Abschluss der Technologieentwicklung, dritter Meilenstein Fertigstellung des Prototypen und vierter der Abschluss der Erprobung. Der fünfte und letzte geht mit der Produktfreigabe einher.



2005 imt 5012-022

Bild 5.3: imt-Ablaufplan in Kombination mit der ZVF und einem Meilensteinplan

5.3 Definition der Produktvarianten

Ein Produkt setzt sich aus mehreren Modulen zusammen. Diese Module und ihre verschiedenen Ausführungen (Varianten eines Moduls) werden in der Modul-Tabelle detailliert beschrieben. Die Produktvarianten, die entstehen sollen, definieren sich jeweils durch die Auswahl bestimmter Module für eine Variante. Den Ansatz, der zur Definition der Produktvarianten durchzuführen ist, beinhaltet Bild 5.4. Die Hauptelemente werden durch die Modul-Tabelle (s. Kapitel 5.3.1) und die Konfigurations-Matrix (Kapitel 5.3.2) repräsentiert. In dem Element *Notwendige Module* sind alle für das Produkt erforderlichen Module zusammengefasst. Sollte für eine Produktentwicklung keine geeignete Modulausführung im Spektrum (alle Module sind in der Modul-Tabelle dargestellt) vorhanden sein, ist sie durch eine Neukonfiguration zu ergänzen. Die Beschreibungen der Produktvarianten aus verschiedenen Modulen werden später in Form von unterschiedlichen Varianten in der Konfigurations-Matrix aufgelistet. Zu diesem frühen Zeitpunkt der Produktentwicklung wird durch die Verwendung von Modulen ein flexibler Aufbau des Produktes geschaffen, wodurch Transparenz in der Entwicklung entsteht. Gleichzeitig ist dadurch die angestrebte Baukastenstruktur für die Produktentwicklung realisiert. Die Daten der entstandenen Produktvarianten dienen im Verlauf der Methode als Basis für die weitere Entwicklung.

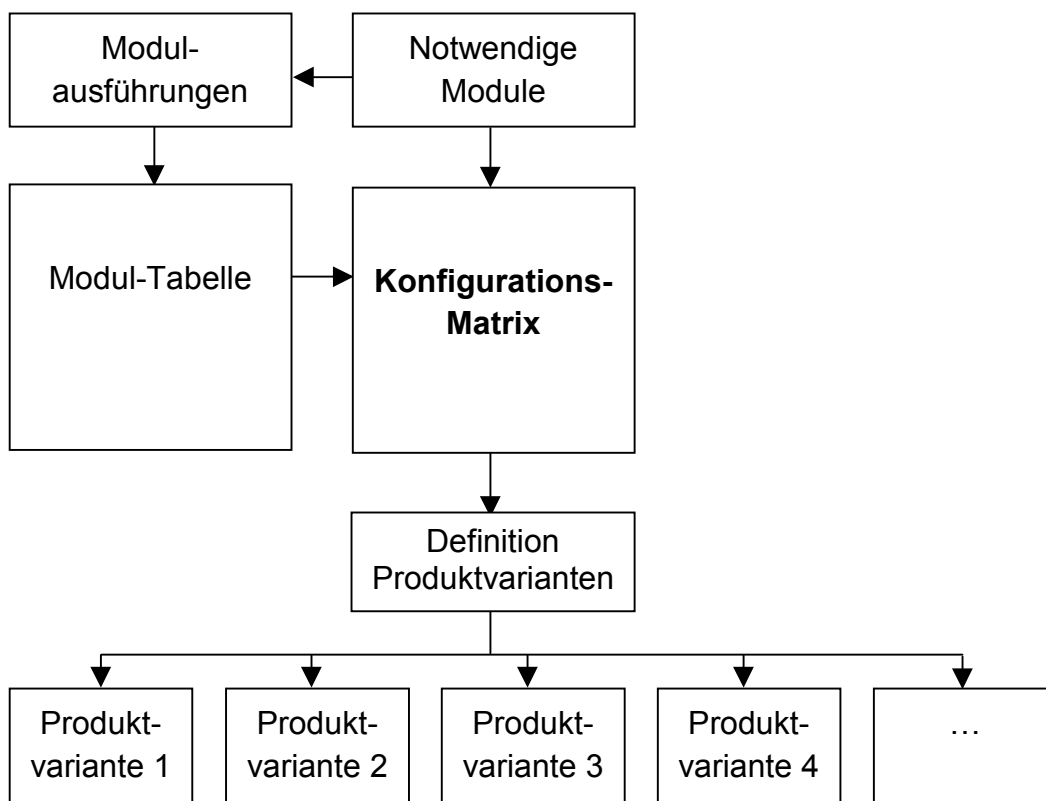


Bild 5.4: Definition der Produktvarianten

5.3.1 Modul-Tabelle

Zunächst muss erarbeitet werden, wie die Elemente eines Produktes durch entsprechende Module abzubilden sind. Hierfür ist jedes Modul in verschiedenen möglichen Varianten (Modulausführungen) hinsichtlich seiner Spezifikationen wie Abmessungen, Werkstoff, usw. dargestellt. Mit Hilfe der Angaben zu verschiedenen Modulausführungen in der Modul-Tabelle (Tabelle 5.1) ist der Aufbau mehrerer Produktvarianten zu bestimmen. Grundsätzlich sind dabei die Module untereinander austauschbar (beispielsweise Modul A: Version 1 oder Version 2,...).

Der modulare Aufbau ist von Vorteil, da schnell mehrere Lösungsvarianten zusammengestellt werden können. Dies begründet sich einerseits dadurch, dass die Modul-Tabelle über standardisierte Module verfügt und andererseits mit neu definierten Modulen erweitert werden kann. Die Zusammenstellung der Lösungsvarianten wird durch die Entwickler oder durch entsprechend im Fachgebiet erfahrenen Experten getroffen. Die Modul-Tabelle liefert dabei ein umfangreiches Modulspektrum und fungiert als Ausgangsbasis für die Konfigurations-Matrix.

Tabelle 5.1: Modul-Tabelle

Module	Name	Abmessungen				Weitere Spezifikationsangaben	
		Ab.1	Ab.2	Ab.3	...	Sp.1	...
Modul A1	Alpha	x μm	y μm	...		Werkstoff	..
Modul A2	Alpha	...	...	...	...	...	...
Modul A3	Alpha	...	...	...	...	...	...
Modul B1	Beta	z μm}	...	...	...	...	...
Modul B2	Beta	...	...	...	...	...	...
...

5.3.2 Konfigurations-Matrix

Die Vorgehensweise zur Definition der Produktvarianten bzw. der Beschreibung ihrer Konfiguration aus verschiedenen Modulen und ihre Abbildung in der Matrix zeigt Bild 5.5. In der linken Hälfte des Bildes sind verschiedene Module in vertikaler Anordnung zu erkennen (A1, B1, C1, D1,...). Die von einander abweichenden Ausführungen der jeweiligen Module (A1, A2, A3, ...) werden horizontal aneinander gereiht. Aus ihnen werden gezielt Modulausführungen ausgewählt und in die rechte Bildhälfte übertragen. Dort ist die Definition der Produktvarianten dargestellt, wobei jeweils eine Variante in einer einzelnen Spalte beschrieben ist.

Tabelle 5.2 zeigt ein Beispiel einer Konfigurations-Matrix. Wie viele Zeilen benötigt werden bestimmt die Anzahl der Module aus denen ein Produkt besteht. Die Anzahl der benötigten Spalten bestimmt die Anzahl der untersuchten Produktvarianten. Die Größe der Konfigurations-Matrix hängt einerseits von der Komplexität des Produkts (Anzahl der Module) und andererseits von der Anzahl der Produktvarianten ab.

Tabelle 5.2: Konfigurations-Matrix

Produktvariante	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	...
Modul A	A2	A1	A2	A3	A1	...
Modul B	B1	B1	B2	B2	B3	...
Modul C	C1	C3	C3	C2	C3	...
Modul D	D2	D1	D3	D2	D1	...
Modul E	E3	E2	E3	E1	E2	...
...

Eine große Anzahl von Produktvarianten bietet einerseits den Vorteil eines großen Potenzials an Optimierungsmöglichkeiten, wobei zusätzlich eine hohe Anzahl von Varianten die Wahrscheinlichkeit begünstigt, geeignete Lösungen zu finden. Andererseits steigt damit die Komplexität der gesamten Entwicklung.

Nach Erarbeitung der Konfigurations-Matrix erfolgt eine Überprüfung der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des Produktes durch ein Expertenteam. Die ausführliche Untersuchung hinsichtlich der geforderten Leistungsfähigkeit des Produktes erfolgt durch Simulationen im weiteren Verlauf der Entwicklung. Diese wird später bewertet und mittels einer Kennzahl dargestellt. Das Expertenteam besteht aus Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, die alle dem Bereich Entwicklung angehören. Ihnen bietet sich durch eine zusätzliche Matrix (Tabelle 5.3) die Möglichkeit, das Zusammenwirken der Module und damit die Funktionsfähigkeit des Produktes zu bewerten. Dies ist besonders wichtig, wenn Module neu konfiguriert worden sind. Die erste Zeile und die erste Spalte der Matrix beschreiben jeweils den Aufbau des Produktes aus seinen Modulen. Die darin enthaltenen Modulkombinationen werden durch die folgenden Zeichen beurteilt: positiv (+), negativ (-) oder neutral (O). Negative Kombinationen von Modulen liegen dann vor, wenn sich mindestens zwei Module gegenseitig negativ beeinflussen. Da dies nicht immer frühzeitig erkennbar ist, soll in jedem Fall die Auswahl in der Form überprüft werden, dass eine bestimmte Art des Vergleichs durchgeführt wird. Dazu werden alle Module einer Produktvariante vollständig miteinander verglichen.

Tabelle 5.3: Matrix zur Überprüfung der Kombinationsfähigkeit von Modulen einer Produktvariante

	A 1	B 1	C 2	D 3	E 4	...
A 1		O	+	+	O	...
B 1			+	O	+	...
C 2				O	O	...
D 3					+	...
E 4						...
...						

Als Vorgehensweise dient hier der paarweise Vergleich, bei dem gleichzeitig immer zwei Module betrachtet werden. Die Überprüfung der Kombinationsfähigkeit von Modulen mit Hilfe der Tabelle und der ggf. daraufhin initiierte Modulaustausch sind so lange fortzusetzen, bis keine negativen Beurteilungen mehr vorliegen und ausschließlich zweckmäßige Modulkombinationen vorhanden sind. Auf Grund der Ergebnisse kann die Konfigurations-Matrix, sofern dies erforderlich ist, überarbeitet werden. Sie dient der weiteren Entwicklung als Basis.

Hiermit ist der erste von drei Hauptbereichen (Bild 5.1), in die sich der Entwicklungsprozess gliedert, abgeschlossen. Hiermit wurde eine Basis für die mikrotechnische Produktentwicklung geschaffen. Die weitere, systematische Vorgehensweise sieht vor, im nächsten Abschnitt zur Bestimmung der Designgüte eine Beurteilung der Simulationsergebnisse zur erarbeiten, an die sich später die Bestimmung der Technologiegüte durch Beurteilung der Technologie-Komplexität anschließt. Um die Parallelität der Produkt- und Prozessentwicklung voranzutreiben, sollen die nächsten Schritte möglichst zeitgleich angegangen werden. Daher kann mit Beginn der Simulationen von einzelnen Produktvarianten gleichzeitig eine erste Abschätzung für die anstehende Prozessentwicklung und die damit einhergehenden zu verwendenden Technologieschritte erfolgen.

5.4 Beurteilung des Designs

Die Entwicklung des Designs für den Produktentwurf muss in der Lage sein, das Produkt auf theoretischem Weg – also zunächst ohne reale Prototypen – zu erarbeiten. Dies geschieht durch Modellierung und Simulationen. Mittels der Ausführung von Simulationen und durch die Beurteilung der entstandenen Simulationsergebnisse wird ein Rückschluss auf die Eignung der Produktvariante möglich. Hierbei wird überprüft, ob die jeweilige Variante die geforderten Spezifikationen erfüllt. Ziel dieses Entwicklungsbereiches ist die Beurteilung der Güte der Produkt-

varianten hinsichtlich ihres Designs. Die erforderlichen Schritte, die hier durchzuführen sind, zeigt Bild 5.6.

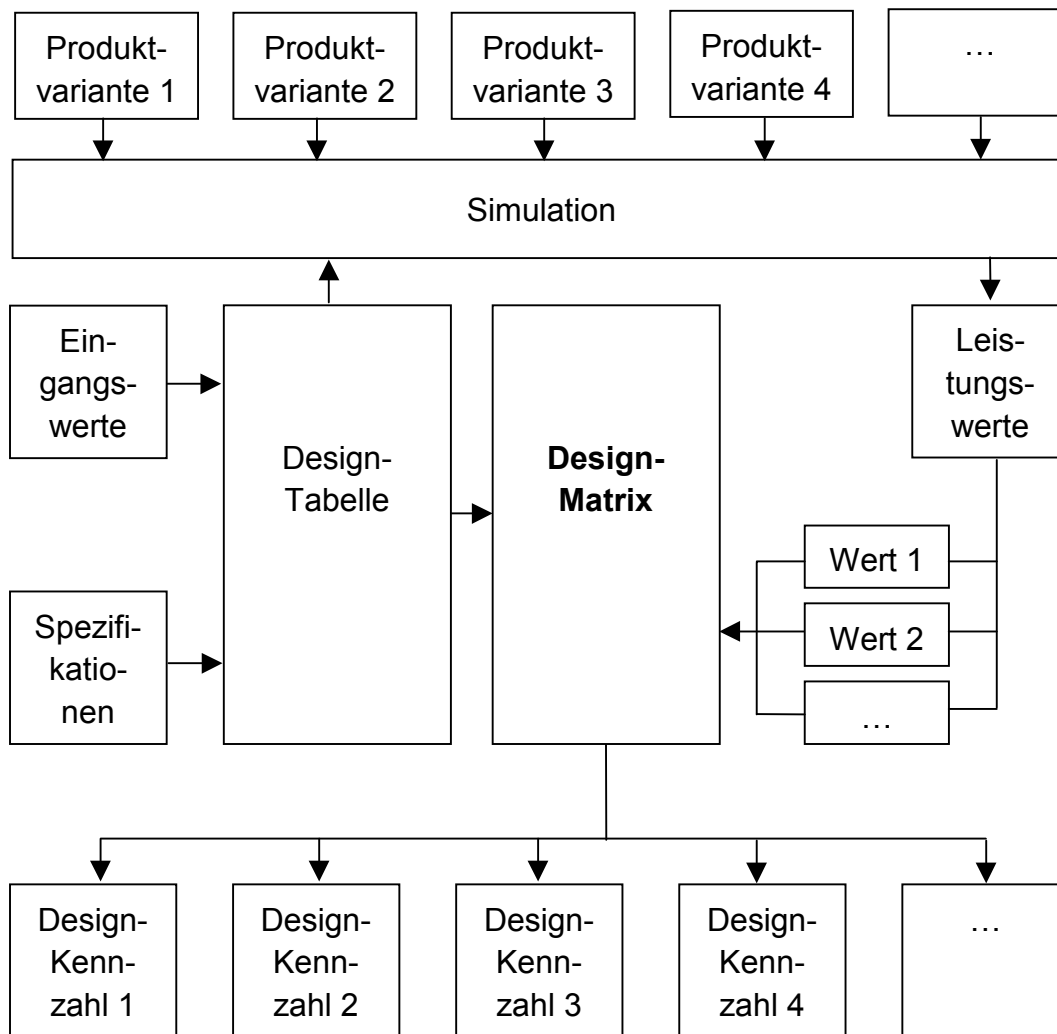


Bild 5.6: Schritte zur Beurteilung der Designgüte

Die Ausgangsbasis bilden die in der Konfigurations-Matrix definierten Produktvarianten, die nun hinsichtlich des Produkt-Designs weiter zu verarbeiten sind. Die zwei Hauptelemente stellen Design-Tabelle und Design-Matrix (Formblätter) dar. Als ersten Schritt durchlaufen die Varianten mehrere Simulationen. Diese liefern einen Erkenntnisgewinn über das Verhalten der Produktvariante. So können umfassend die jeweiligen Eigenschaften der Variante ermittelt werden. Die Ausführung der Simulationen ist nicht originärer Bestandteil der Methode und findet daher separat statt. Es werden ausschließlich die Eingangs- und Ausgangsparameter der Simulationen für die zielorientierte Varianten-Findung berücksichtigt.

Die Simulationen werden für jede Produktvariante entsprechend der unterschiedlichen Module mit den anzuwendenden Betriebsparametern durchgeführt. Die hierzu erforderlichen Betriebsparameter (Eingangswerte der Simulationen) und Spezifikationswerte sind durch Experten zu definieren und in der Design-Tabelle ab-

zulegen. Anschließend werden die Ergebnisse (die erreichten Leistungswerte) ausgewertet. Die erzielten Leistungswerte gehen hinterher zur weiteren Verarbeitung an die Design-Matrix. Nach mehreren Bewertungs- und Rechnungsschritten durch ein Expertenteam werden entscheidungsunterstützende Kennzahlen für jede Produktvariante errechnet. Die so ermittelten Kennzahlen sind ebenfalls in der Design-Matrix dargestellt.

5.4.1 Design-Tabelle

Für diesen Teil des Entwicklungsbereiches setzt sich das Team nur Spezialisten des Arbeitsgebietes *Simulation* zusammen. Diese wählen geeignete Eingangswerte für einzelne Simulationsläufe aus. Die Eingangswerte werden im Vorfeld (vor den Simulationen) in Design-Tabellen (Tabelle 5.4) abgelegt.

Tabelle 5.4: Design-Tabelle

Eingangswerte	Spezifikationswert	Simulation	Simulation	Simulation	...
EW_i	S_{EW_i}	X_{jEW_i}	X_{jEW_i}	X_{jEW_i}	...
EW_1	S_{EW_1}				...
EW_2	S_{EW_2}				...
EW_3	S_{EW_3}				...
EW_4	S_{EW_4}				...
EW_5	S_{EW_5}				...
...

Für jede Produktvariante wird jeweils eine eigene Design-Tabelle angelegt, da prinzipiell die Spezifikationswerte für jede Variante variieren können. Sie beinhaltet die verschiedenen Eingangswerte [EW_i], die Spezifikationswerte [S_{EW_i}] und die Eingangswerte [$X_{jEW_i,j}$] für die jeweilige Simulation (auf Basis des Spezifikationswertes variiertes Wert). Jeder Simulationslauf ist durch eine Spalte repräsentiert. Werden zusätzlich weitere Werte und Angaben wie z.B. Abmessungen oder Werkstoffe für die Simulation benötigt, so sind diese aus der Modul-Tabelle zu entnehmen.

5.4.2 Design-Matrix

Die Design-Matrix stellt eine Entscheidungs-Matrix dar, um im Rahmen der Entwicklung die Produktvarianten vergleichend zu beurteilen. Hierfür erfolgt zunächst die Modellierung der Produktvarianten. Diese Modelle werden anschließend mit Daten aus den erstellten Design-Tabellen simuliert. Für mikrotechnische Produkte werden üblicherweise an dünnfilmtechnische Aspekte angepasste FEM-Simulationen angewendet. Die Design-Matrix zeigt die Leistungswerte (Ergebnisse aus den Simu-

lationen). Sie ist wie folgt strukturiert (Tabelle 5.5): Die Zeilen (bis auf die letzte Zeile) beschreiben die verschiedenen Leistungswerte $[LW_i]$. Die zweite Spalte zeigt den Spezifikationswert $[S_{LW_i}]$, der auf Grund der eingestellten Eingangswerte erreicht werden soll. Jede weitere Spalte repräsentiert den „besten“ Leistungswert $[Y_{jLW_i}]$ (aus allen durchgeführten Simulationen von einer Variante) für jede Produktvariante. Dieser Wert sollte mit dem Spezifikationswert identisch sein, da eine Abweichung die Güte der Variante mindert. Die letzte Zeile zeigt die Design-Kennzahlen $[D_i]$.

Tabelle 5.5: Design-Matrix

Leistungs- werte	Spezifi- kations- wert	Variante 1 (Ergebnis)	Variante 2 (Ergebnis)	Variante 3 (Ergebnis)	Variante 4 (Ergebnis)	...
LW_i	S_{LW_i}	Y_{jLW_i}	Y_{jLW_i}	Y_{jLW_i}	Y_{jLW_i}	...
LW_1	S_{LW_1}					...
LW_2	S_{LW_2}					...
LW_3	S_{LW_3}					...
LW_4	S_{LW_4}					...
LW_5	S_{LW_5}					...
...
Design-Kennzahl (D_i)		D_1	D_2	D_3	D_4	...

Werden von einer Produktvariante ein oder mehrere der vorgegeben Eigenschaften (Zielgrößen) nicht erreicht, so liegt eine Spezifikationsuntererfüllung vor, wodurch diese Variante unbrauchbar ist. Dies gilt ebenso für den umgekehrten Fall. Denn sollten die Spezifikationswerte extrem überschritten werden (Spezifikationsübererfüllung) muss davon ausgegangen werden, dass keine optimale Variante vorliegt, weil beispielsweise einige Module stark überdimensioniert sind, kann die Gesamtfunktion darunter leiden.

Darüber hinaus steht ein starkes Überschreiten der Spezifikationswerte häufig auch in direktem Zusammenhang mit hohen Kosten und zusätzlichen Herausforderungen an die Fertigbarkeit. Hier muss grundsätzlich eine detaillierte Betrachtung durch Experten erfolgen, um die Entscheidung für eine Fortsetzung oder ein Beenden der Entwicklung dieser Variante zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Entscheidung, aber auch generell alle Entwicklungsergebnisse sind detailliert zu dokumentieren. Dazu gehören auch die Daten von ungeeigneten Varianten sowie die Gründe für bestimmte Entscheidungen innerhalb der Entwicklung, die zu brauchbaren oder auch unbrauchbaren Teillösungen führen. Dies soll bei späteren Entwicklungen helfen und gezielt Entscheidungshilfen bieten.

Eine wesentliche Entscheidung, die durch die Design-Matrix getroffen werden soll, ist die Rangfolge der Produktvarianten auf Grund ihrer Spezifikationserfüllung. Diese Rangfolge wird durch die Bestimmung der Kennzahlen und der späteren Berechnung der Gesamtkennzahl einschließlich der Beurteilung der Technologiegüte festgelegt.

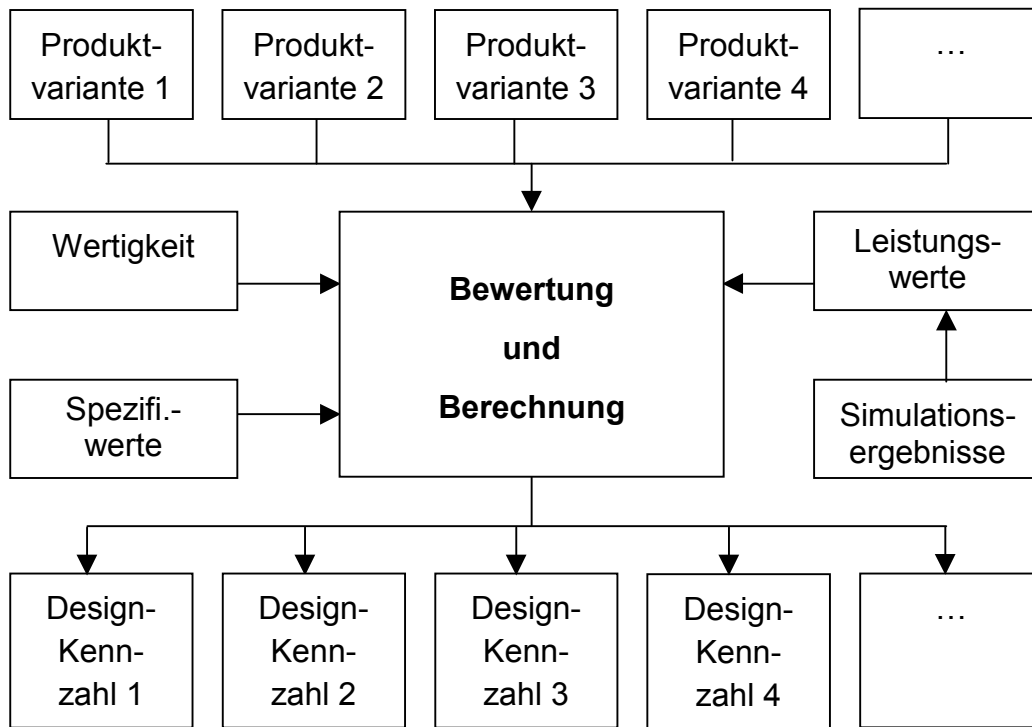
5.4.3 Design-Kennzahlen

Um die Ergebnisse aus den Simulationen (die erreichten Leistungswerte) beurteilen zu können, ist es notwendig, das Expertenteam zu erweitern. Bisher waren an diesem Teil des Entwicklungsprozesses nur Teammitglieder aus dem Arbeitsgebiet *Simulation* beteiligt. Nun wird das Team durch Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen aus den Arbeitsgebieten *Entwicklung* und *Fertigung* ergänzt. Entscheidend ist, dass der Wissensbedarf für die Entwicklung durch Experten abgedeckt ist, die Ergebnisse in Zusammenhang bringen und bewerten können.

Die Design-Kennzahl wird pro Produktvariante mit Hilfe der Design-Kennzahltablette errechnet. Um sie zu bestimmen, ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Simulationen mit den jeweiligen vorgegebenen Spezifikationswerten (Zielgrößen) durchzuführen. D.h. jeder erreichte Leistungswert ist mit dem festgelegten Spezifikationswert zu vergleichen und zusätzlich zu gewichten. Die Ergebnisse werden anschließend in vorgegebener Weise standardisiert und aufaddiert. Die Standardisierung dient dazu, die Werte miteinander in Bezug zu setzen, um sie vergleichen zu können. Auf Grund der Zuordnung „niedrigere Zahlenwerte gleich bessere Werte“ stellt die Produktvariante mit der kleinsten Design-Kennzahl den optimalen Ansatz dar. Stellt es sich als schwierig heraus, die Spezifikationswerte vollständig zu erreichen oder ist dafür ein großer Aufwand notwendig, müssen die Werte angepasst bzw. geändert werden. Dies hat allerdings eine geringere Wertigkeit zur Folge. Weitere Möglichkeiten bieten sich durch Rücksprünge zur Produkt-Definition. Hier kann das Spektrum der Produktvarianten durch zusätzliche Konfigurationen erweitert werden.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Kennzahlen verdeutlicht Bild 5.7. Die Simulationsergebnisse gehen in die Bewertung und Berechnung der Design-Kennzahlen ein. Ferner werden die Spezifikationswerte herangezogen, wobei ihnen zunächst Wertigkeiten zugeordnet werden. Letztlich beurteilen Experten die Ergebnisse für jede Produktvariante einzeln. D.h. sie prüfen, ob die vorgegebenen Spezifikationswerte erreicht werden und beurteilen danach ihre Güte.

Die Aufstellung der beteiligten Größen zur Berechnung der Design-Kennzahl ist Tabelle 5.6 zu entnehmen. Aus den drei Größen Spezifikationswert, Wertigkeit und Simulationsergebnis wird als Zwischenschritt zunächst eine Teilkennzahl ermittelt. Dazu sind als erstes die erforderlichen Leistungswerte in Spalte 1 einzutragen. Der dazugehörige Zahlen- bzw. Spezifikationswert $[S_{Lwi}]$ steht in Spalte zwei. Dieser wird von den Experten auf einen bestimmten Wert standardisiert.



2005 imt 5012-026

Bild 5.7: Entwicklung der Design-Kennzahlen

Tabelle 5.6: Design-Kennzahltable (pro Produktvariante)

Leistungswert	Spezifikationswert	Wertigkeit [0-1]	Simulationsergebnis 1	Teilkenzahl	Simulationsergebnis 2	Teilkenzahl	Simulationsergebnis 3	Teilkenzahl
LW_i	S_{LW_i}	W_{LW_i}	NY_{jLW_i}	DNY_{jLW_i}	NY_{jLW_i}	DNY_{jLW_i}	NY_{jLW_i}	DNY_{jL_i}
LW_1	S_{LW1}	W_{LW1}						
LW_2	S_{LW2}	W_{LW2}						
LW_3	S_{LW3}	W_{LW3}						
LW_4	S_{LW4}	W_{LW4}						
...
D_{Si}			...		...		...
D_i	...							

Da sich der Einfluss der verschiedenen Betriebsparameter auf die Funktionalität unterschiedlich auswirkt, sind die erreichten Leistungswerte in der Entwicklung ebenfalls verschiedenartig zu berücksichtigen. Dazu ist jeder Spezifikationswert mittels eines Wertigkeitsfaktors (Zahlenwert zwischen 0 und 1) zu gewichten [W_{LWi}] (Spalte drei). Die weiteren Spalten zeigen paarweise das erreichte Simulationsergebnis [NY_{jLWi}] ebenfalls in normierter Form und die dazugehörige berechnete Teilkennzahl [DNY_{jLWi}]. Die Teilkennzahlen werden pro Simulationslauf zusammengefasst und in der vorletzten Zeile der Design-Tabelle eingetragen. Die letzte Zeile der Design-Kennzahl-tabelle stellt die gesamte, errechnete Design-Kennzahl für eine Produktvariante dar. Daher ist für jede Variante eine eigene Tabelle erforderlich.

Im Folgenden wird nun die formelmäßige Berechnung der Kennzahlen vorgestellt. Die Simulationsergebnisse werden zunächst normiert und anschließend beurteilt. Diese Vorgehensweise, erst normieren und dann bewerten, unterstützt die spätere Beurteilung der Design-Kennzahl und der daraus resultierenden besseren Unterscheidung der einzelnen Produktvarianten. Die Standardisierung hat den Zweck, die Werte miteinander vergleichbar zu machen. Die Experten bewerten hierzu das jeweilige Ergebnis durch die Zuordnung eines Zahlenwertes zwischen 1 (Minimalwert) und zehn (Maximalwert). Die Entscheidung für eine hohe oder niedrigere Bewertung hängt davon ab, wie groß die Übereinstimmung des Ergebnisses aus der Simulation mit dem geforderten Ergebnis ist (vorgegebener Spezifikationswert). Mit höherer Übereinstimmung steigt die Bewertungszahl bis hin zum exakten Ergebnis.

Die Zielgröße (Spezifikationswert) [S_{LWi}] wird durch das Simulationsergebnis [NY_{jLWi}] dividiert und mit der Wertigkeit (Zahlenwert zwischen 0 = gering und 1 = hoch) [W_{LWi}] multipliziert (Gleichung 5-1). So wird zunächst für jeden Leistungswert eine Teilkennzahl [DNY_{jLWi}] errechnet. Damit wird der gewünschte Wert für die Realität mit dem Ergebnis aus der Simulation durch Division und anschließender gewichteter Multiplikation direkt in Bezug gesetzt.

$$DNY_{jLWi} = \left(\frac{S_{LWi}}{NY_{jLWi}} \right) * W_{LWi} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Die Indizes i und j stehen für die laufende Nummer. Als wichtiges Kriterium wird das 1,5-fache des Zielgrößenwertes festgelegt. Ist das Simulationsergebnis größer als das 1,5-fache der Zielgröße, so wird diese Produktvariante in der Expertenrunde analysiert. Es wird eine Entscheidung getroffen, ob die Produktvariante weiter verfolgt werden kann. Dies ist nur gegeben, wenn durch die Spezifikationsübererfüllung keine Nachteile für die Anwendung oder erheblich Kosten entstehen (s. Kapitel 5.4.2). Hier wird schnell deutlich, dass das Design komplexer sein kann als eigentlich notwendig. Treten in den Simulationsergebnissen weitere Diskrepanzen gegenüber den zu erwartenden Ergebnissen auf, so ist ein

Rücksprung zur Produkt-Definition notwendig. Das Ergebnis, die Teilkennzahlen $[DNY_{jLW_i}]$, wird in der Design-Kennzahltablelle dargestellt. Die Teilkennzahlen werden für jeden Simulationslauf addiert und durch ihre Anzahl dividiert. Daraus entsteht eine Design-Teilkennzahl $[D_{Si}]$, die die Leistungswerte aus einer Simulation zusammenfasst (Gleichung 5-2).

$$D_{Si} = \left(\frac{\sum DNY_{jLW_i}}{\text{Anzahl}(DNY_{jLW_i})} \right) \quad (\text{Gl. 5-2})$$

Für jede Produktvariante wird nun aus den Design-Teilkennzahlen eine gesamte Design-Kennzahl $[D_i]$ berechnet. Alle Teilkennzahlen einer Produktvariante werden dazu addiert und durch die Anzahl der summierten Design-Teilkennzahlen dividiert (Gleichung 5-3). Die so berechnete Design-Kennzahl wird in die Design-Matrix übertragen.

$$D_i = \frac{\sum D_{Si}}{\text{Anzahl}(D_{Si})} \quad (\text{Gl. 5-3})$$

Zur Bewertung der Designgüte können nun alle Kennzahlen der Produktvarianten untereinander verglichen werden. Durch die Vorgehensweise der Berechnung ist die Produktvariante am besten geeignet, für die der niedrigste Kennzahlenwert erreicht wird. Die Auswahl von einer Variante erfolgt erst nach Berechnung einer Gesamtkennzahl aus Design- und Technologie-Kennzahl in Abschnitt 5.6.

5.5 Beurteilung der Technologie

In diesem Abschnitt werden die Produktvarianten hinsichtlich der erforderlichen Technologieschritte untersucht. Die Beurteilung der Technologie-Komplexität entsteht aus den drei Faktoren Schwierigkeitsgrad, Reifegrad und Komplexität der Prozessschritte (nur betrachtet bei Maskenschritten). Hierfür sind eine Technologie-Matrix und weitere Formblätter, wie z. B. mehrere Technologie-Tabellen und Technologie-Kennzahlentabellen, erforderlich. Die Technologie-Tabelle stellt eine ausführliche Beschreibung der beteiligten Prozessschritte dar. Die Technologie-Matrix beinhaltet die Bewertung für jede Variante hinsichtlich aller für die Fertigung des Produktes zu verwendenden Schritte. Anschließend werden in der Technologie-Kennzahlentabelle die Bewertungen bzgl. Schwierigkeit, Reife und Komplexität der einzelnen Prozessschritte verarbeitet. Aus ihnen entstehen letztlich die Technologie-Kennzahlen. Die einzelnen Prozessschritte, die zur Herstellung des mikrotechnischen Produktes notwendig sind, bilden zusammen betrachtet die Technologiefolge. Diese generelle Schrittfolge ist nach Abschluss der Simulationen bereits festgelegt, da nur vollständige Produktvarianten simuliert werden können.

Hauptfunktion dieses Abschnitts zur Beurteilung der Technologie-Komplexität ist, eine Technologieschrittfolge zu bewerten, eine Risikoabschätzung und ggf. eine Vorversuchsplanung zu entwickeln. Bild 5.8 zeigt die einzelnen Schritte, die zur Beurteilung durchlaufen werden müssen.

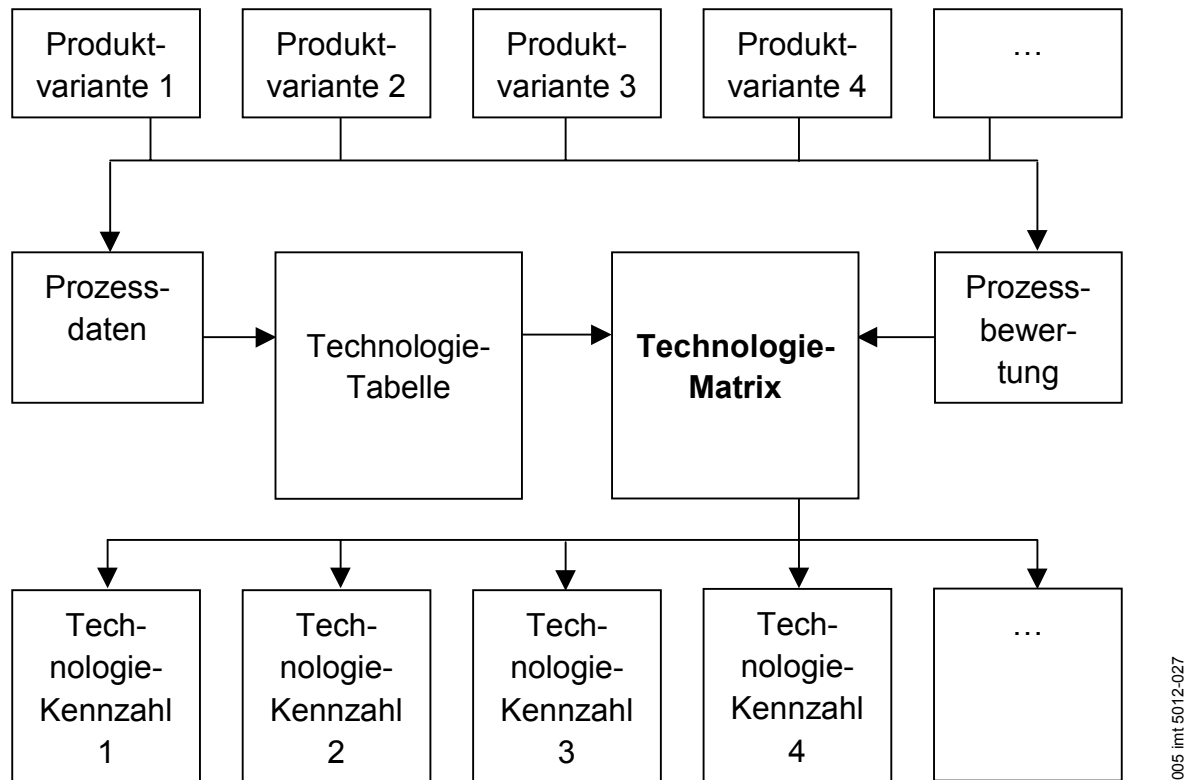


Bild 5.8: Schritte zur Beurteilung der Technologie-Komplexität

Ausgangsbasis für die Technologie-Entwicklung sind erneut die bereits hinsichtlich des Designs mit Simulationsergebnissen beurteilten und untersuchten Produktvarianten. Die durchzuführenden Technologieschritte werden durch Einzelprozesse repräsentiert, die wiederum mittels verschiedener technologischer Bearbeitungsverfahren erzeugt werden. Es wird eine Bewertung vorgenommen, die den Schwierigkeitsgrad der Technologien beurteilt, welcher in der Technologie-Matrix dokumentiert wird. Mittels einer Technologie-Tabelle wird der technologische Aufwand detailliert beschrieben und daran im Folgenden die Schwierigkeit der Prozessdurchführung sowie der Reifegrad bewertet. In der Technologie-Kennzahltablelle erfolgt zur Differenzierung der Produktvarianten die Berechnung der Technologie Kennzahlen. Die Technologiebewertung kann nur erfolgreich sein, wenn sie auf Daten aus früheren Entwicklungen und auf ihr Erfahrungswissen in Bezug auf die verwendeten Prozesse sowie den Anlagen, auf denen sie durchgeführt werden, zurückgreifen kann. Daher ist hier das Expertenteam neu zusammengesetzt. Es besteht aus Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen aus dem Bereich *Fertigung* und *Entwicklung*, um die Umsetzung des fertigungsgerechten Entwurfs zum fertigen Produkt beurteilen zu können.

5.5.1 Technologie-Tabelle

Die Technologie-Tabelle repräsentiert den ersten Schritt zur weiteren Unterstützung der Beurteilung der Technologien zur Fertigung des Produktes. Der Aufbau des Produktes wird in einzelne Prozessschritte gegliedert. Alle einzelnen Technologieschritte werden beurteilt und später ihr Zusammenwirken als Gesamtsystem analysiert. Um die Technologie-Matrix zu erstellen, sind eine Reihe von Hilfsdaten erforderlich, die in der Technologie-Tabelle (Tabelle 5.7) aufgelistet sind. In jeder der Technologie-Tabellen sind jeweils die erforderlichen Prozessschritte zur Herstellung der Module einer Produktvariante aufgeführt. Hierfür ist die Tabelle in 4 Spalten gegliedert, welche die Nummer des Prozessschrittes, den Namen des jeweiligen Prozesses, Anmerkungen und die verwendete Anlage repräsentieren. Weitere Angaben, z.B. zur Anzahl der notwendigen Maskenschritte, sind ebenfalls enthalten.

Tabelle 5.7: Technologie-Tabelle

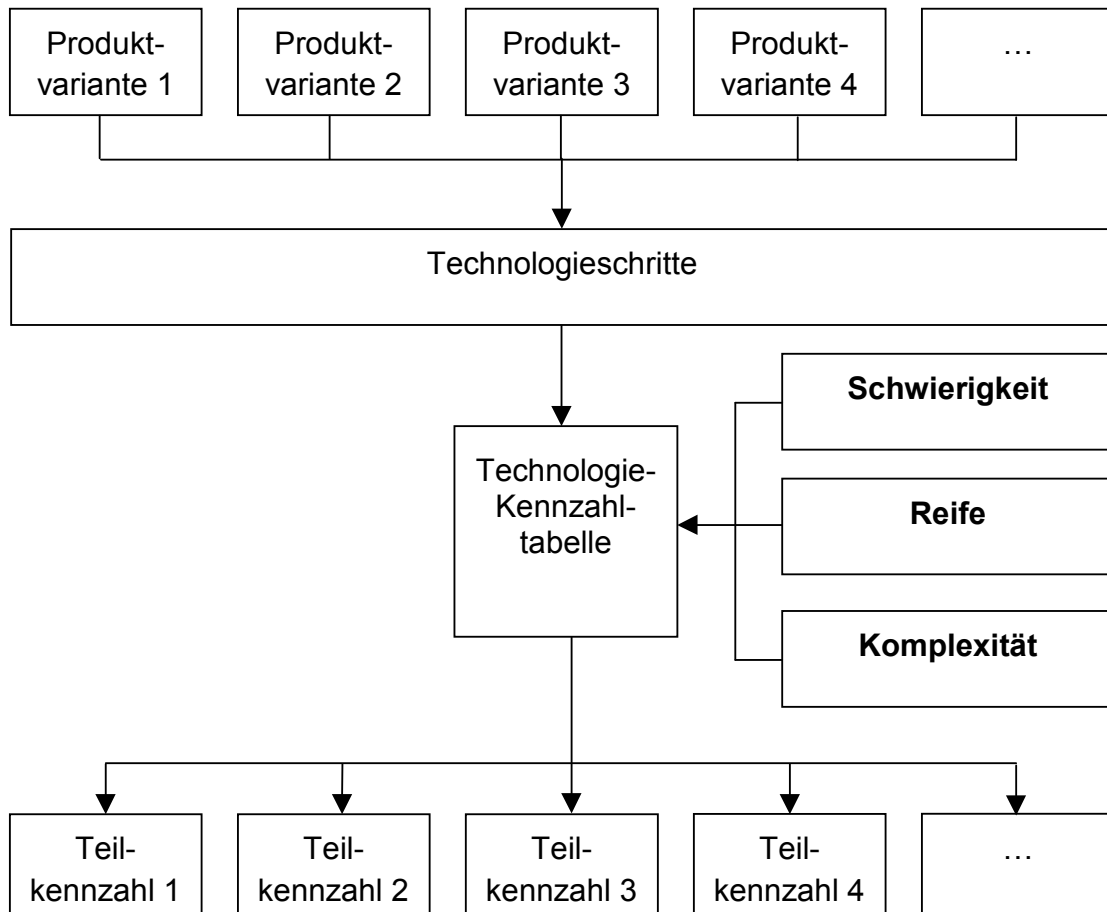
Nr.	Prozessschritt	Anmerkung	Anlage
1
2			
3			
4			
...

Experten und Expertinnen, die aus dem Arbeitsgebiet der *Fertigung* kommen, bearbeiten diese Tabelle. Sie stellen die erforderlichen Schritte zusammen, legen Teilschritte (Spalte Anmerkungen) fest und bestimmen die Anlagen, mit denen die Schritte prozessiert werden. Die Prozessschritte der Technologie-Tabellen werden an die Technologie-Kennzahltablelle übergeben, die für die Technologie-Kennzahlenberechnung als Basis dient. Dies erfolgt im nachfolgenden Schritt in der Technologie-Matrix.

5.5.2 Technologie-Matrix

Mit Hilfe der Technologie-Matrix erfolgt die Beurteilung der Produktvarianten hinsichtlich Schwierigkeit, Reife und Komplexität (Bild 5.9) sowie die Berechnung der Technologie-Kennzahlen. Neben der Beurteilung des Schwierigkeitsgrades und des Reifegrades für die einzelnen Prozessschritte existiert ein weiterer wichtiger Bewertungsfaktor. Dieser Faktor repräsentiert die Komplexität des Prozessschrittes (nur betrachtet wenn eine Maske verwendet wird). In der Dünnfilmtechnik werden häufig Masken verwendet. Diese stehen auf Grund der Häufigkeit ihrer Verwendung in direktem Zusammenhang mit der Komplexität des Fertigungsschrittes. Mit zunehmender Anzahl der verwendeten Maskenschritte ist das angestrebte Ergebnis, das durch den Einsatz der Maske beabsichtigt ist, schwieriger zu erreichen. Der

Schwierigkeitsgrad eines Technologieschrittes beschreibt den Aufwand und das damit verbundene Risiko für die erfolgreiche Durchführung des Schrittes. Als Reifegrad wird die Aussage über die Prozessstabilität in der Vergangenheit bezeichnet. Besteht für einen Prozess noch Entwicklungsbedarf oder ist er erst seit kurzem im Einsatz und noch nicht vollständig ausgereift, ist die Wahrscheinlichkeit seiner erfolgreichen Durchführung in einer neuen Entwicklungsumgebung gering.



005 Int 5012-028

Bild 5.9: Schritte zur Beurteilung der Technologiegüte

Die Prozessbeschreibung bzw. Beurteilung in den drei Stufen Schwierigkeitsgrad, Reifegrad und Komplexität fließt in die Kennzahlen-Berechnung ein, um die Reihenfolge der Varianten festzulegen. Diese Werte sind akkumulierte Werte, die in der Technologie-Kennzahl-tabelle zunächst beurteilt und dann in Formeln zur Berechnung der Kennzahlen eingesetzt werden. Die Bewertung in der Matrix erfolgt jeweils einzeln für jede Produktvariante. Für die Bearbeitung der Technologie-Matrix durch die Expertenrunde ist wichtig, dass ein fundiertes Wissensspektrum für die Beurteilung gewährleistet wird. Dies wird durch Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen aus anderen Fachgebieten wie beispielsweise der Qualitätssicherung ergänzt.

Die Hauptfunktion der Technologie-Matrix ist es, die Technologien zu beurteilen, welche für die Umsetzung der jeweiligen Produktvariante erforderlich sein würden. Die beschriebene Vorgehensweise ist speziell auf dünnfilmtechnische Produkte abgestimmt. Daher wird die Entwicklung des Fertigungsprozesses in besonderem Maße berücksichtigt. Tabelle 5.8 zeigt die Struktur der Technologie-Matrix: Es wird jeweils eine Zeile für den Schwierigkeitsgrad, den Reifegrad, die Komplexität und die Technologie-Kennzahl verwendet.

Tabelle 5.8: Technologie-Matrix

Prozess- beschreibung	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	...
Schwierigkeits- grad					...
Reifegrad					...
Komplexität (bei Maskenschritten)					...
Technologie- Kennzahl					

Die Schritte werden hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades in Kategorien von 1 (einfach) bis 5 (sehr schwierig) eingeteilt. Kategorie fünf geht typischerweise mit engen Toleranzen der Prozessparameter einher. Die Bewertung von 1 bis 5 wird ebenfalls für den Reifegrad und die Komplexität verwendet. Für den Reifegrad ist die Aussage über die Entwicklung eines Technologieschrittes von Bedeutung. Hierbei ist ein ausgereifter Schritt mit der Bewertung 1 anzusetzen. Die resultierende Technologie-Kennzahl berücksichtigt alle Faktoren und gewichtet sie, angepasst an ihre Bedeutung, für die technologische Umsetzung des Produktes. Jede Spalte der Technologie-Matrix repräsentiert eine Produktvariante.

5.5.3 Technologie-Kennzahlen

Die Berechnung der Technologie-Kennzahlen erfolgt nun in mehreren Schritten. Zur Entwicklung der Technologie-Kennzahlen sind zunächst die Prozessschritte, die für die Fertigung der Produktvarianten eingesetzt werden sollen, zu beurteilen. Diese Bewertung und die Berechnung der Technologie-Kennzahlen erfolgt in der Technologie-Kennzahltable (Tabelle 5.9). Die Schritte werden von der Expertenrunde beurteilt, danach erfolgt das Eintragen der Ergebnisse in die Spalten. Die erste Spalte gibt die Nummer des Schrittes bezogen auf die Technologie-Tabelle an. Spalte 2 beinhaltet den festgelegten Schwierigkeitsgrad gefolgt von Spalte drei, welche die Schwierigkeit als Wertigkeit des Schrittes bezogen auf den Gesamtprozess angibt. Die nächsten zwei Spalten beschreiben den Reifegrad und die

dazugehörige Wertigkeit. Diese Wertigkeit bezieht sich darauf, wie schwer es ist, diesen Schritt weiter zu entwickeln. Die letzten beiden Spalten liefern Aussagen zur Komplexität (nur bei betrachtet bei Maskenschritten), falls so ein Schritt eingesetzt wird, und zu ihrer Wertigkeit. Diese wird auf Grund der Komplexität der Zeichnung berechnet.

Tabelle 5.9: Technologie-Kennzahltable

Prozessschritt	Schwierigkeit [S]	Wertigkeit [W _{Si}]	Reifegrad [R]	Wertigkeit [W _{Ri}]	Komplexität [K _M]	Wertigkeit [W _{Mi}]
Bereich	1-5	0-1	1-5	0-1	1-5	0-1
1	...	...	...	...	...	...
2						
3						
4						
5						
...
Teilkennzahl	S=		R=		K _M =	

Die letzte Zeile zeigt die aus den darüber liegenden Zeilen errechneten Teilkennzahlen für Schwierigkeit, Reifegrad und Komplexität. Die Technologie-Kennzahl setzt sich aus drei Hauptteilen zusammen. Die Ermittlung der Teile Schwierigkeitsgrad [S], Reifegrad und Komplexität [K_M] erfolgt zunächst jeweils separat. Die Teilkennzahlen werden durch verschiedene Gleichungen errechnet (s. u.) und zur Beurteilung der einzelnen Produktvarianten in die Technologie-Matrix übertragen. Als erstes wird der Schwierigkeitsgrad durch die Bewertung innerhalb der Expertenrunde bestimmt. Die dazugehörige Wertigkeit für den Schwierigkeitsgrad wird zur Gewichtung mittels einer Ziffer zwischen 0 und 1 vergeben. Die Teilkennzahl Schwierigkeitsgrad [S] berechnet sich für jeweils eine Produktvariante (Gleichung 5-4):

$$S = \frac{\sum S_{Si} * W_{Si}}{\text{Schritte}} \quad (\text{Gl. 5-4})$$

Die Abkürzung S_{Si} bezeichnet den Schwierigkeitsgrad eines einzelnen Prozessschrittes mit den Indizes s für den Schritt und i für die laufende Nummer. Die Bezeichnung W_{Si} gibt die Wertigkeit, bezogen wiederum auf Schritt und Nummer, an.

Wird ein einzelner Prozessschritt mit fünf bewertet, so ist diesem besondere Beachtung zu schenken. Hier sind daraufhin Vorversuche zu planen, um Technologieschritte im Vorfeld der Fertigung abzusichern bzw. alle erforderlichen Fertigungsparameter zusammenzutragen. Im Anschluss an den Schwierigkeitsgrad wird als nächster Schritt der Reifegrad (Gleichung 5-5) jedes einzelnen Prozessschrittes bestimmt. Hierzu werden der Reifegrad und die Wertigkeit des jeweiligen Schrittes festgelegt und eingetragen. Die Wertigkeit für den Reifegrad wird ebenfalls wie beim Schwierigkeitsgrad im Bereich zwischen 0 (gering) und 1 (hoch) verteilt und für eine Gewichtung des Schrittes hinsichtlich der Weiterentwicklung vergeben. Die Teilkennzahl Reifegrad $[R]$ errechnet sich durch:

$$R = \frac{\sum R_{Ri} * W_{Ri}}{\text{Schritte}} \quad (\text{Gl. 5-5})$$

Die Angabe R_{Ri} stellt den Reifegrad eines Prozessschrittes mit den Indizes R für den Grad und i für die laufende Nummer dar. Hier bedürfen insbesondere Schritte mit einer hohen Bewertung (mit fünf) besonderer Aufmerksamkeit. Bei diesen sind dann Vorversuche zu planen bzw. die Technologie separat von der ZVF zunächst zu verbessern. Tritt mehrmals die Kombination eines hohen Schwierigkeitsgrades mit einem geringen Reifegrad auf, so ist eine erfolgreiche Durchführung dieses Prozessschrittes fraglich. An dieser Stelle muss im Vorfeld wiederum getrennt von der ZVF eine Detailplanung zu dem Prozessschritt erfolgen, die nur auf die Entwicklung dieses einen Schrittes ausgerichtet ist. Es folgt die Charakterisierung der Komplexität (Gleichung 5-6). Da die Durchführung des Schrittes mit zunehmender Komplexität der Zeichnung schwieriger wird, erfolgt die Zuordnung einer Wertigkeit $[W_M]$ zu den Schritten. Die Komplexität drückt sich meist in der Anzahl der Maskenschritte aus. Es wird quasi ein Werkzeug zur Erzeugung eines Entwicklungsteilschrittes hergestellt. Nach Erstellung eines Maskenentwurfs (Zeichnung) wird dieser separat von der Technologieentwicklung gefertigt. Mehrere Masken kommen zum Einsatz, um bestimmte Fertigungsschritte des mikrotechnischen Produktes umzusetzen. In der weiteren Ermittlung der Kennzahlen fallen die Masken mit der Anzahl der verwendeten Schritte daher ins Gewicht. Die Komplexität erhält das Symbol K_M und wird ermittelt durch:

$$K_M = \frac{\sum K_{Mi} * W_{Mi}}{\text{Schritte}} \quad (\text{Gl. 5-6})$$

Der Index i steht für die laufende Nummer. Die Wertigkeit für die Komplexität wird auch hier im Bereich zwischen 0 und 1 gewählt und zur Gewichtung des Schrittes vergeben. Die berechneten Teilkennzahlen werden anschließend addiert (Gleichung 5-7) und ergeben eine Technologie-Kennzahl pro Produktvariante. Die Bedeutung von Schwierigkeitsgrad, Reifegrad und Komplexität ist unterschiedlich für

die Entwicklung, daher stehen die drei Größen bei der Bewertung nicht im gleichen Verhältnis zueinander. Für die Berechnung der Technologie-Kennzahl werden sie daher in der Gleichung ungleichmäßig berücksichtigt. Die eine Hälfte der Kennzahl wird durch die Komplexität bestimmt und die andere Hälfte setzt sich jeweils zu gleichen Teilen aus dem Schwierigkeits- und Reifegrad zusammen. Die gesamte Berechnung erfolgt mittels der folgenden Formel:

$$T_i = \left(S * \frac{1}{4} \right) + \left(R * \frac{1}{4} \right) + \left(K_M * \frac{1}{2} \right) \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Die Ergebnisse der ermittelten Technologie-Kennzahlen $[T_i]$ pro Produktvariante werden an die Technologie-Matrix (Tabelle 5.8) übergeben. Zur Bewertung der Technologie-Komplexität können nun alle Kennzahlen der Produktvarianten untereinander verglichen werden. Die Berechnung zeigt die Produktvariante als am leichtesten fertigbar, für die der niedrigste Kennzahlenwert ermittelt wird. Allerdings wird die Auswahl einer Variante erst nach der Berechnung einer Gesamtkennzahl aus Design- und Technologie-Kennzahl in Abschnitt 5.6 getroffen.

5.6 Kennzahlenberechnung zur Auswahl der optimalen Produktvariante

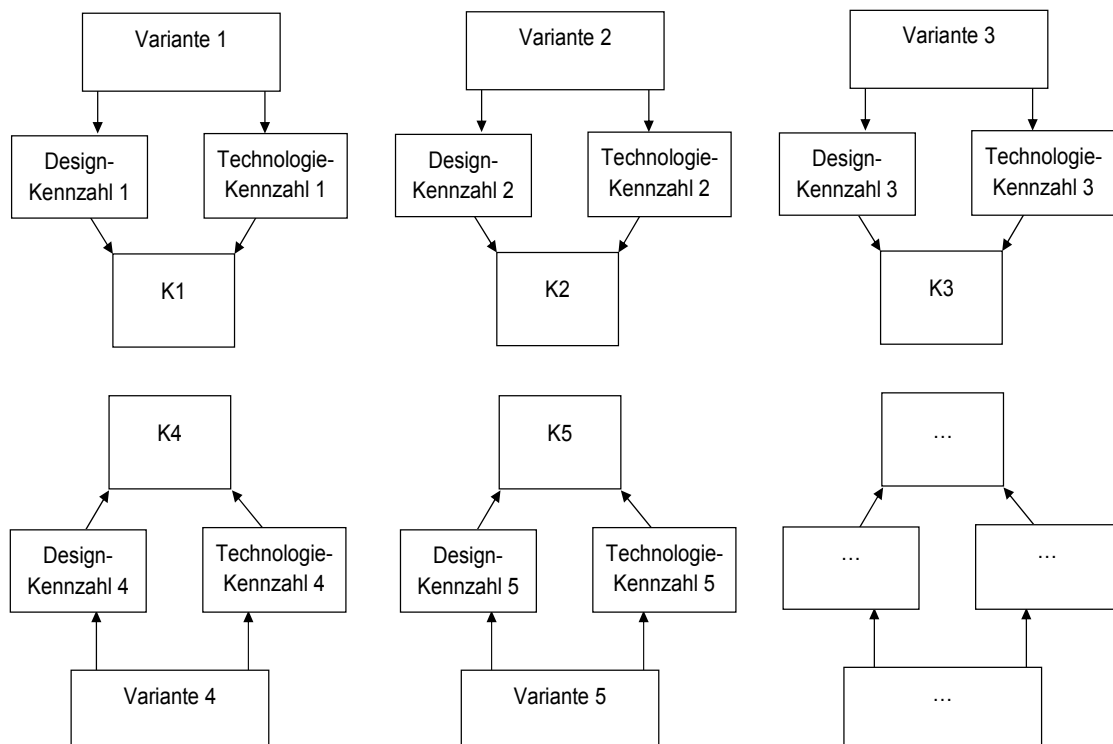
Die Methode zur Unterstützung der Entwicklung eines mikrotechnischen Bauteils durchläuft nun den letzten Schritt, bei dem genau eine Variante ausgewählt wird. Nach der Definition der Produktvarianten und den Beurteilungen der Simulationsergebnisse sowie der Technologie-Komplexität ist nun ein Zusammenhang zwischen Design- und Technologie herzustellen. Hierzu wird abschließend eine Gesamtkennzahl aus den zuvor berechneten Design- und der Technologie-Kennzahl ermittelt.

Bild 5.10 zeigt alle definierten und bewerteten Produktvarianten mit den jeweiligen berechneten Design- und Technologie-Kennzahlen. Auf Grund des Aufbaus der Kennzahlenberechnung stellt sich die Produktvariante mit der niedrigsten Design-Kennzahl als die geeignetste Variante dar. Dies gilt ebenso für die Technologie-Kennzahl. Hier ist die Produktvariante mit dem kleinsten Kennzahlenwert, der eine geringe Technologie-Komplexität bedeutet, am leichtesten fertigbar. Die Berechnung einer Gesamtkennzahl $[K]$ erfolgt mit Hilfe folgender Formel (Gleichung 5-8).

$$K = \frac{D + T}{2} \quad (\text{Gl. 5-8})$$

Diejenige Produktvariante, bei der K am kleinsten ist, stellt ein Optimum zwischen Design- und Technologieanforderungen dar. Durch Berechnung der

Gesamtkennzahl und der Auswahl einer Produktvariante ist die Methode zur zielorientierten Varianten-Findung abgeschlossen.



2005 int 5012-029

Bild 5.10: Berechnung der Gesamtkennzahl aus Design- u. Technologie-Kennzahl

Die Unterstützung, die für den gesamten Entwicklungsprozess geleistet wird, zeigt Bild 5.11. Ausgangspunkt ist eine Vorgabe der Produktspezifikation. Erster Schritt der ZVF ist die Erfassung sowie Definition von Produktvarianten. Anschließend erfolgen einerseits die Betrachtung der Designaspekte als vergleichende Beurteilung der Simulationsergebnisse und andererseits die Betrachtung der Technologieaspekte zur vergleichenden Beurteilung der Technologie-Komplexität. Zunächst sollen die erforderlichen Schritte der ZVF und ihre Einbindung in den Entwicklungsprozess hergeleitet werden. Bei der Entwicklung des Konzeptes für die Methode wird ihre Struktur für die Produkt- und Prozessentwicklung festgelegt. Hierfür werden die Ausgangssituation, die Definition der Produktvarianten, die Betrachtung der Simulationsergebnisse, die Betrachtung der Technologie-Komplexität sowie die Auswahl der optimalen Produktvariante berücksichtigt. Der Entwicklungsprozess beginnt mit der Ausgangssituation, welche die Kundenanforderungen repräsentiert. Auf Grund dessen kann die Definition von Produktvarianten erfolgen, welche die Basis für die weiteren Betrachtungen liefert. Um die Struktur und Ablauf der ZVF zu erfassen, werden Formblätter (Tabellen und Matrizen) eingesetzt. Zu jedem der drei Entwicklungsbereiche gehören Tabellen, welche Basisdaten, die zur Entwicklung erforderlich sind, darstellen. Auf Grund dieser Informationen erfolgen weitere Schritte, deren Ergebnisse in den Matrizen abgebildet werden. Um die Pro-

duktvarianten zu definieren ist zunächst eine Auswahl von erforderlichen Modulen zusammenzustellen. Dazu wird eine Modul-Tabelle eingesetzt, die die Grundlage für eine Baukastenstruktur bei der Produktzusammensetzung liefert. Die Varianten werden anschließend in einer Konfigurationsmatrix aufgelistet.

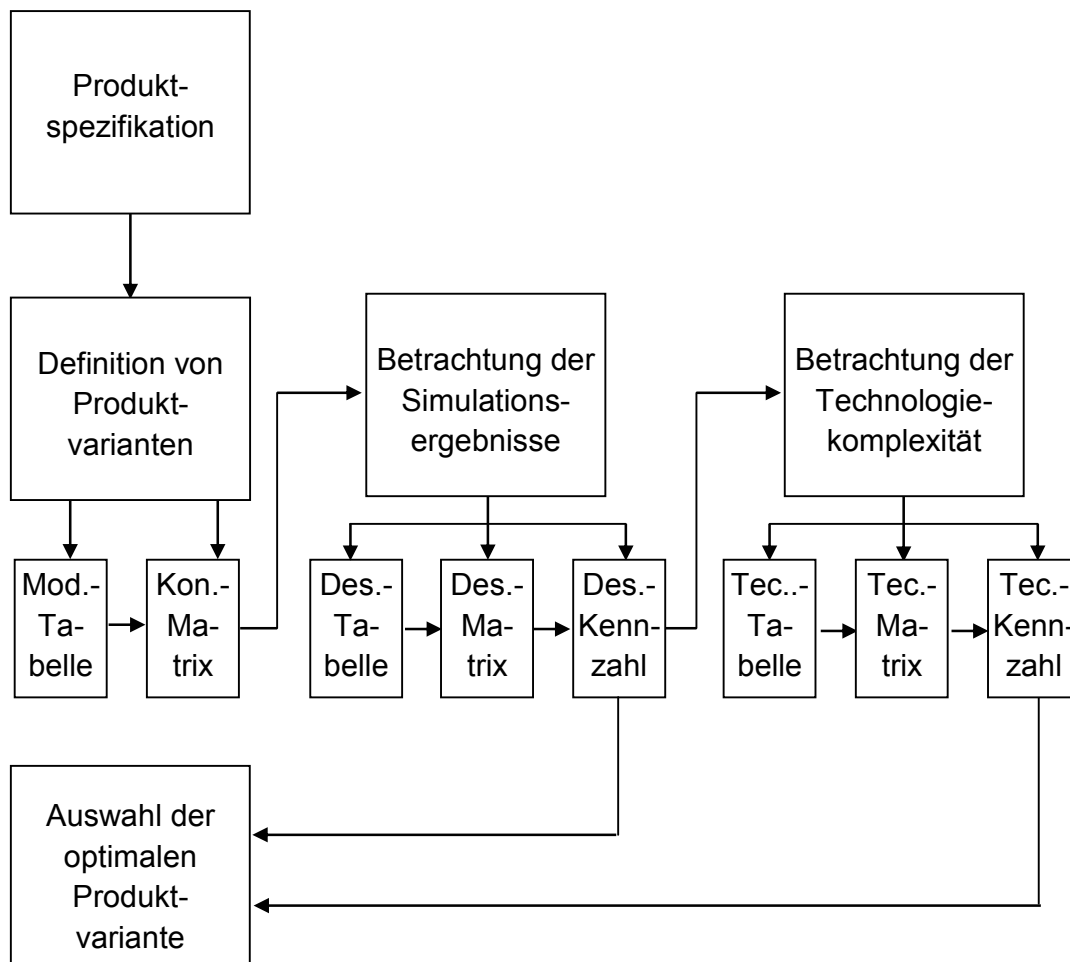


Bild 5.11: Unterstützung des Entwicklungsprozesses und Ablauf der ZVF

Es schließt sich nun der erste Schwerpunkt der Methode, die Betrachtung der Simulationsergebnisse, an. Die Auswahl und Bewertung von Daten der Simulationsergebnisse und der Technologie-Komplexität erfolgt dabei immer durch ein Team aus verschiedenen Experten und Expertinnen, die weitere Formblätter (Tabellen und Matrizen) verwenden. Es werden die in die Simulation eingehenden Werte und die entstehenden Ausgangswerte betrachtet. Die zu berücksichtigenden Eingangswerte enthält die Design-Tabelle und die Ergebniswerte der Simulationen die Design-Matrix, Da grundsätzlich jede Variante simuliert werden soll, entstehen erhebliche Datenmengen. Um im späteren Ablauf der ZVF die Varianten auf zweckmäßige Weise vergleichen zu können, wird eine Kennzahlenberechnung durchgeführt und für die spätere Weiterverwendung dokumentiert. Der zweite Schwerpunkt liegt bei der Betrachtung der Technologie-Komplexität. Die Prozessschritte, die nach abgeschlossener Entwicklung zur Fertigung der Produktvarianten eingesetzt werden

sollen, sind in Technologie-Tabellen abgelegt. Diese einzelnen Schritte sind hinsichtlich technologischer Aspekte zu bewerten und in einer Technologie-Matrix darzustellen. Abschließender Schritt des Entwicklungsprozesses ist die Berechnung einer Gesamtkennzahl aus den Design- und Technologie-Kennzahlen für jede Variante zur gesamtheitlichen Beurteilung. Damit wird dem Hauptzweck der ZVF, aus mehreren Produktvarianten eine optimale Produktvariante auszuwählen, Rechnung getragen.

Die zielorientierte Varianten-Findung ist somit ein geeignetes Hilfsmittel zur Unterstützung für die Entwicklung mikrotechnischer Produkte. Bis hin zum endgültigen Produktentwurf werden verschiedene Aktivitäten zur Produkt- und Prozessentwicklung durchlaufen. Grundsätzlich werden diese Aktivitäten möglichst parallel angegangen, was problemlos realisiert werden kann, da nicht zwingend eine sequenzielle Abfolge zu Grunde liegt. Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgt durch verschiedene Expertenrunden, ihre Beurteilungen fließen in die Kennzahlen ein. Dies führt letztlich zur Auswahl einer Produktvariante.

6 Computerunterstützung für die Anwendung der ZVF

Die Methode der zielorientierten Varianten-Findung soll mit Hilfe einer neu entwickelten Computerunterstützung umgesetzt werden. Im nachfolgenden Kapitel sieben kommt diese anschließend im Rahmen einer Fallstudie zum Einsatz. Da dort die Entwicklung eines Wirbelstromsensors durchlaufen wird, werden in diesem Kapitel beispielhaft Daten für ein anderes mikrotechnisches Produkt verwendet. Die Daten, die beispielhaft für die Datenbank verwendet werden, gehören zu einem Mikrotransformator.

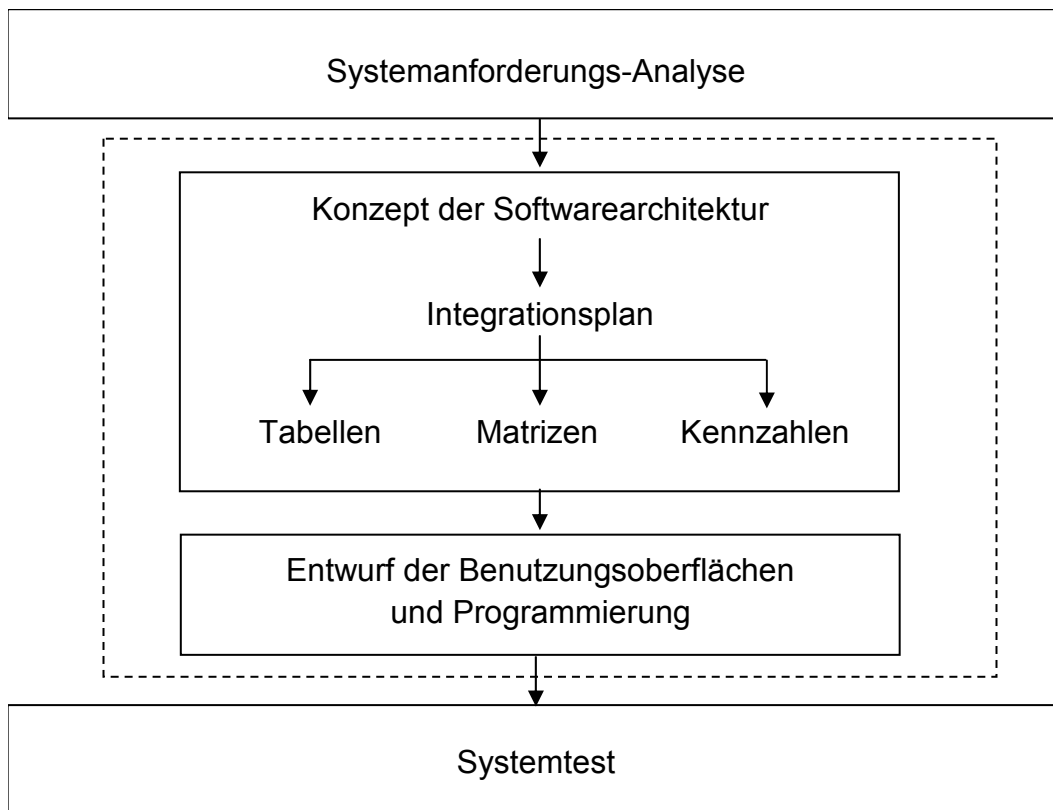
Zunächst ist daher die Entwicklung eines Software-Prototyps, der speziell an die Bedürfnisse eines mikrotechnischen Produktes anzupassen ist, zu realisieren. Auf Grund der Gliederung in Module und in Prozessschritte kann die Entwicklung in Form einer Baukastenstruktur durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Systematisierung der Entwicklungsstruktur, sowie die bessere Verfolgung und Dokumentation. Um die Methode in ihrer Handhabung zu optimieren, ist eine Computerunterstützung sinnvoll. Daher soll für die zielorientierte Varianten-Findung die Software CoVaFind (Computerunterstützte Varianten-Findung) entwickelt werden. Die Software stellt ein Abbild der Entwicklungsbereiche der ZVF wie folgt dar: Produktdefinition, Beurteilung des Designs und Beurteilung der Technologie-Komplexität sowie Auswahl des letztlich zu fertigenden Produktentwurfs.

6.1 Vorgehensweise zur Entwicklung von CoVaFind

Der Ablauf zur Entwicklung von CoVaFind ist in Bild 6.1 dargestellt. Es ist notwendig, als ersten Schritt eine Systemanforderungsanalyse durchzuführen. In dieser Analyse werden die Anforderungen nach technisch- und benutzerorientierte Arten unterschieden. Die zu berücksichtigenden Anforderungen werden im Verlauf von Abschnitt 6.2 erläutert. Im Anschluss an diese Analyse beginnt die Entwicklung des Programms, wobei zuerst ein Konzept der Softwarearchitektur zu erstellen ist. Hierbei sind der grundlegende Ablauf des Programms sowie das Datenmanagement mit Hilfe einer Datenbank festzulegen. Es ist wichtig, eine geeignete Datenstruktur zu finden, da von ihrer Gestaltung und Ablage die späteren Zugriffsmöglichkeiten auf einzelne Teile im Programmablauf abhängen. Mit Vorliegen der Softwarearchitektur können die Abbildung der Matrizen und Tabellen, die Kennzahlenberechnung sowie ihre Integration in den vorgesehenen Programmablauf mittels eines Integrationsplans erfolgen.

Als nächste Schritte sind der Entwurf und die Programmierung der Softwareoberflächen vorgesehen. Hierzu sind mehrere so genannte Softwareoberflächen zu entwerfen, mit denen die Produktenwicklung per Mausklick und Tastatureingabe durchlaufen werden kann. Die Entwicklung bzw. die Programmierung von CoVaFind wird mit einem vorhandenen Softwaresystem aus dem Hause Microsoft© umgesetzt. Die Softwareoberflächen werden durch Formulare der Software „Access©“ erzeugt. Diese Access©-Programmierung erfolgt durch die Software Visual Basic©. Mit

Fertigstellung aller erforderlichen Softwareoberflächen ist der Programmerteil von CoVaFind beendet.



2005:imt 5012-031

Bild 6.1: Vorgehensweise zur Entwicklung von CoVaFind

Letzter Schritt für die Programmentwicklung ist ein Systemtest. Um einen Testlauf durchführen zu können, ist eine Dateneingabe notwendig. Dabei werden in der Datenbank Tabellen mit detaillierten Daten und Zeichnungen zu einzelnen Produktelementen aufgefüllt. Diese Elemente werden hier, wie schon innerhalb der ZVF, ebenfalls als Module bezeichnet. Aus den angelegten Tabellen heraus können im späteren Programmablauf die Module für eine Produktentwicklung vom Programm vorgeschlagen werden. Die Gestaltung der Tabellen erfolgt als „offenes System“ (ständig ergänzbar), um die Erweiterbarkeit mit neuen Modulen und weiteren Daten zu gewährleisten. Innerhalb des Programms haben die Benutzer die Möglichkeit, über ein Eingabefenster Daten hinzuzufügen. Einen vollständigen Durchlauf zur Produktentwicklung absolviert das Programm erstmalig im Rahmen der Fallstudie (Kap.7).

6.2 Systemanforderungsanalyse für CoVaFind

CoVaFind soll von den Benutzern für die Anwendung des ZVF-Prozesses eingesetzt werden. Zusätzlich soll die Möglichkeit geschaffen werden, direkt auf Datensätze zu zugreifen zu können. Dadurch sind die Voraussetzungen gegeben,

konkrete Aufgaben zu bearbeiten oder eine Datenpflege durchzuführen. Die Anforderungen, die CoVaFind erfüllen muss, sind in Bild 6.2 dargestellt.

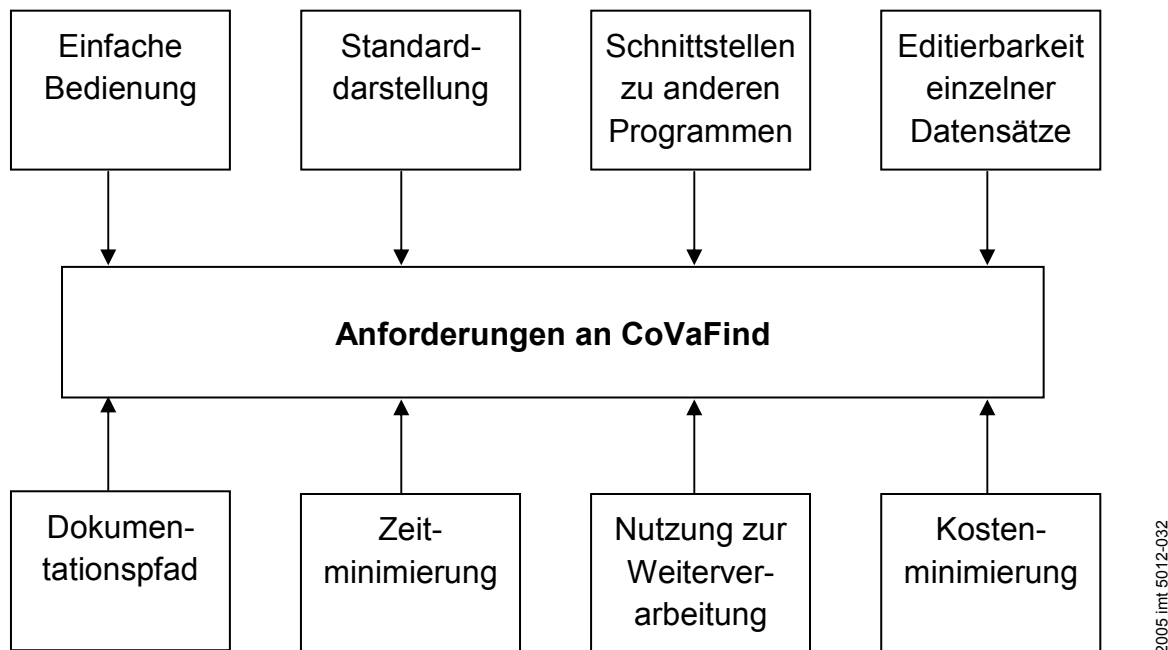


Bild 6.2: Forderungen an CoVaFind

Die Computerunterstützung erfordert benutzergerechte, sich selbst erklärende und vor allem fehlertolerante Softwareoberflächen. Die intuitive Gestaltung ist deshalb ein entscheidender Faktor. Daher soll die Berücksichtigung der Menschen mit ihren Erfahrungen, Kenntnissen und Fertigkeiten sowie ihren kognitiven Ressourcen z.B. Gedächtnis oder Problemlösungsfähigkeit keine Rolle spielen. Daraus resultiert, dass ein zusätzliches Erlernen der Bedienung durch einfache Führung durch das Programm mittels aufgabenangemessener Gestaltung nicht notwendig ist. Die Darstellung und Editierbarkeit von Daten soll von CoVaFind ähnlich wie bei anderen Standardprogrammen realisiert werden. Die Basisdaten müssen hierzu in einer Datenbank abgelegt werden, auf welche die Teilbereiche des Programms zugreifen können. Ihre Darstellung erfolgt, angepasst an die ZVF, in Matrizen und Tabellen.

In den verschiedenen Bereichen des Programms soll der Zugriff auf Daten und auf einzelne Verarbeitungsschritte möglich sein. Die Datensätze müssen dazu unabhängig vom Programmablauf, in CoVaFind gepflegt werden können. In einzelnen Elementen des Programms muss es möglich sein, Informationen neu hinzuzufügen bzw. zu ändern (editieren). Daher ist grundsätzlich die Pflege von Datensätzen zu ermöglichen. Hierzu sind zusätzlich Eingabefelder innerhalb des Programms zur Eingabe von Daten notwendig, die ebenfalls als Datensätze gespeichert werden. Die Beschränkung auf fest vorgegebene Felder sollen die Benutzer in der Bedienung unterstützen und durch das Programm führen.

Um die Ergebnisse der Entwicklung, die programmgestützt erzeugt werden, auch anderweitig für weitere Verarbeitungen oder Darstellungen nutzen zu können, sind Schnittstellen zu anderen Standardprogrammen erforderlich. Durch den Einsatz eines Microsoft®-Produktes ist gleichermaßen die Schnittstellenkompatibilität zu anderen Microsoft-Office®-Produkten und der weiteren Anwendungsumgebung gegeben. Ferner hilft die computerunterstützte Vorgehensweise, die Entwicklungszeit herab zu setzen. Der Bereich der Kennzahlenberechnung ist durch die automatische Verknüpfung der Daten schneller, daher kann die Entwicklungszeit verkürzt werden. Der Faktor Zeit korreliert mit der Kostenminimierung, die aber auch schon durch eine intuitive Handhabung zum Tragen kommt. Im Anschluss an die Anwendung des Programms muss eine umfangreiche Dokumentation der Entwicklung sichergestellt sein. Daher werden mit Beginn einer Entwicklung laufend Ergebnisse und letztlich die ermittelten Varianten in der Datenbank gespeichert.

6.3 Entwicklung von CoVaFind

Um die Methode einfacher anwenden zu können, durchläuft die Entwicklung der Computerunterstützung die Phasen Konzept der Softwarearchitektur, Datenbanksystem, Integrationsplan sowie Entwurf und Programmierung der Softwareoberflächen.

6.3.1 Konzept der Softwarearchitektur

Bild 6.3 zeigt das Modell der Softwarearchitektur, d.h. die Hauptstruktur zur Programmerstellung. Die Softwarearchitektur wird zunächst schematisch dargestellt. Nach Start von CoVaFind kann auf zwei verschiedene Bereiche zugegriffen werden. Zum einen ist es möglich, unmittelbar die zielorientierte Varianten-Findung zu starten. Zum anderen können die Benutzer direkt in der Datenbank arbeiten. Diese Wahlmöglichkeit wird durchgängig im Programmablauf aufrechterhalten, so dass zu jedem Zeitpunkt ein Rücksprung zum Start möglich ist.

Der linke Strang des Modells (Bild 6.3) stellt den Zugang und die Möglichkeiten im Datensystem dar. Haben sich die Benutzer für diesen Bereich entschieden, erhalten sie die Auswahl zwischen Suchfunktion und Datenpflege. Die Suchfunktion soll die Möglichkeit bieten, nach einzelnen Modulen oder bereits fertig entwickelten Produkten zu suchen. Diese Funktion erlaubt allerdings nur einen Lesezugriff ohne Veränderungsmöglichkeiten an den Daten. Anders ist die Handhabung im Bereich der Datenpflege. Auf Grund der von der ZVF verwendeten Baukastenstruktur, mit welcher die Daten bevorratet werden, liegen größere Datenmengen vor, die den Benutzern in Form von Modulen bei der Entwicklung zur Verfügung gestellt werden. Da die Datensätze verändert, ergänzt oder neu angelegt werden können, ist dies nur Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen erlaubt, die an der Entwicklung beteiligt sind. Deswegen wird mit definierten Zugriffsrechten gearbeitet. Ferner verschafft das Datenmanagement in einer Datenbank durch die elektronische Speicherung später einfachen Zugriff auf die Daten.

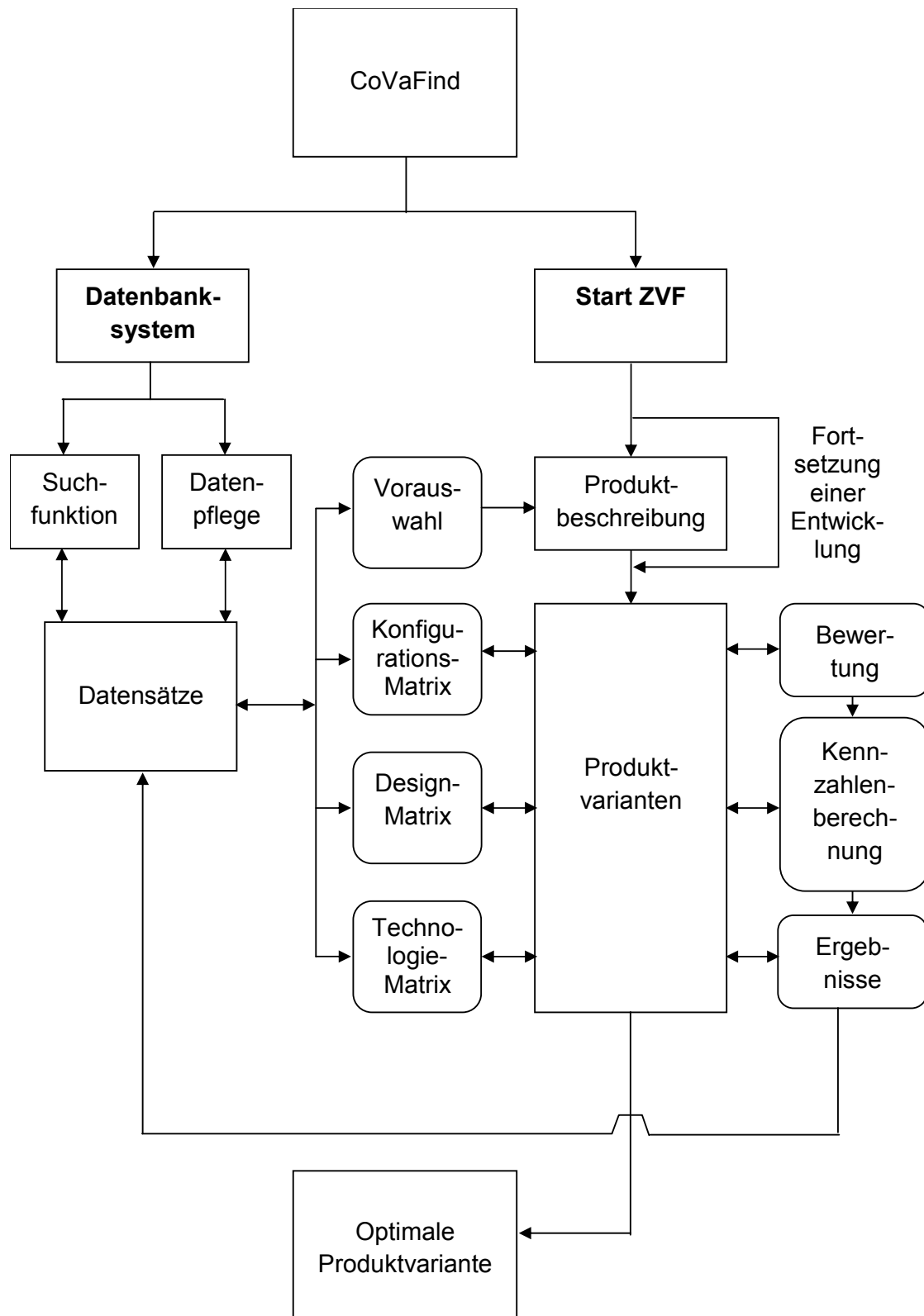


Bild 6.3: Modell der Softwarearchitektur: Rechter Strang = Datenbanksystem, linker Strang = ZVF

Im rechten Teil des Bildes ist der Ablauf der ZVF dargestellt. Nach Start der ZVF haben die Benutzer entweder die Möglichkeit, eine neue Produktentwicklung zu starten oder über ein Eingabefeld eine laufende Entwicklung fortzusetzen. Wird eine

bereits begonnene Entwicklung fortgesetzt, können die Benutzer den Entwicklungsbereich aus Produkt-Definition, Beurteilung der Simulationsergebnisse und Beurteilung der Technologie-Komplexität wählen.

Beispielsweise besteht die Möglichkeit, sich bereits vorliegende Ergebnisse anzeigen zu lassen oder direkt in Formblättern (Tabellen und Matrizen) weiterzuarbeiten. Diese Handhabung erfordert eine produktbezogene Namensgebung bei allen Arbeitsschritten des Programms. Für die Erstellung von Produktvarianten, Tabellen, Matrizen oder kennzahlbezogenen Auswertungen ist es erforderlich, den Namen der laufenden Entwicklung in einem Identifikationsfeld anzugeben. Die Zugriffsrechte für unterschiedliche Produktentwicklungen sind dafür im Vorfeld festzulegen. Wird eine neue Entwicklung gestartet, kann mittels einer Vorauswahl – die auf bestehende Module aus der Datenbank zugreift – das Produkt beschrieben werden. Im Anschluss erfolgen die Definition der Produktvarianten und ihre Bewertung. Die Anzahl der Varianten ist dabei nicht fest vorgegeben, so dass die Benutzer das Spektrum selbst bestimmen können.

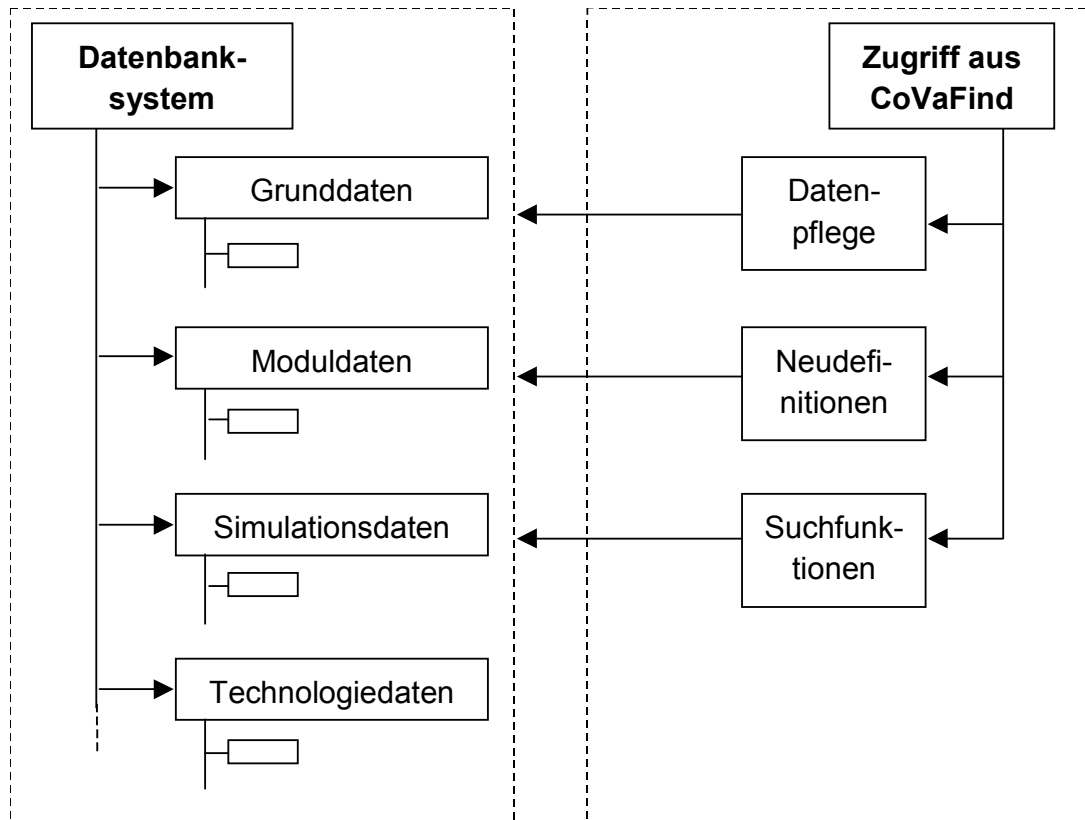
Aus allen Entwicklungsschritten wird auf Daten aus der Datenbank zurückgegriffen. Außerdem werden die Ergebnisse, vom Programm erzeugte Tabellen oder Matrizen sowie von den Benutzern ausgefüllte Matrizen, dort gespeichert. Dazu gehören ebenfalls Daten, welche die beiden Bereiche „Simulation“ und „Technologie“ betreffen. Das Programm dient der zielorientierten Varianten-Findung als Unterstützung und ist mit ihrem Durchlaufen und der Auswahl eines geeigneten Produktentwurfs, der anschließend an die Fertigung übergeben wird, abgeschlossen.

6.3.2 Datenbanksystem

Das Datenbanksystem besteht aus mehreren Bereichen (Bild 6.4). Der Grundbereich dient der Ablage von z.B. Zeichnungen. Auf die Datenbank wird aus dem Programmablauf der ZVF zugegriffen. Die Anwendungen ermöglichen Datenpflegeaufgaben, Neudefinitionen im Entwicklungsablauf sowie Suchfunktionen. Der wesentliche Hauptaspekt im Aufbau der Datenbank ist die Organisation der Daten von beispielsweise Modulen (mit Angaben zu Geometrie- und Leistungsdaten) oder Prozessschritten (mit Details zu Technologieaspekten) in einem Baukastensystem.

Die Repräsentation der Daten als Baukastensystem ist für das Verwalten der Daten von mikrotechnischen Produkten besonders geeignet. Als offenes System kann es mit Neu-Definitionen von Entwicklungen auf einfachem Weg erweitert werden. Die jeweiligen Bereiche sind mit definierten Zugriffsrechten versehen, um einen unsachgemäßen Zugriff zu vermeiden. Die abgelegten Informationen bilden zusammen einen Datenpool, aus dem die Produktvarianten aufgebaut werden können. Unabhängig vom Programmverlauf von CoVaFind ist es möglich, die Datensätze in jedem Programmbereich und zu jedem Zeitpunkt im Programmablauf zu pflegen. Im Nachhinein können nach einer abgeschlossenen Entwicklung (zur Kontrolle der Produktumsetzung) zusätzlich Ergänzungen gespeichert werden, wenn diese nicht während des Durchlaufens des Entwicklungsbereiches in Echtzeit dokumentiert sind. Ebenso können Bestätigungen von neu erstellten Datensätzen,

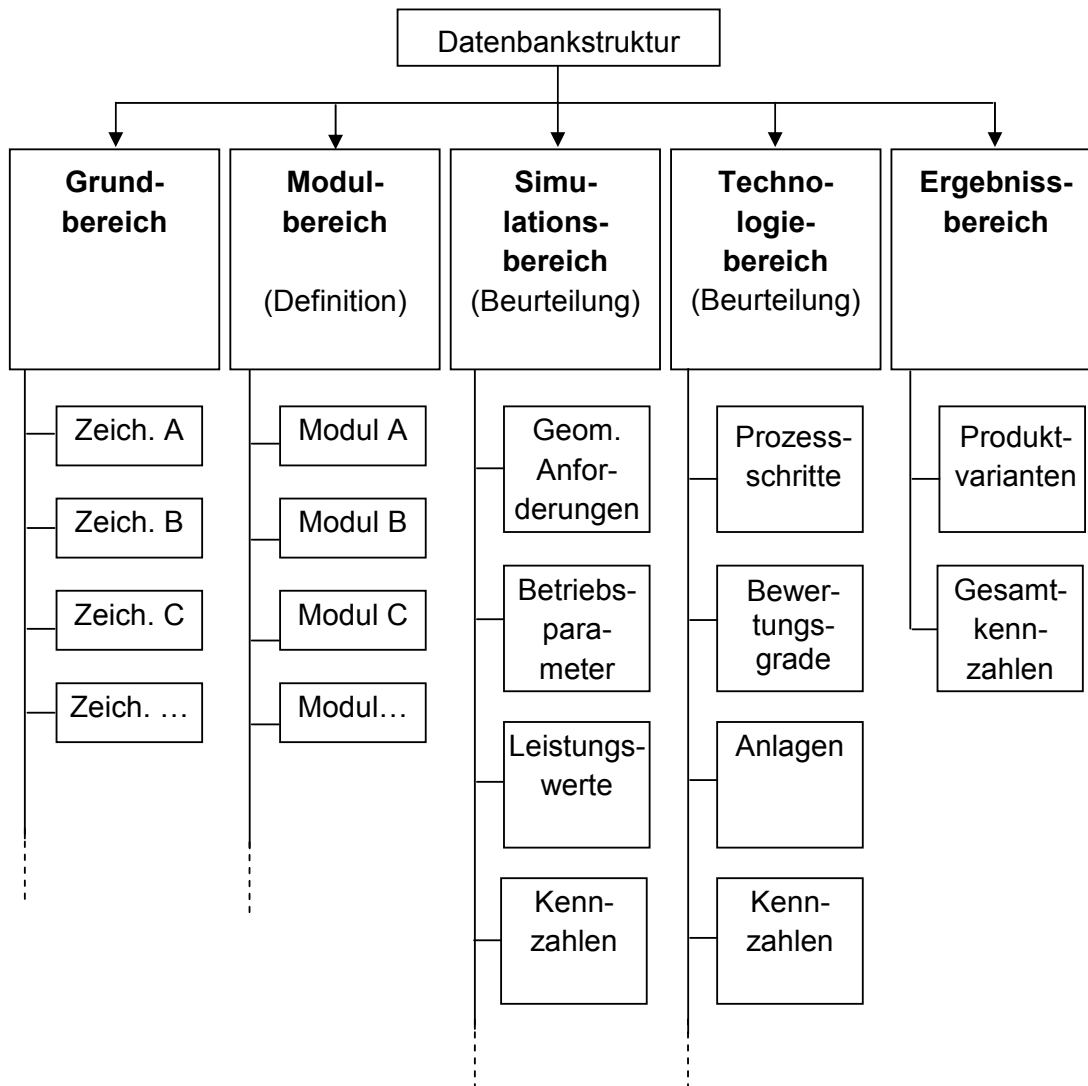
wie z.B. Modulen, die in einer Entwicklung zur Anwendung kommen, vermerkt werden. Hierbei sollte zwischen einer erfolgreichen und einer bedingt bzw. nicht geeigneten Entwicklung unterschieden werden, um für zukünftige Entwicklungen die Daten richtig nutzen zu können. Somit wird eine logische Datenintegrität gewährleistet.



2005_int 5012-034

Bild 6.4: Datenbank und Verbindung zu CoVaFind

Die Bereiche der Datenbank (Bild 6.5) sind an die Bedürfnisse der Entwicklung und an die Vorgehensweise der ZVF angepasst. Jeder Bereich enthält spezielle Daten. Es gibt fünf Bereiche: Grund-, Modul-, Simulations-, Technologie- und Ergebnisbereich. Der Grundbereich enthält Zeichnungen und Abbildungen von Modulen, Elementen oder eine vollständige Darstellung eines Produktes. Der Modulbereich beinhaltet Datensätze zu den Modulen mit Angaben zu den geometrischen Daten, usw. Der nächste Bereich enthält Simulationsaspekte wie z.B. Betriebsparameter oder Leistungswerte. Anschließend folgt der Bereich zur Technologie mit verschiedenen Aspekten wie z.B. Prozessschritte und Anlagen. Die Ergebnisebene beinhaltet Produktvarianten, ausgewählte Produktentwürfe, die der Fertigung zugeführt wurden und die Gesamtkennzahlen. Die Beschreibung der Dateneingabe und konkrete Daten für die Datenbank werden in Abschnitt 6.4 dargestellt.



2005:imt 5012-035

Bild 6.5: An die Produktentwicklung angepasste Datenbankstruktur von CoVaFind

6.3.3 Integrationsplan

Der Integrationsplan (Bild 6.6) dient dazu, die Tabellen und Matrizen der ZVF in den computergestützten Programmablauf zu integrieren. Die strich-punktirt umrandeten Felder stellen Tabellen und Matrizen dar, die im Programmablauf generiert werden. Die Kundenanforderungen stehen bei Start der Produktentwicklung fest und fließen in die Produktbeschreibung ein. Als erster Schritt von CoVaFind wird der Name des zu entwickelnden Produktes festgelegt und eingetragen. Alle weiteren Schritte innerhalb einer Entwicklung sind dann fest mit diesem Namen verknüpft. Einerseits sind automatische Verknüpfungen von Daten hinterlegt, andererseits müssen von den Benutzern Abfragefelder von Hand ausgefüllt werden. Als nächster Schritt wird das Produkt beschrieben.

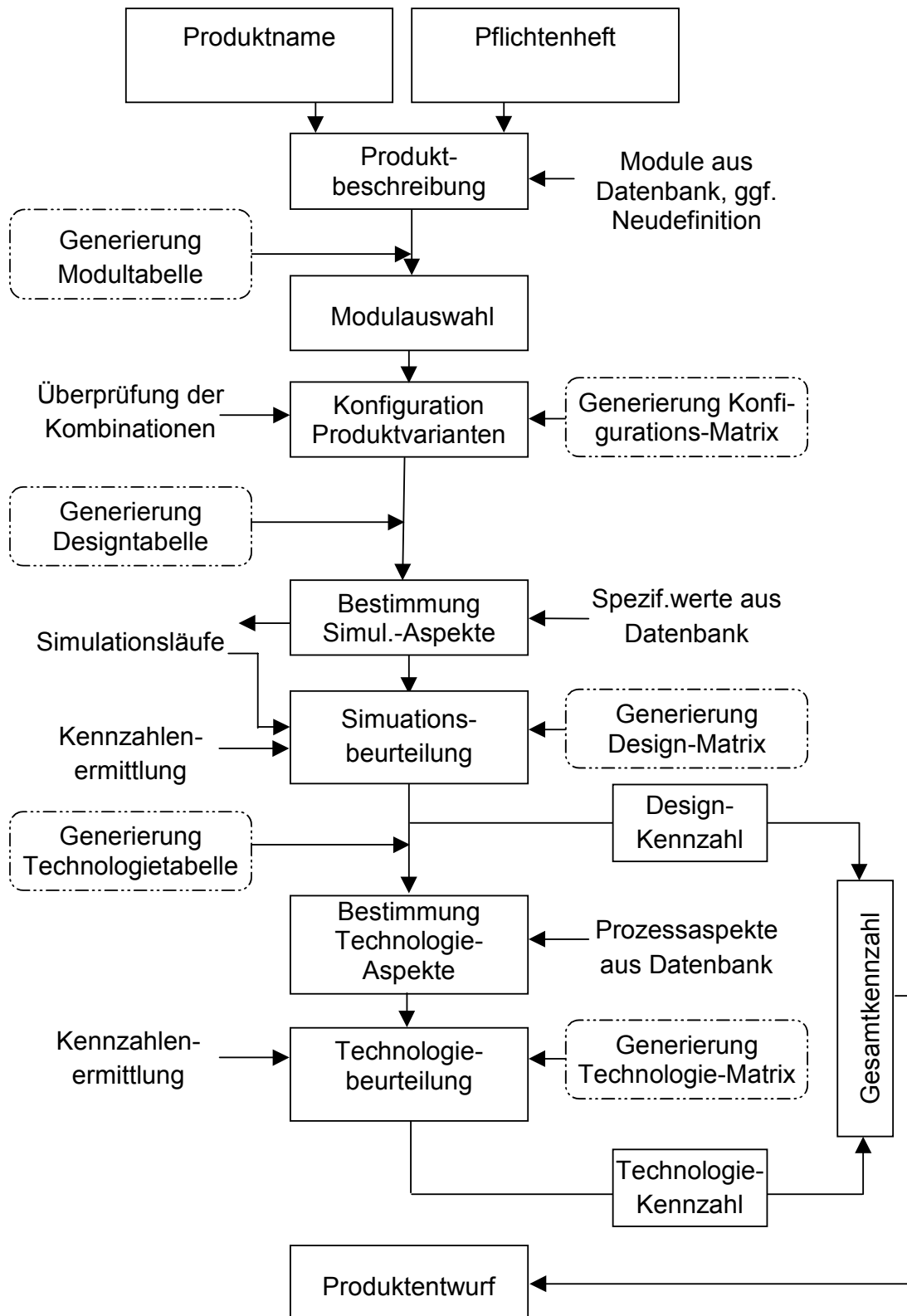


Bild 6.6: Integrationsplan zur Einbindung der ZVF in den Programmablauf

Hierzu bietet CoVaFind Module aus der Datenbank mittels eines Pull-down-Menüs an. Gleichzeitig ist die Möglichkeit der Neudefinition eines Moduls integriert. Auf Basis der Produktbeschreibung erfolgt die Generierung der Modul-Tabelle. Sie enthält alle in der Datenbank vorhandenen Modulausführungen, welche die Benutzer

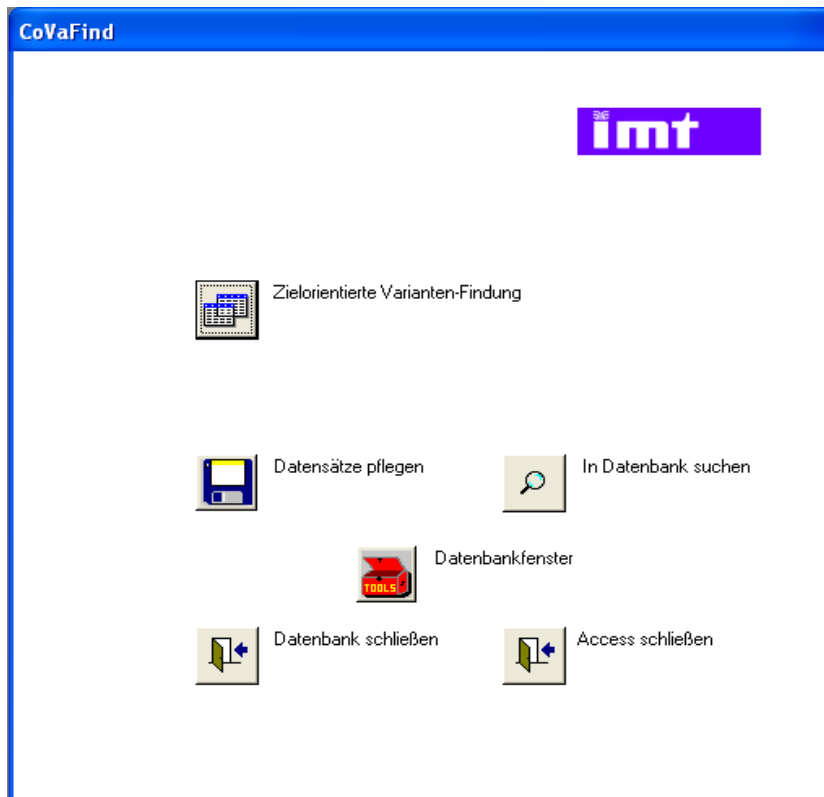
durch ihre Produktbeschreibung aufgeführt haben. Mit der Variantenbildung und der Generierung der Konfigurations-Matrix können die Produktvarianten aus der Modulauswahl erstellt werden. Alle verwendeten Module werden intern vom Programm auf ihre Kombinationsfähigkeit getestet. Unter Umständen muss auf Grund einer Neudefinition eines Moduls die Prüftabelle ergänzend ausgefüllt werden. Dazu ist die Tabelle von Hand zu editieren. Die nun vorliegenden Produktvarianten müssen hinsichtlich der Designaspekte überprüft werden. In der Software besteht eine Verknüpfung zwischen der Produkt-Konfiguration und den folgenden zwei Bereichen der Design- und Technologieentwicklung, so dass die Zusammensetzung der Produktvarianten innerhalb des Programms weitergegeben wird. Durch eine Markierung in der Spalte Auswahl bestätigen die Benutzer die Produktvarianten (bei Produkt-Konfiguration und bei Produkt-Design). Somit bleibt die Option gewahrt, eine oder mehrere der Produktvarianten von der weiteren Entwicklung auszuschließen.

Zur Vorbereitung der Simulation werden die Betriebsparameter in der von CoVaFind erzeugten Design-Tabelle bestimmt. Anschließend erfolgen gesondert von CoVaFind die Simulationsläufe. Die separat entstandenen Simulationsergebnisse werden von den Benutzern in standardisierter Form (s. Kap. 5) in die generierte Design-Matrix eingetragen. Vom Programm wird anschließend eine Kennzahltablette erzeugt, in der die notwendigen Formeln zur Berechnung der Kennzahlen hinterlegt sind. Die Daten in dieser Tabelle werden über die Zuweisung von Wertigkeiten zu den erreichten Leistungswerten bestimmt. Die Darstellung der Ergebnisse und die berechneten Kennzahlen erfolgt automatisch in der Design-Matrix. Für die Bestimmung der Technologieaspekte wird als nächster Schritt eine Technologie-Tabelle generiert. Anschließend werden die einzelnen Prozessschritte bewertet. Die eingetragenen Bewertungen fließen automatisch in die Kennzahlenermittlung ein, da die Berechnungsformeln hinterlegt sind. Es werden der Schwierigkeitsgrad, der Reifegrad und die Komplexität (nur bei der Verwendung von Masken) für jede Variante bestimmt. Diese Ergebnisse sowie die ermittelten Kennzahlen erscheinen bei der Generierung der Technologie-Matrix. Für die endgültige Auswahl einer Produktvariante werden die ermittelten Kennzahlen zu einer Gesamtkennzahl zusammengeführt. Die Produktvariante mit der niedrigsten Kennzahl repräsentiert damit den optimalen Entwurf. Damit ist die Integration aller Elemente, die zur Umsetzung der ZVF generiert wurden, vollständig.

6.3.4 Entwurf der Softwareoberflächen

Um den Benutzern eine einfache Bedienung zu ermöglichen, ist der Aufbau der Softwareoberflächen an den Menschen angepasst. Die Nutzer sollen das Programm intuitiv ohne lange Einarbeitungszeit benutzen können. Eine effiziente Gestaltung ist Grundvoraussetzung, da komplexe Zusammenhänge strukturiert und leicht verständlich abzubilden sind. Ferner muss die grafische Umsetzung aus dem Blickwinkel der Menschen erfolgen. Mit Programmstart von CoVaFind wird die erste Softwareoberfläche, das Hauptformular (Bild 6.7), geöffnet. Diese erste Softwareoberfläche enthält die folgenden sechs Schaltflächen, die durch Mausklick verschiedene Funktionen ausführen: *Zielorientierte Varianten-Findung*, *Datensätze*

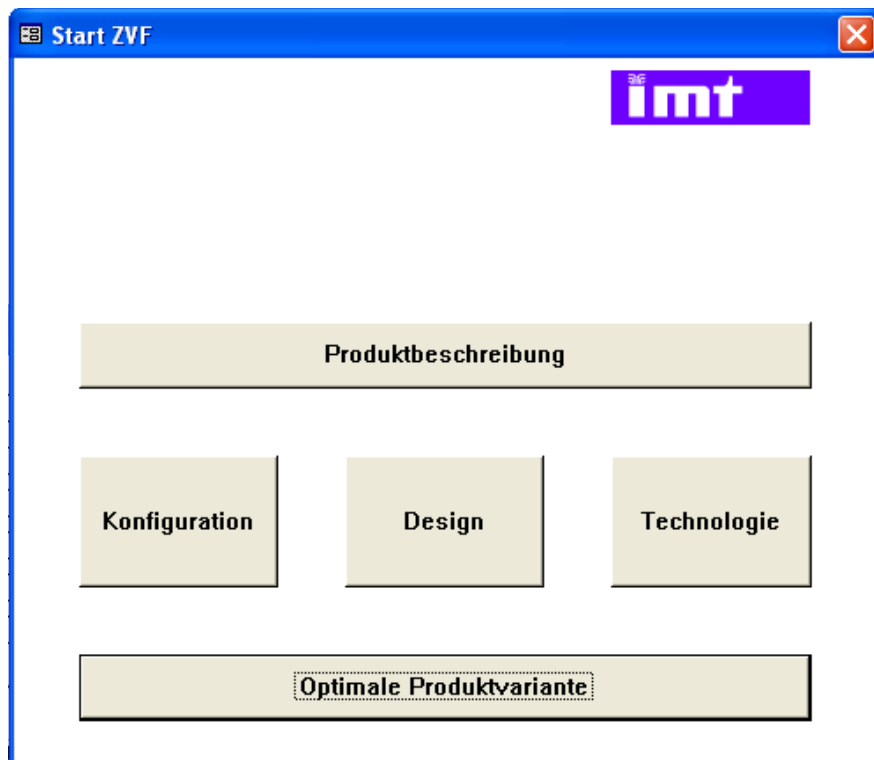
pflegen, in Datenbank suchen, Datenbankfenster, Datenbank schließen und Access schließen.



2005 imt 5012-037

Bild 6.7: Hauptformular CoVaFind

Für den Programmablauf besteht zunächst die Möglichkeit, zwischen den drei Schaltflächen *ZVF*, *Datensätze pflegen* und *in Datenbank suchen* zu wählen. Durch die *ZVF*-Schaltfläche wird die zielorientierte Varianten-Findung gestartet. Weitere einzelne Schaltflächen, die im Fortgang dieses Abschnitts noch einzeln beschrieben werden, repräsentieren den Ablauf von der Beschreibung des Produktes bis zum endgültigen Produktentwurf. Durch *Datensätze pflegen* bietet sich die Möglichkeit, Module und Prozessschritte zu editieren. Dagegen dient die Suche ausschließlich dem Auffinden von Daten von fertigen Produkten, die bei vorherigen Entwicklungen entstanden sind. Alle Daten sind im Hintergrund in Tabellen abgelegt und können durch individuell gestaltete Formulare in Access genutzt werden. Klicken die Benutzer auf die Schaltfläche der *ZVF*, so öffnet sich ihre Softwareoberfläche (Bild 6.8). *Start ZVF* ist eine zentrale Oberfläche, mit der die Entwicklung durchlaufen wird. An diese Stelle kann aus anderen Teilbereichen der Methode zurückgesprungen werden. Das Design der Softwareoberflächen ist angepasst an die Vorgehensweise der Methode und der daraus abgeleiteten Arbeitsabläufe. Dabei erforderliche Eingabe- und Bedienfelder sind selbsterklärend. Wann immer es praktikabel ist, werden Pull-down-Menüs verwendet, um Vorschläge aus der Datenbank zu generieren.



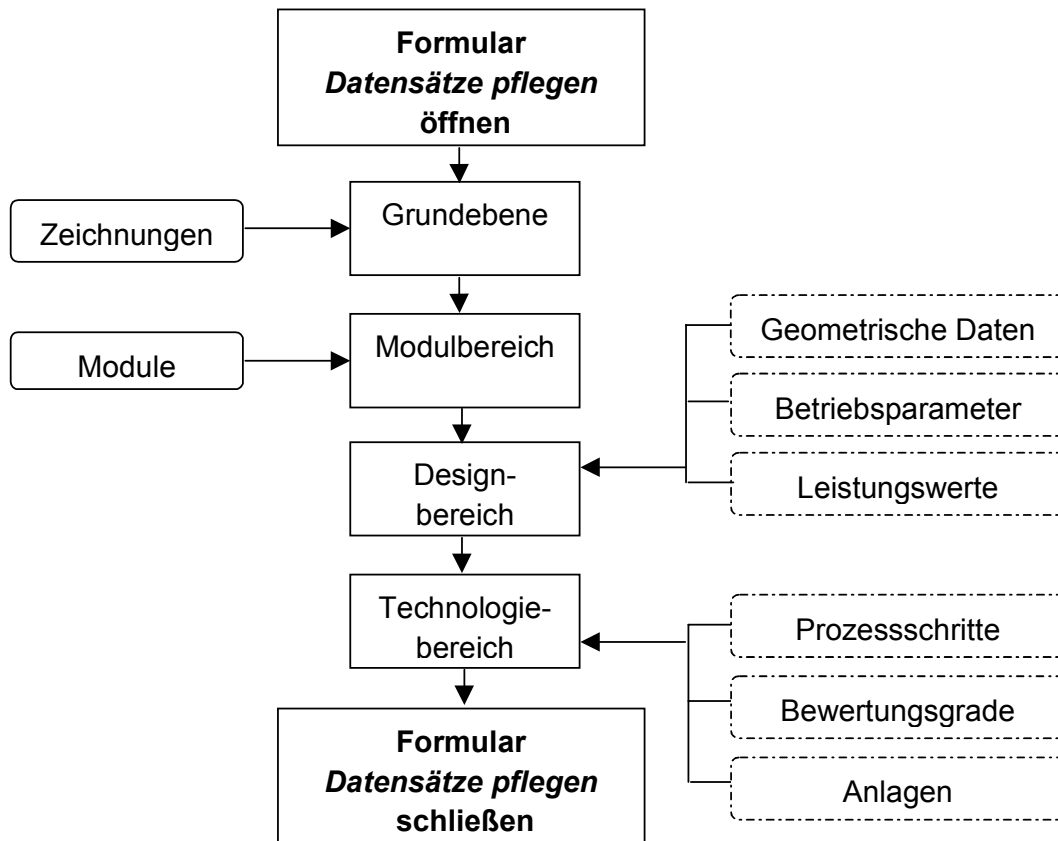
2005 imt 5012-038

Bild 6.8: Formular Start ZVF

Ferner enthalten fast alle Softwareoberflächen innerhalb der Methode eine zentrale Schaltfläche *Auswahl beenden*. Mit ihr kann jeweils zur vorherigen Oberfläche zurückgekehrt werden. Zur Datenbearbeitung oder für Bewertungen wird die Tastatur eingesetzt. Ansonsten ist vorgesehen, alle notwendigen Bedienschritte im Ablauf der Produktentwicklung per Mausklick auf Schaltflächen zu realisieren. So führt das Programm den Benutzer durch den Programmablauf; Fehlbedienungen können weitgehend ausgeschlossen werden. Die Qualität der Softwareoberfläche ist somit ein Kriterium für die erfolgreiche Nutzung von CoVaFind.

6.4 Systemtest

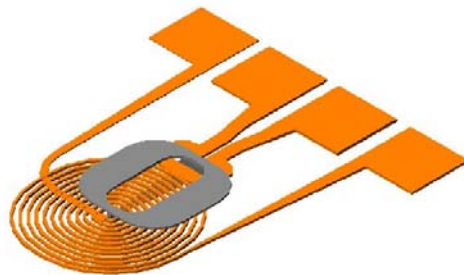
Nach Abschluss der Softwareentwicklung erfolgt der Systemtest. Hierbei ist zunächst ein Funktionstest bzgl. Zugriffsoperationen durchzuführen, in dem die einzelnen Schritte des Programmablaufs zu durchlaufen sind. Beispielfähig werden hierzu Daten für einen Mikrotransformator verwendet, wodurch der Systemtest an eine erste Dateneingabe gebunden ist. Dazu wird die Datenbank von CoVaFind im Anschluss an die Programmierfähigkeit mit Daten aufgefüllt (Bild 6.9). Nach Öffnen des Datenbankfensters werden zunächst mehrere Schaltflächen für Module und Prozessschritte erstellt. Diese einzelnen Schaltflächen können im Programmablauf durch Mausklick angesprochen und verwendet werden. Durch den Klick öffnet sich eine Tabelle, die zu editieren ist. Geometrische Daten, Betriebsparameter und Leistungswerte werden so in mehrere Tabellen eingepflegt. Abschließend erfolgt die Schließung des Datenbankfensters. Microsoft Access© speichert dabei automatisch alle Daten.



2005 int 5012-039

Bild 6.9: Dateneingabe

Im Rahmen einer Fallstudie (Kapitel 7) wird die Entwicklung eines Wirbelstromsensors erläutert. Beispielhaft erfolgt daher hier die Dateneingabe für ein anderes mikrotechnisches Produkt (Mikrotransformator, Bild 6.10) [BEN04]. Die folgenden Seiten dieser Arbeit beschreiben einerseits die Eingabe der Datensätze, deren Verarbeitung zu Modulen und die hierbei beteiligten Prozessschritte und Zeichnungen. Andererseits wird die Methode durch öffnen der jeweiligen Softwareoberflächen getestet. Für den Sensor sind folgende Produktelemente definiert: Eine obere und untere Flussführung, Kerne, je eine Primär- und Sekundärspule und eine Rückführung. Daraus ergeben sich drei notwendige Module: Primär- und eine Sekundärspule und untere Flussführung.



2005 int 5012-040

Bild 6.10: Mikrotransformator

Um daraus die erforderlichen Moduldaten zusammenstellen zu können, werden die Module zunächst gegliedert. Beispielhaft ist hier eine Unterteilung in Spulen, magnetische Flussführungselemente und Isolationen (Bild 6.11) dargestellt.

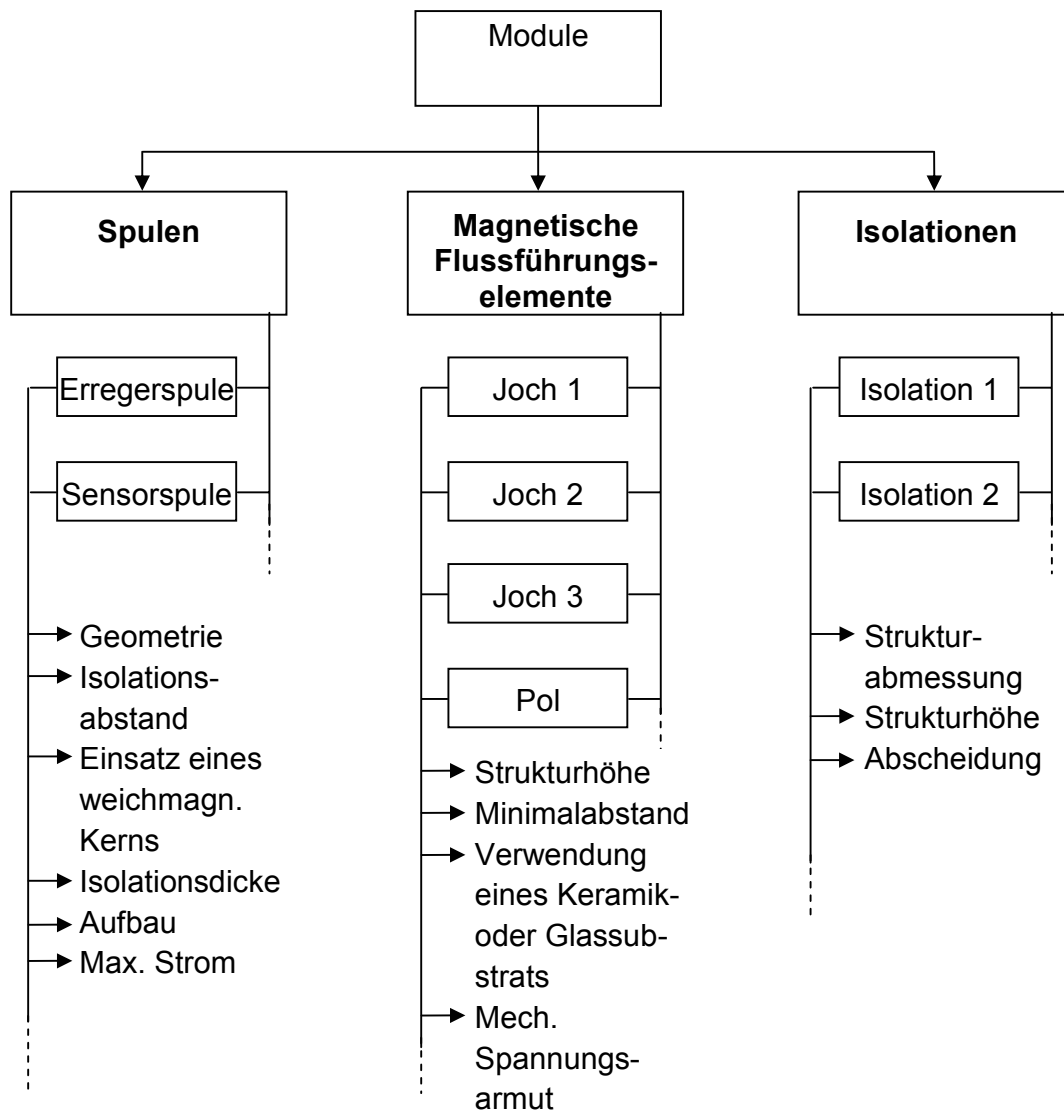


Bild 6.11: Gliederung der Module und erforderliche Daten

Zu den Modulen sind weitere detaillierte Angaben vorhanden. Die Spulen werden beispielsweise in Erreger- und Sensorspule untergliedert und ausführlicher beschreiben. Alle aufgeführten Datensätze werden in die Datenbank eingegeben. Die weiteren Module gliedern sich in Joch 1, Joch 2, usw. Ferner sind die Angaben aufgeschlüsselt in geometrische Daten wie z.B. Strukturhöhen, Aufbau, Abscheidung, Isolationsdicken sowie mechanische Spannungsarmut. Tabelle 6.1 stellt die Abmessungs- und Leistungsdaten der Module *Erregerspule* und *untere Flussführung* dar. Es werden Daten zur Anzahl der Windungen, zum Isolationsabstand zwischen

den Windungen, zum Isolationsabstand zum magnetischen Kern (horizontal), usw. aufgeführt.

Tabelle 6.1: Beispiel einer Modul-Tabelle für einen Mikrotransformator

Modul	Abmessungen [μm]			Leistungsdaten	Werkstoff	
	Anzahl Wind.	Isolationsabstand zw. d. Wind.	Isolationsabstand Magnetkern hor.	Vertik. Isolationsabstand	Stromdichte [kA/mm^2]	Hauptwerkstoff
Erregerspule						
Modul X1	8	6	20	3	1	Cu
Modul X2	10	6	15	5	1	Cu
	Länge	Schichtdicke	Abmessung Pol 1	Abmessung Pol 2	Stromdichte [kA/mm^2]	Hauptwerkstoff
Untere Flussführung						
Modul Y1	160	1	10x10	10x10	1	NiFe45/55
Modul Y2	180	1	10x10	10x50	1	NiFe45/55

Nach Definition der Produktvarianten werden die Eingangswerte für die Simulationen betrachtet. Es sind dazu verschiedene Betriebsparameter, wie z.B. Messfrequenz (10kHz-100MHz), Stromdichte ($1\text{kA}/\text{mm}^2$) und Kraft (0-0,4N) vorgesehen (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Beispiel einer Design-Tabelle für einen Mikrotransformator

Eingangswerte	Spezifikationswert	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
Messfrequenz	10kHz-100MHz	10kHz	1MHz	100MHz
Stromdichte	$1\text{kA}/\text{mm}^2$	$1\text{kA}/\text{mm}^2$	$1\text{kA}/\text{mm}^2$	$1\text{kA}/\text{mm}^2$
Kraft	0-0,4N	0,1 μm	0,2 μm	0,4 μm

Obwohl die Simulation ein externer Bereich der Produktentwicklung ist, werden die Betriebsparameter und auch die Leistungsdaten in der Datenbank hinterlegt. So haben die Experten einen schnellen Zugriff auf Parameter und Simulationsergebnisse, die für Beurteilungen anderer Entwicklungen erneut herangezogen werden können. Durch dieses Vorgehen wird ein Beitrag zur Reduzierung der Entwicklungszeit geleistet. Parallel zur Dateneingabe wurden die verschiedenen Module bzw. ihre Wirkungsweise aufeinander geprüft. Für eine Beurteilung der Technologie-Komplexität werden alle zu berücksichtigenden Prozessschritte in Tabelle 6.3 aufgeführt (Kurzform).

Tabelle 6.3: Herstellungsschritte des Sensors

Nr.	Prozessschritt	Anmerkung	Anlage
1	Beschichtung untere Flussführung (NiFe 45/55)	Kathodenzerstäuben	MRC-Metall
2	Erzeugung von Strukturen zum Abdecken der unteren Flussführung	Photolithographie	Maske
3	Strukturierung untere Flussführung	Ionenstrahlätzen	IBE
4	Isolierung untere Flussführung (SU-8)	Photolithographie	Maske
5	Erzeugung von Strukturen für Galvanik der Pole (AZ 9260)	Photolithographie	Maske
6	Herstellung der Pole (NiFe 81/19)	Galvanik	
7	Erzeugung von Strukturen für Galvanik der Spulen (AZ 9260)	Photolithographie	Maske
8	Herstellung der Spulen (Cu)	Galvanik	
9	Erzeugung von Strukturen für Galvanik der Vias (AZ 9260)	Photolithographie	Maske
10	Herstellung der Vias (Cu)	Galvanik	
11	Isolierung der Spulen (SU-8)	Photolithographie	Maske
12	Erzeugung von Strukturen für Galvanik der oberen Flussführung (AZ 9260)	Photolithographie	Maske
13	Herstellung obere Flussführung (NiFe 81/19)	Galvanik	
14	Erzeugung von Strukturen für Galvanik der Rückführung (AZ 9260)	Photolithographie	Maske
15	Herstellung der Rückführung (Cu)	Galvanik	

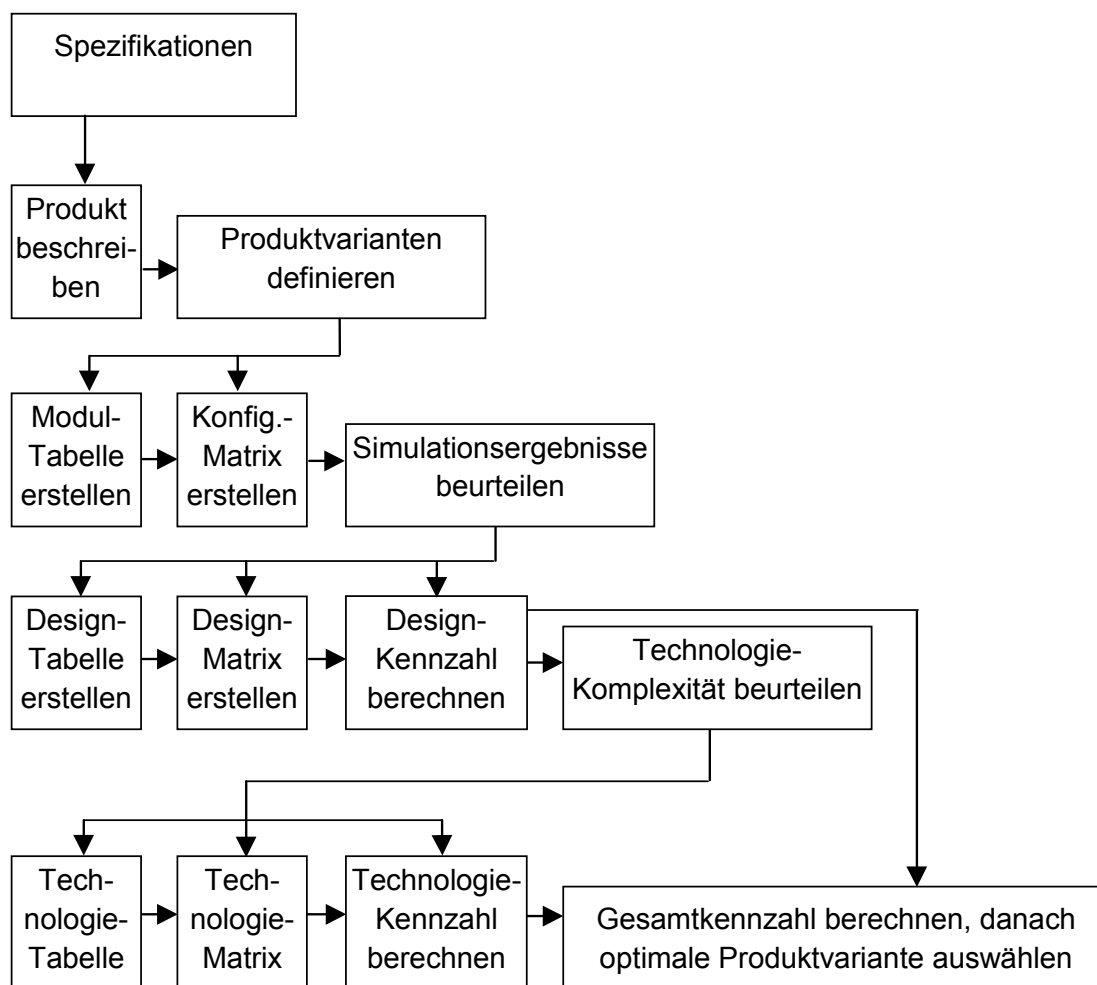
Gemäß Tabelle 6.3 ist die Abarbeitung von 15 Prozessschritten für die Herstellung des Mikrotransformators erforderlich. Angefangen mit der Beschichtung

der unteren Flussführung (NiFe 45/55) durch das Verfahren der Kathodenzerstäubung kann die Erzeugung von Strukturen zum Abdecken der unteren Flussführung durch Photolithographie erfolgen. Anschließend wird die Flussführung mittels Ionenstrahlätzen strukturiert. Als nächstes entsteht durch Photolithographie die Isolierung der unteren Flussführung (SU-8), die Herstellung der Pole (NiFe 81/19) und die Herstellung der Pole (NiFe 81/19) durch Galvanik. Der letzte Schritt dient der Herstellung der Rückführung (Cu) durch Galvanik. Ein Teil dieser Prozessschritte kommt im Rahmen der Fallstudie (Kapitel 7) für die Entwicklung eines Wirbelstromsensors ebenfalls zur Anwendung.

Nach der Dateneingabe und der Tests der Funktionsweisen und Zugriffsoperationen werden die Kennzahlenberechnungen überprüft. Dazu werden die entsprechenden Softwareoberflächen geöffnet. Die Simulationsergebnisse werden zunächst in der Design-Kennzahltable dargestellt. Die Berechnung der Design-Kennzahlen ist anschließend in der Design-Matrix aufgeführt. Für die Beurteilung der Technologie-Komplexität wird gleichermaßen verfahren. Zuerst erfolgt die Bewertung der Prozessschritte und daraufhin die Ermittlung der Technologie-Kennzahlen. Letztlich wird als letzter Schritt automatisch die Gesamtkennzahl errechnet. Somit sind die verschiedenen Produktvarianten miteinander vergleichbar und eine optimale Lösung geht daraus hervor.

7 Fallstudie: Entwicklung eines Wirbelstromsensors

Die vorangegangenen Kapitel fünf und sechs erläutern die Vorgehensweise der zielorientierten Varianten-Findung (ZVF) und beschreiben ihre computergestützte Umsetzung (CoVaFind). Im Rahmen dieser Arbeit wird nun die Methode anhand einer Fallstudie – Entwicklung eines Wirbelstromsensors – angewendet, die gleichzeitig den vollständigen Systemtest für CoVaFind darstellt. Die Schritte der Entwicklung erfolgen parallel mit der computerunterstützten Varianten-Findung (CoVaFind), welche die Zwischenergebnisse abbildet. Diese Tabellen und Matrizen, die im Produktentwicklungsprozess entstehen, sind als Screenshots dargestellt. Bild 7.1 zeigt den Ablauf der Fallstudie.



2005 int 5012-042

Bild 7.1: Ablauf der Fallstudie

Zuerst werden die Spezifikationen erfasst und das Produkt beschrieben. Anschließend entstehen mit Hilfe von Modulen verschiedene Varianten. Diese werden durch den Einsatz von Tabellen hinsichtlich der Simulationsergebnisse und der Technologie-Komplexität beurteilt. Die Ergebnisse der Beurteilungen werden als

Kennzahl abgebildet. Letztlich werden Gesamtkennzahlen errechnet und auf Grund dieser Ergebnisse kann eine optimale Variante ausgewählt werden.

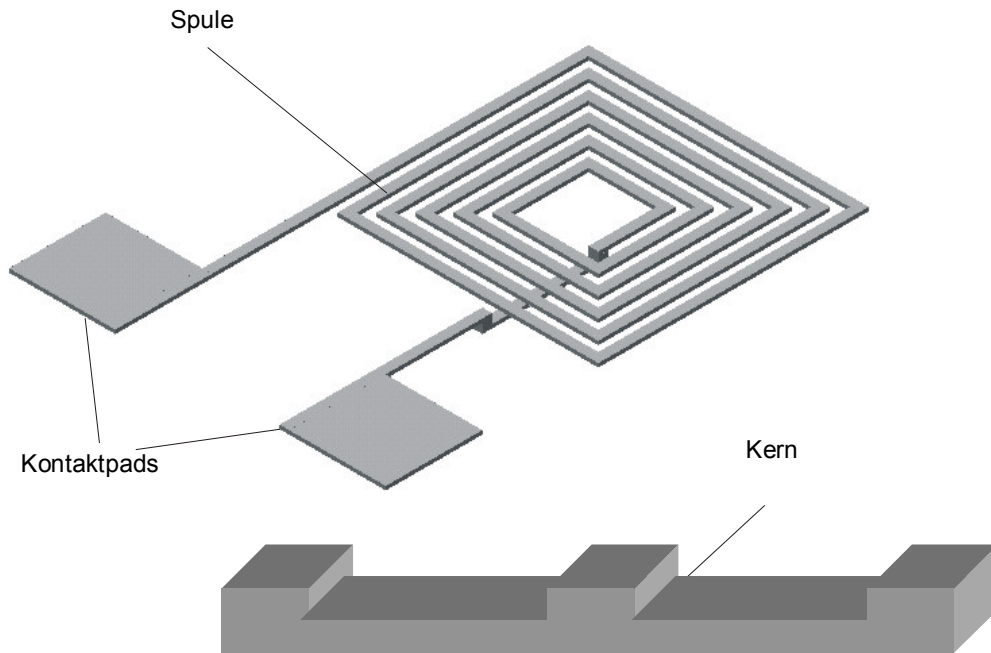
Als Beispiel für die Fallstudie wird ein Wirbelstromsensor verwandt. Der Wirbelstromsensor ist als mikrotechnisches Bauteil am Institut für Mikrotechnologie der Universität Hannover entwickelt und mittels dünnfilmtechnischen Verfahren hergestellt worden [GAT02, AND05, ISW05]. Im Anschluss an die Fallstudie werden die Ergebnisse der ZVF und die der realen Entwicklung miteinander verglichen.

7.1 Bauteilbeschreibung des Wirbelstromsensors

Ein Wirbelstromsensor hat ein breites Anwendungsgebiet und kann beispielsweise zur Ermittlung von Werkstofffehlern wie Lunker, Risse oder Korrosionen und zur Bestimmung von Materialparametern, wie elektrische Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität, eingesetzt werden. Die im Fallbeispiel geforderte Anwendung ist ein miniaturisierter Näherungssensor (Anforderung), der nach dem Wirbelstromverfahren arbeiten soll, was wie folgt funktioniert: Die Messgröße, die induzierte Spannung in der Sensorspule, dient zur Abstandsmessung. Die Erregerspule erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, wodurch Wirbelströme im leitfähigen Prüfobjekt induziert werden, die wiederum den Aufbau eines entgegengerichteten magnetischen Wechselfeldes verursachen. Dieses Wechselfeld wird über eine Sensorspule ausgewertet. Im Falle einer Abstandsvariation ändert sich die in der Sensorspule induzierte Spannung (bei Entfernung des Sensors vom Prüfobjekt vermindert sich die Spannung und umgekehrt).

Zur Umsetzung der Anforderungen ist zunächst die Struktur des Sensors festzulegen. Der Sensor besteht aus Erregerspule, Sensorspule und magnetischem Kern. Üblicherweise wird eine Prinzipskizze oder Zeichnung des Bauteils angefertigt, um den Aufbau und die Anordnung der Produktelemente besser erfassen zu können. Bild 7.2 zeigt die prinzipiellen Elemente des Wirbelstromsensors: Spule, magnetischer Kern sowie Kontaktpads (Leiterzuführungen). Für die Kontaktpads ist zusätzlich Entwicklungsarbeit zu leisten, da sie die Verbindung an die Makrowelt realisieren, wodurch ihre Lage und Größe entscheidend ist.

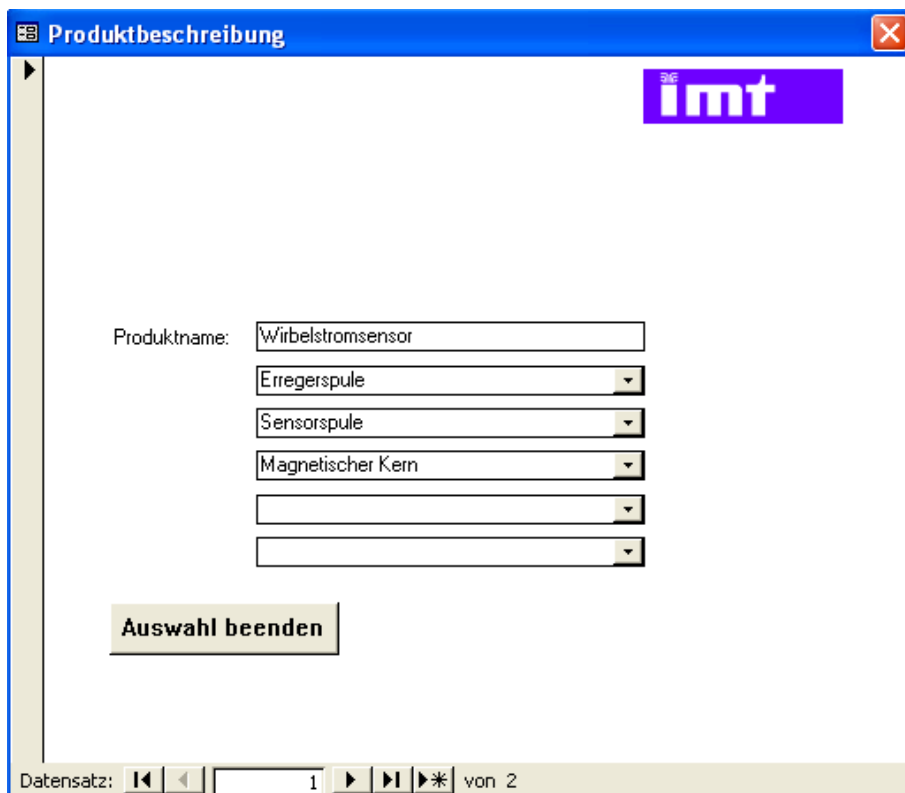
In Bild 7.3 wird der Ausschnitt aus CoVaFind dargestellt, der die Produktelemente des Wirbelstromsensors bestimmt und der durch Anklicken der Schaltfläche *Produktbeschreibung* auf der Oberfläche des Formulars *Start ZVF* erscheint. Es ist zu erkennen, dass zunächst ein Name für das zu entwickelnde Produkt einzugeben ist. Als Name wird *Wirbelstromsensor* gewählt. Danach werden anhand der Pull-down-Menüs die Module Erregerspule, Sensorspule und magnetischer Kern für den Aufbau des Sensors festgelegt. Da im unteren Rahmen der Softwareoberfläche die Datensätze aus anderen Entwicklungen aufgerufen werden können, kann an dieser Stelle verglichen werden, aus welchen Elementen Sensoren aus früheren Entwicklungen zusammengesetzt waren.



2005 imt 5012-043

Bild 7.2: Produktelemente eines Wirbelstromsensors

Die Schaltfläche *Auswahl beenden* schließt den Vorgang ab. Es kann zur Oberfläche *Start ZVF* zurückgekehrt werden, um weiter fortzufahren.



2005 imt 5012-044

Bild 7.3: Produktbeschreibung eines Wirbelstromsensors

7.2 Definition der Produktvarianten des Wirbelstromsensors

Auf Grund der Bauteilbeschreibung müssen nun aus der Datenbank die erforderlichen Informationen bzw. Details zu den jeweiligen Modulen zusammengestellt werden (Tabelle 7.1) [AND05, ISW05].

Tabelle 7.1: Modul-Tabelle

Module	Name	Abmessungen [μm]						Leistungsdaten		Werkstoff
		Spule	Geometrie d. Windungen	Isolationsabstand zw. den Windungen	Isolationsabstand Magnetkern horiz.	Vertik. Isola.abst. zw. d. Strukturen			Stromdichte [kA/mm^2]		Permeabilität	Hauptwerkstoff
	Erregerspule									
Modul A1	Spiralspule	10x5	5	5	2			1		Cu
Modul A2	Helixspule	10x5	5	10	5			1		Cu
Modul A3	Spiralspule	70x5	-	9	5			1		Cu
	Sensorspule									
Modul B1	Spiralspule	10x5	5	5	9			1		Cu
Modul B2	Helixspule	10x5	5	5	5			1		Cu
	Magnetischer Kern									
		a	b	c	d	e	f	(a-f siehe Bild 7.4)		
Modul C1	U- Kern	178	200	20	50	50	-		500	NiFe
Modul C2	U- Kern	63	370	20	50	50	-		500	NiFe
Modul C3	E- Kern	20	370	50	50	10	110		500	NiFe

Die Tabelle beinhaltet Detailbeschreibungen von Erregerspulen (A1 bis A3) und Sensorspulen (B1 bis B2). Es werden jeweils die zwei verschiedenen Ausführungsformen Spiral- und Helixspule dargestellt. Für sie sind Angaben zu Abmessungen wie Geometrie der Windungen, Isolationsabstand zwischen den Windungen, Isolationsabstand zum magnetischen Kern sowie der vertikale Isolationsabstand zwischen den Strukturen aufgeführt. Weiterhin sind unter dem Begriff Leistungsdaten zwei Spalten mit Angaben zur Stromdichte und zur Permeabilität zu finden. Die letzte Spalte enthält den verwendeten Hauptwerkstoff. Ferner sind Daten zu den Spezifikationen der magnetischen Kerne (C1 bis C3) als Variation in den Formen U- bzw. E-Kern aufgelistet. Die Bemaßungen (a-f) sind Bild 7.4 zu entnehmen. Dieses Bild zeigt die Variationsmöglichkeiten des magnetischen Kerns: C1 (obere Abbildung), C2 (mittlere Abbildung) und C3 (untere Abbildung). C1 und C2 unterscheiden sich nur in den zwei Abmessungen a und b und sind ansonsten bezüglich aller anderen Abmessungen identisch aufgebaut. Im unteren Teil des Bildes ist ein E-Kern mit der zusätzlichen Abmessung f zu sehen.

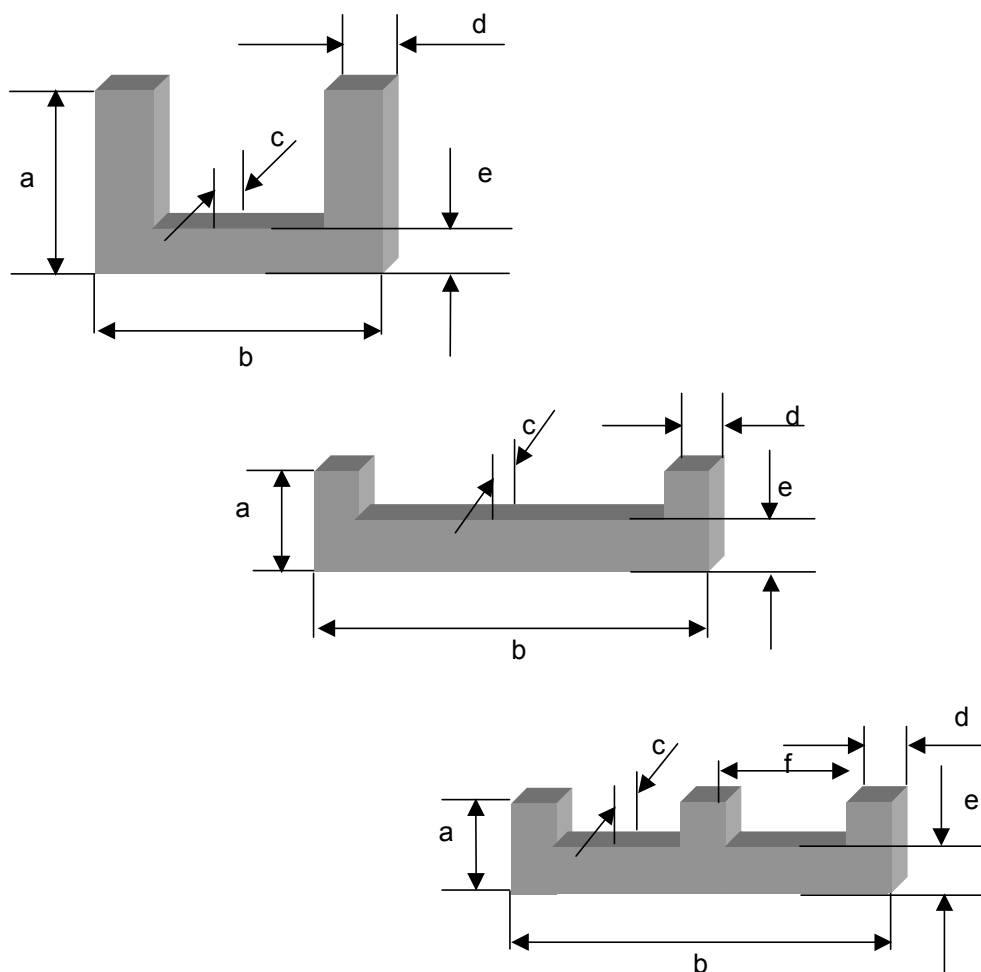
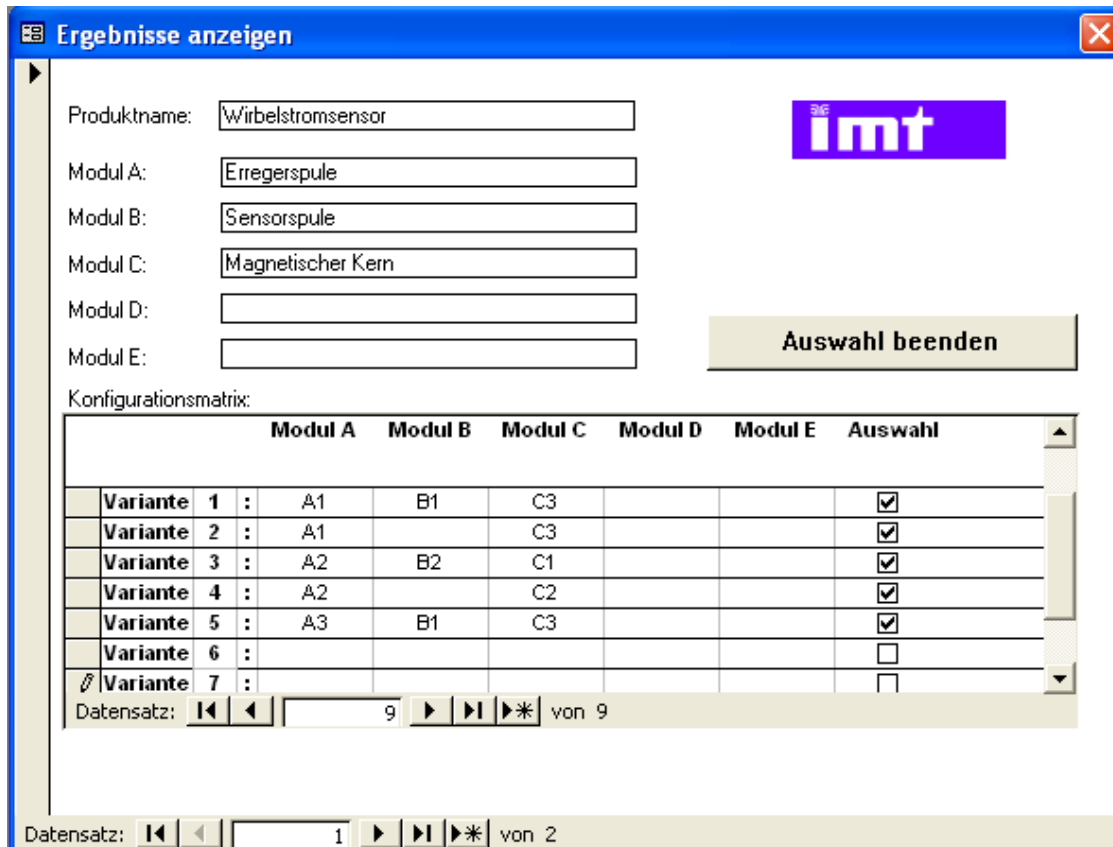


Bild 7.4: Variationen magn. Kerne: C1 und C2 (U-Form) und C3 (E-Form)

Aus der Modul-Tabelle (Tabelle 7.1) werden auf Grund der dargestellten Spezifikationen innerhalb einer Expertenrunde Modulausführungen ausgewählt und mehrere Produktvarianten definiert. Die Ergebnisse der Definition (Konfigurations-Matrix) werden in Bild 7.5 als Ausschnitt aus CoVaFind gezeigt. Im oberen Bereich des Bildes sind für einen besseren Überblick nochmals der Produktname und die Elemente, aus denen das Produkt bestehen soll, dargestellt. Im unteren Bereich des Bildes sind alle definierten Produktvarianten aufgelistet. Diese Softwareoberfläche kann mit *Auswahl beenden* wiederum verlassen werden.



2005.imt.5012-046

Bild 7.5: Konfigurations-Matrix

Es liegen nun fünf Varianten, die aus den Modulen zusammengesetzt sind, vor. Von jeder Konfiguration sind Prinzipskizzen anzufertigen, um im Vorfeld Leitungen sowie Lage und Größe der Kontaktpads berücksichtigen zu können. Die Prinzipskizzen zeigt Bild 7.6 (Variante 1 bis 5 von oben nach unten). Es sind jeweils die Erregerspule, ggf. die Sensorspule, der magnetische Kern, die Kontaktpads und die Leiterzuführungen zu erkennen. Im Folgenden werden die Produktvarianten kurz erläutert.

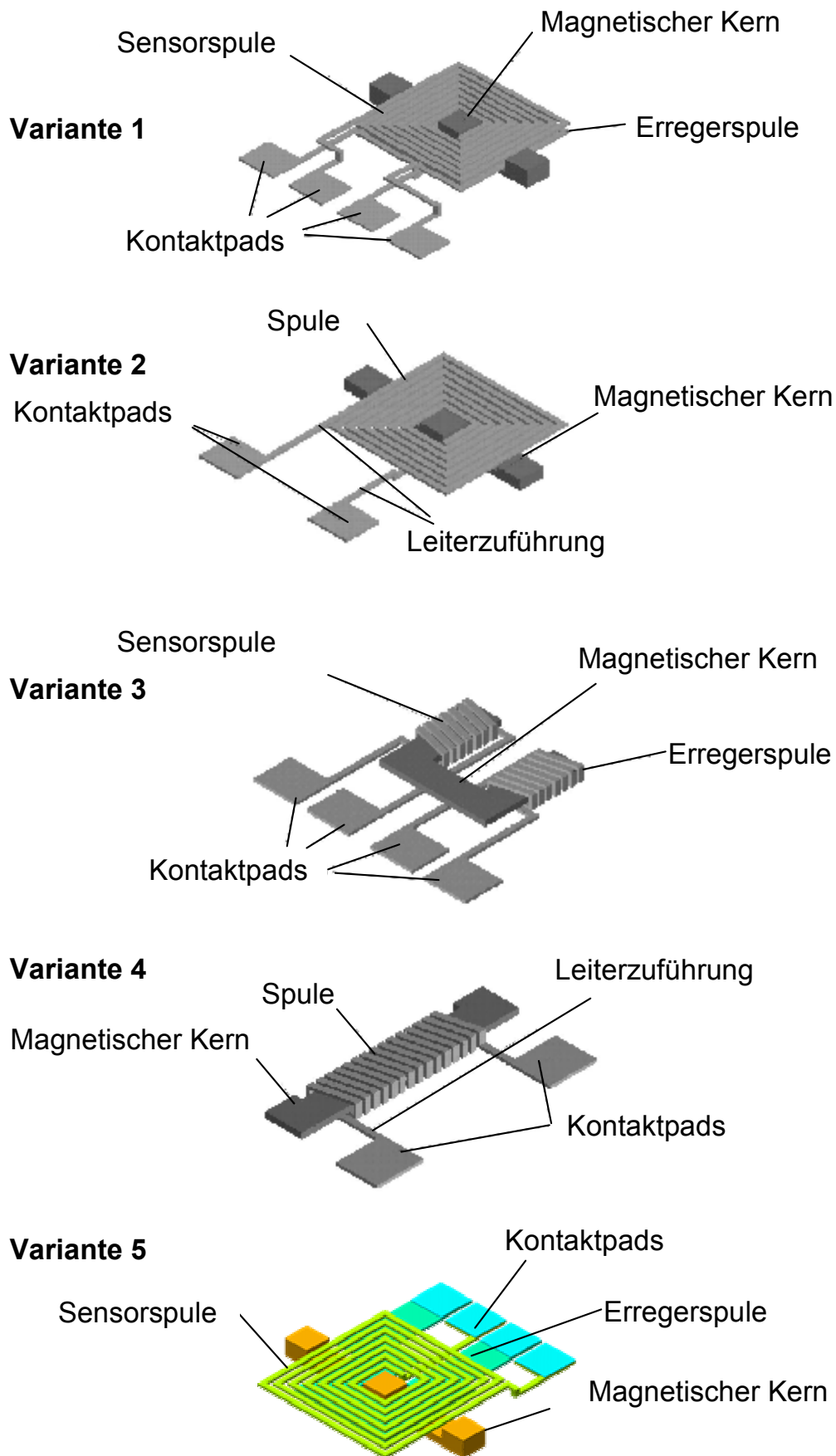


Bild 7.6: Prinzipskizzen der Produktvarianten 1 bis 5 [ISW05]

Für Variante 1 dient sowohl als Erreger- als auch als Sensorspule (Modul A1 und B1) jeweils eine Spiralspule. Der magnetische Kern liegt als E-Kern (C3) vor. Bei Variante 2 wird nur eine Spiralspule (Modul A1) verwendet, die Erreger- und Sensierfunktion übernimmt. Hier wird ebenfalls ein E-Kern (Modul C3) benötigt. Für Variante 3 sind zwei Helixspulen (Modul A2 und B2) sowie ein U-Kern (Modul C1) im Einsatz. Ferner besteht Variante 4, wie schon Variante 2, nur aus einer Spule (A2) und einem U-Kern (Modul C2). Letztlich ist Variante 5 aus den Modulen A3, B1 und C3 zusammengesetzt. Die definierten Varianten sind nun hinsichtlich der Kombinationsfähigkeit ihrer Module zu untersuchen. Jede Variante ist in Tabelle 7.2 mit allen beteiligten Modulen dargestellt. Experten überprüfen die Kombinationsfähigkeit der Module untereinander mittels paarweisen Vergleichs. Beispielsweise werden für Variante 5 die Module A3 mit B1, A3 mit C3 sowie B1 mit C3 hinsichtlich der Kategorien positiv (+), negativ (-) oder neutral (O) für ihr Zusammenwirken beurteilt. Da von der Expertenrunde bei den aufgeführten Produktvarianten keine negativen Beeinflussungen der Module untereinander ermittelt werden können, sind keine Fehler auf Grund der Modulzusammenstellung zu erwarten.

Tabelle 7.2: Überprüfung der Kombinationsfähigkeit der Module

Variante 1	A 1	B 1	C 3
A 1		+	O
B 1			O
C 3			

Variante 2	A 1	C 3
A 1		+
C 3		

Variante 3	A 2	B 2	C 1
A 2		+	O
B 2			O
C 1			

Variante 4	A 2	C 2
A 2		+
C 2		

Variante 5	A 3	B 1	C 3
A 3		+	O
B 1			O
C 3			

Die Expertenrunde hat nach der Konfiguration der Produktvarianten und der Überprüfung der Kombinationsfähigkeit ihrer Module die Varianten erarbeitet, mit denen die Entwicklung nun hinsichtlich der Beurteilung der Design- und Technologieaspekte fortgesetzt wird.

7.3 Beurteilung des Designs des Wirbelstromsensors

Die fünf Produktvarianten werden mittels Simulationen im Rahmen einer weiteren Dissertation überprüft [ISW05]. Experten legen zunächst die Betriebsparameter für die Simulationen fest (Tabelle 7.3). Als Eingangswerte werden Messfrequenz, Stromdichte und Messabstand verwendet.

Tabelle 7.3: Design-Tabelle (Werte gelten für alle Varianten)

Eingangswerte	Spezifikationswert	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
Messfrequenz	100kHz-100MHz	100kHz	1MHz	100MHz
Stromdichte	1kA/mm ²	1kA/mm ²	1kA/mm ²	1kA/mm ²
Messabstand	10, 30, 50µm	10µm	30µm	50µm

Für jede Produktvariante sind mehrere Simulationsläufe angesetzt, in denen die Spezifikationswerte (Messfrequenz zwischen 100kHz-100MHz, Stromdichte 1kA/mm² und Messabstand zwischen 10, 30 und 50µm) variieren. Bild 7.7 zeigt die Simulationenwerte des ersten Simulationslaufes beispielhaft für Produktvariante 5 (Design-Tabelle).

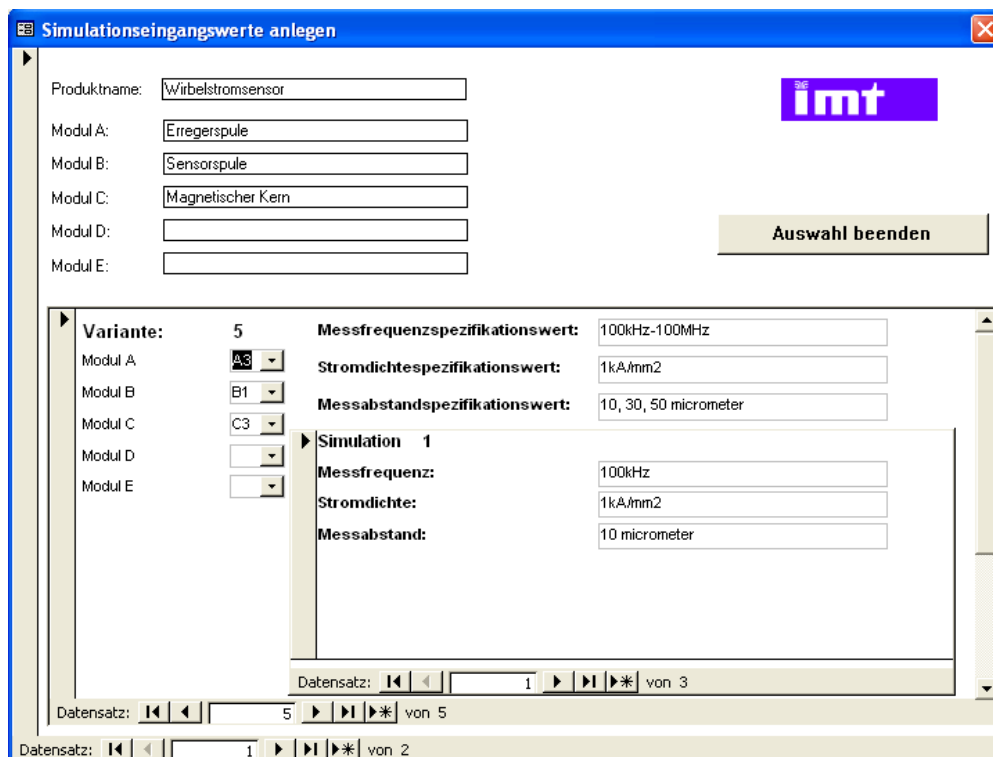


Bild 7.7: Design-Tabelle beispielhaft für Variante 5

Die Simulationsergebnisse (erreichte Leistungswerte) dienen als Grundlage für die Berechnung der Design-Kennzahlen und zur Erstellung der Design-Matrix. Insgesamt erfolgen drei Simulationen für jede Variante. Im oben Bildbereich sind wie in allen Softwareoberflächen zuerst Produktname und die Elemente, aus denen das Produkt bestehen soll, gezeigt. Darunter ist ein quadratischer Arbeitsbereich angeordnet, der die Produktvarianten mit ihren jeweiligen Modulen und die Spezifikationswerte der Simulationen enthält. Der beschriebene Bereich beinhaltet eine weitere Arbeitsfläche, welche die verschiedenen Simulationen mit ihren jeweiligen Eingangswerten zeigt. Die für die Simulationen verwendeten Werte sind alle mittels dieser Softwareoberfläche einzutragen. Sie kann nach der Eingabe mit *Auswahl beenden* verlassen werden.

Tabelle 7.4 zeigt die ermittelten Leistungswerte für Variante 5. Die Werte beziehen sich auf die Änderung der Spulenimpedanz (für die Produktvariante 2, 4 und 5 bevorzugt bewertet). Ferner wird die Änderung der induzierten Spannung in der Sensorspule (für Variante 1 und 3 bevorzugt betrachtet) verwendet.

Tabelle 7.4: Design-Kennzahltable (Variante 5)

Leistungswert	Spezifikationswert	Wertigkeit	Simulationsergebnis 1	Teilkenzahl	Simulationsergebnis 2	Teilkenzahl	Simulationsergebnis 3	Teilkenzahl
Spulenimpedanz	8	1	8	1,00	9	0,89	8	1,00
D_{Si}	-		1		0,89		1	
D_5	0,96							

Der Spezifikationswert in dieser Tabelle beschreibt einen Sollwert, d.h. er gibt einen definierten Wert an, den die Experten von dem Produkt erwarten. Er wird einmalig für die laufende Entwicklung des Wirbelstromsensors von ihnen gewichtet. Die Änderung der Spulenimpedanz erhält von den Experten die Wertigkeit 1. Da in diesem Fallbeispiel nur zwei Leistungswerte zum Tragen kommen, erhält die Änderung der induzierten Spannung ebenfalls die Wertigkeit 1.

Alle weiteren Spalten zeigen die in den Simulationen erreichten Werte, denen durch die und Experten zur Standardisierung Zahlenwerte zwischen 1 (Minimalwert)

und 10 (Maximalwert) zugeordnet sind. Letztlich sind die berechneten Teilkennzahlen jeweils zu erkennen. Bild 7.8 stellt die ermittelten Leistungswerte für Variante 5 (Simulationslauf 1) als CoVaFind-Ausschnitt dar.

Produktname:

Modul A:

Modul B:

Modul C:

Modul D:

Modul E:

imt

Auswahl beenden

Variante: 5

Modul A:

Modul B:

Modul C:

Modul D:

Modul E:

Messfrequenzspezifikationswert:

Stromdichtespezifikationswert:

Messabstandspezifikationswert:

Simulation 1

Messfrequenz:

Stromdichte:

Messabstand:

	Leistungwert	Sp.-Wert	Wertigkeit	Simu.-erg.	Teilkennz.
1	Spulenimpedanz	8	1	8	1
2					
3					
4					

Designkennzahl:

Simulationsteilkennzahl:

Datensatz: von 3

Datensatz: von 5

Datensatz: von 2

2005 imt 5012-049

Bild 7.8: Design-Kennzahltable (Variante 5)

Für die Berechnung der Teilkennzahlen und der Design-Kennzahlen werden die Gleichungen aus Kapitel 5 (Formel 5-1, 5-2 und 5-3) angewendet. Als Ergebnis entstehen die folgenden fünf Design-Kennzahlen: $D_1=1,22$, $D_2=1,27$, $D_3=1,44$, $D_4=1,71$ und $D_5=0,96$ (niedrigste), die in die Design-Matrix (Bild 7.9) übertragen werden. Darüber hinaus ist in der Darstellung der Spezifikationswert und der Leistungswert zu ersehen sowie der jeweilige „beste“ Wert, der pro Variante erreicht wurde. Auf Grund der Ergebnisse, die aus der Designüberprüfung hervorgegangen sind, wird deutlich, dass die Produktvariante 5 (kleinster erreichter Kennzahlwert), die zwei Spiralspulen verwendet, für die Umsetzung des Wirbelstromsensors bezüglich Designaspekten am Besten geeignet. Für die Technologie-Betrachtung werden aber weiterhin alle 5 Produktvarianten betrachtet. Die Bestimmung der tatsächlichen, optimalen Variante ist erst nach Berechnung der Gesamtkennzahl möglich.

Produktname:

Modul A:

Modul B:

Modul C:

Modul D:

Modul E:

Spulenimpedanz **Induzierte Spannung**

Wertigkeit **Wertigkeit**

Ergebnisse:

	Spulenimpedanz	Induzierte Spannung	Design-Kennzahl
Variante 1 :		4	1,22
Variante 2 :	7		1,27
Variante 3 :		4	1,44
Variante 4 :	7		1,71
▶ Variante 5 :	9		0,96
* Variante :			

Datensatz: von 2

2005.imt 5012-050

Bild 7.9: Design-Matrix (jeweils bester Leistungswert)

7.4 Beurteilung der Technologie des Wirbelstromsensors

Die Produktvarianten werden hinsichtlich der prozesstechnischen Möglichkeiten für ihre Fertigung untersucht. Zunächst müssen die notwendigen Prozessschritte, die zur Herstellung des unteren Kerns, der Isolationen, der Spulen, der Pole, usw. erforderlich sind, aus der Datenbank zusammengestellt werden. Die Expertenrunde, wählt die erforderlichen Prozessschritte für jede Variante aus. In Tabelle 7.5 sind alle Schritte zur Fertigung von Produktvariante 5 dargestellt. Zusätzlich sind die erforderlichen Teilschritte angegeben wie beispielsweise bei der Photolithographie Belacken, Randentlackung, Thermobehandlung, Positivbelichtung und Entwicklung. Die Bewertung der Schritte erfolgt durch Zahlen zwischen 1 (gut) und 5 (schlecht). Die Labornamen der verwendeten Geräte zur Durchführung der Prozesse wie MRC-Metall, Leybold oder IBE sind in der Spalte *Anlagen* aufgeführt. Für die Fertigung des Wirbelstromsensors der Produktvariante 5 sind insgesamt 38 Schritte, neun Anlagen und neun Masken notwendig. Nach Auswahl aller Schritte für alle Varianten muss der Schwierigkeitsgrad, der Reifegrad und die Komplexität (nur bei betrachtet bei Maskenschritten) bewertet werden. Ferner wird zu den Kriterien eine Wertigkeit vergeben (Tabelle 7.6).

Tabelle 7.5: Technologie-Tabelle (Variante 5)

Nr.	Prozessschritt	Anmerkung	Anlage
1	Wafervorbereitung	Vorreinigung, normale Reinigung	
2	Abscheidung NiFe	NiFe 81/19	MRC-Metall
3	Photolithographie	Bel., Thermob., Ruhen, Positivb., Entwi.	Maske 3
4	Galvanik	NiFe	
5	Haft-Startschicht ätzen	Ionenstrahlätzen	IBE
6	Einbetten/Strukturieren	Bela., Therm., Neg., Ther., Entw., Ther.	Maske 5
7	Planarisieren		
8	Photolithographie	Bela., Therm., Neg., Therm., Flutb., Entw.	Maske 4
9	Abscheidung Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Leybold
10	Lift-Off	Lösungsmittel	
11	Abscheidung Au	Sputterätzen, Cr, Au	
12	Photolithographie	Belack. , Randentl., Thermo., Pos., Entw.	Maske 6
13	Galvanik	Cu	
14	Photolithographie	Belack. , Randentl., Thermo., Pos., Entw.	Maske 7
15	Galvanik	Cu, Ni, Au	
16	Haft-Startschicht ätzen	Ionenstrahlätzen	IBE
17	Abscheidung NiFe81/19	Cr, NiFe 81/19	MRC-Metall
18	Photolithographie	Belack. , Rand., Thermo., Pos., Entw.	Maske 4
19	Galvanik	NiFe 81/19	
20	Haft-Startschicht ätzen	Ionenstrahlätzen	
21	Einbetten+Strukturieren	Bela., Therm., Neg., Ther., Entw., Ther.	Maske 5
22	Planarisieren		
23	Photolithographie	Bel., Therm., Neg., Therm., Flutb., Entw.	Maske 5
24	Abscheidung Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Leybold
25	Lift-off	Lösungsmittel	
26	Abscheidung Au	Sputterätzen, Cr, Au	MRC-Metall
27	Photolithographie	Belac. , Rand., Thermo., Pos., Entw.	Maske 8
28	Galvanik	Cu	
29	Photolithographie	Belac. , Rand., Thermo., Pos., Entw.	Maske 9
30	Galvanik	Cu	
31	Haft-Startschicht ätzen	Ionenstrahlätzen	IBE
32	Abscheidung NiFe	Cr, NiFe 81/19	
33	Photolithographie	Bel., Pos., Thermo., Positivbel., Entw.	Maske 4
34	Galvanik NiFe 81/19	NiFe 81/19	
35	Haft- Startschicht ätzen	Ionenstrahlätzen	IBE
36	Einbetten+Strukturieren	Bela., Therm., Neg., Ther., Entw., Ther.	Maske 5
37	Planarisieren		
38	Kontaktierung		

Tabelle 7.6: Technologie-Kennzahltable (Variante 5)

Schritte	Schwierigkeitsgrad	Wertigkeit	Reifegrad	Wertigkeit	Komplexität	Wertigkeit
1	1	0,15	1	0		
2	3	0,25	1	0,15		
3	4	0,5	2	0,25	3	0,25
4	3	0,5	2	0,25		
5	2	0,5	1	0,25		
6	5	1	5	1	2	0,75
7	5	0,75	5	0,75		
8	4	0,5	2	0,25	2	0,5
9	3	0,25	1	0,15		
10	3	0,5	3	0,25		
11	2	0,25	1	0,15		
12	4	0,5	3	0,25	3	0,25
13	3	0,5	2	0,25		
14	4	0,5	2	0,25	3	0,25
15	3	0,5	2	0,25		
16	2	0,75	1	0,15		
17	2	0,25	1	0,15		
18	4	0,5	2	0,25	3	0,5
19	3	0,5	2	0,25		
20	2	0,5	1	0,25		
21	5	1	5	1	2	0,75
22	5	0,75	5	0,75		
23	4	0,5	2	0,25	2	0,75
24	3	0,25	1	0,25		
25	3	0,5	3	0,25		
26	2	0,25	1	0,15		
27	4	0,5	3	0,25	4	0,25
28	3	0,5	2	0,25		
29	5	0,5	4	0,25	5	0,25
30	3	0,5	2	0,25		
31	2	0,5	1	0,25		0
32	2	0,25	1	0,15		
33	4	0,5	2	0,25	3	0,5
34	3	0,5	2	0,25		
35	2	0,5	1	0,15		
36	5	0,75	3	0,5	2	0,75
37	5	0,75	5	0,75		
38	4	0,5	5	0,75		
Teilkennzahl	S= 1,81		R=1,03		K=0,38	

Anschließend erfolgt die Berechnung von Teilkennzahlen gemäß den Gleichungen aus Kapitel 5 (Formel 5-4, 5-5, und 5-6). Für Variante 5 errechnen sich folgende Kennzahlen: Schwierigkeitsgrad=1,81, Reifegrad=1,03 und Komplexität=0,38. Aus diesen Teilkennzahlen muss nun eine Technologie-Kennzahl für Variante 5 mit Hilfe von Gleichung 5-7 ermittelt werden. Alle Ergebnisse sind in Bild 7.10, das die Technologie-Kennzahltable als Ausschnitt aus CoVaFind zeigt, dargestellt. Im Bild sind neben Produktname und Produktelementen verschiedene Arbeitsbereiche angeordnet.

The screenshot shows a software window titled 'Prozessschritte' with the 'imt' logo. It contains several input fields for product and module information, and a table of process steps. The table has the following data:

Variante:	Name	Schwierigkeitsgrad	Reife-grad	Komplexität
5	Photolithographie	4	3	3
ges.		1,81	1,03	0,38
Technologie-Kennzahl		0,90		

Navigation controls at the bottom show 'Datensatz: 17 von 17' and 'Datensatz: 1 von 2'.

2005 imt 5012-051

Bild 7.10: Technologie-Kennzahltable (Variante 5)

Hiermit bietet sich die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Produktentwicklungen und den Varianten der Entwicklung des Wirbelstromsensors hin und her zu springen. Im letztgenannten Bereich können über Pull-Down-Menüs Schritte ausgewählt und Zahlenwerte für den Schwierigkeits- und den Reifegrad sowie die Komplexität eingegeben werden. Die Teilkennzahlen sowie die Gesamtkennzahl werden automatisch errechnet. Nach Berechnung der Kennzahlen für alle Varianten wird mit *Auswahl beenden* die Softwareoberfläche geschlossen.

Die 5 Technologie-Kennzahlen ergeben sich zu: $T_1=1,20$, $T_2=0,86$, $T_3=1,32$, $T_4=1,06$ und $T_5=0,90$. T_2 und T_5 sind die besten Kennzahlenwerte. Die Teilkennzahlen sowie die Technologie-Kennzahlen werden in die Technologie-Matrix

übertragen. Bild 7.11 beinhaltet im Wesentlichen die Daten, die aus der Beurteilung der Technologie-Komplexität hervor gehen.

Ergebnisse anzeigen

Produktname:

Modul A:

Modul B:

Modul C:

Modul D:

Modul E:

imt

Auswahl beenden

Ergebnisse:

	Schwierig.- grad	Reife grad	Kom- plexität	Technologie- Kennzahl
Variante 1 :	2,21	1,41	0,59	1,20
Variante 2 :	1,73	1,01	0,36	0,86
Variante 3 :	2,56	1,94	0,38	1,32
Variante 4 :	2,05	1,44	0,38	1,06
▶ Variante 5 :	1,81	1,03	0,38	0,90
* Variante :				

Datensatz: von 5

Datensatz: von 2

2005 imt 5012-062

Bild 7.11: Technologie-Matrix

7.5 Auswahl der optimalen Produktvariante

Mit Hilfe der Gesamtkennzahl sollen die ermittelten Ergebnisse aus den beiden Entwicklungsbereichen Design und Technologie miteinander in Bezug gesetzt werden. Die Design-Kennzahlen der Produktvarianten und damit die Beurteilung der Simulationsergebnisse, stellen sich durch die folgenden Werte dar: $D_1=1,22$, $D_2=1,27$, $D_3=1,44$, $D_4=1,71$ und $D_5=0,96$ (Design-Matrix Bild 7.9). Ferner gibt für jede Variante eine Technologie-Kennzahl die Beurteilung der Technologie-Komplexität an: $T_1=1,20$, $T_2=0,86$, $T_3=1,32$, $T_4=1,06$ und $T_5=0,90$ (Bild 7.11). stellt die Ermittlung der Gesamtkennzahlen sowie die Auswahl der optimalen Variante dar.

Gemäß Gleichung 5-8 wird für jede Produktvariante eine Gesamtkennzahl errechnet: $K_1=1,21$, $K_2=1,07$, $K_3=1,38$, $K_4=1,39$ und $K_5=0,93$. Produktvariante 5 hat die niedrigste Kennzahl und ist damit der beste Entwurf. Das Gesamtergebnis wird in Bild 7.12 dargestellt.

Ergebnisse anzeigen

Produktname:

Modul A:

Modul B:

Modul C:

Modul D:

Modul E:

imt

Auswahl beenden

Ergebnisse:

	Design-Kennzahl	Technologie-Kennzahl	Gesamt-kennzahl
Variante 1 :	1,22	1,20	1,21
Variante 2 :	1,27	0,86	1,07
Variante 3 :	1,44	1,32	1,38
Variante 4 :	1,71	1,06	1,39
Variante 5 :	0,96	0,90	0,93

Datensatz: von 5

Datensatz: von 2

2005 imt 5012-053

Bild 7.12: Auswahl der optimalen Variante

Die Entwicklung ist im Rahmen der Fallstudie damit abgeschlossen und alle Schritte sind in der Datenbank dokumentiert. Eine zusätzliche Planung zur Durchführung von Vorversuchen ist auf Grund der Ergebnisse der Bewertungen der Reifegrade von einzelnen Prozessschritten nicht notwendig. Daher ist die Methode somit beendet. Das Ergebnis der Fallstudie deckt sich mit den weiteren Arbeiten am Institut für Mikrotechnologie der Universität Hannover. Dort wurde ebenfalls die Sensorvariante 5 ausgewählt und umgesetzt. Für die Fertigung kann eine Entwurfsfreigabe erfolgen. Für die Entstehung eines mikrotechnischen Produktes sind nach der Entwurfsfreigabe weitere Schritte zu durchlaufen (Bild 5.3). Daher kann im Anschluss ein Zeitplan erstellt werden. Die terminliche Verfolgung erfolgt durch Meilensteine. Der erste ist die Maskenfreigabe, der zweite der Abschluss der Technologieentwicklung. Dritter und vierter Meilenstein sind Fertigstellung des Prototyps bzw. Abschluss der Erprobung. Der fünfte und letzte Meilenstein ist die Produktfreigabe.

7.6 Vergleich Sensorentwicklung - Fallstudie

Der für die Fallstudie verwendete Wirbelstromsensor wurde am Institut für Mikrotechnologie in verschiedenen Versionen modelliert und simuliert bevor die ZVF verfügbar war. Zur Umsetzung wurde der gleiche Sensor ausgewählt, den auch die ZVF als optimale Variante (Variante 5) bestimmte. Bild 7.13 zeigt seine isometrische Darstellung.

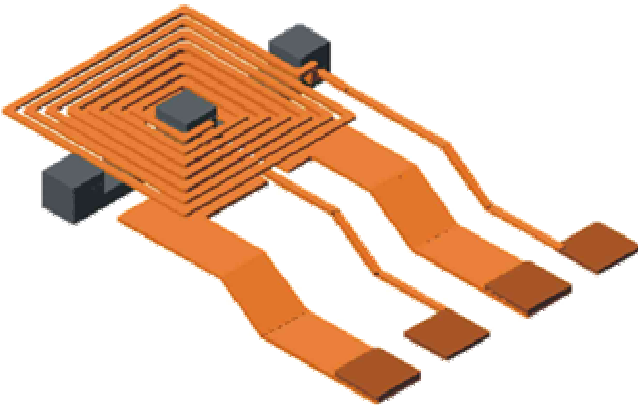


Bild 7.13: Variante 5

8 Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden alle Ergebnisse der Arbeit dargestellt und diskutiert. Dabei werden die Entwicklung der Methode, die computergestützte Umsetzung und ihre Anwendung in der Fallstudie betrachtet. Im Anschluss wird ein Gesamtzusammenhang aus den Ergebnissen der Methode und ihrer Verwendung hinsichtlich mikrotechnischer Produkte dargestellt.

Der erste Schritt, den die Methode der zielorientierten Varianten-Findung (ZVF) leisten muss, ist die Definition der Produktvarianten. Die Varianten setzen sich aus mehreren Modulen zusammen. Der Aufbau aus Modulen (Baukastenstruktur) hat gezeigt, dass die Varianten durch diese Strukturierung gut zu beschreiben sind und für die weiteren Entwicklungsschritte schnell vergleichbar werden. Die Darstellung mit Hilfe der Konfigurations-Matrix schafft dabei Transparenz (Tabelle 5.2). Um nun eine umfassende Beurteilung der Simulationsergebnisse zu ermöglichen, werden ihre Eingangs- und Ausgangswerte betrachtet. Hierzu kommen mehrere Tabellen sowie eine Design-Matrix (Tabelle 5.5) zum Einsatz. Anhand einer Design-Kennzahl, die für jede Variante berechnet wird, ist anschließend eine Differenzierung möglich. Da zur späteren Fertigung des Produktes viele Prozessschritte erforderlich sind, wird ferner eine Beurteilung der Technologie-Komplexität durchgeführt. Im Vergleich zur Beurteilung der Simulationsergebnisse werden hier drei einzelne Bewertungsgrößen zur Charakterisierung der Schritte herangezogen. Gemäß Tabelle 5.8 werden Schwierigkeitsgrad, Reifegrad und Komplexität (nur betrachtet bei Maskenschritten) in der Technologie-Matrix dargestellt. Zur Unterstützung werden ebenfalls Kennzahlen für die Suche der optimalen Produktvariante herangezogen. Um ein Optimum aus Design- und Technologieaspekten zu ermitteln, wird letztlich eine Gesamtkennzahl aus Design- und Technologie-Kennzahl berechnet. Somit können alle Faktoren berücksichtigt werden, aber nur eine Variante erhält die Entwurfsfreigabe. Die Verwendung von Formblättern (Tabellen und Matrizen) und Kennzahlen schafft ein Maximum an Transparenz für den Entwicklungsprozess.

Ausgehend von der Struktur und dem Ablauf der zielorientierten Varianten-Findung baut die computerunterstützte Varianten-Findung (CoVaFind) auf deren Entwicklung auf. Durch die computerunterstützte Methode wird eine vereinfachte Handhabung der Entwicklungsschritte möglich. Daraus resultiert, dass das Auffinden von geeigneten Produktvarianten nochmals vereinfacht wird. Die Software setzt die Entwicklungsbereiche ZVF als Programmablauf um. Sie beginnt mit der Produktdefinition und beurteilt schwerpunktmäßig gleichermaßen die Simulationsergebnisse und die Technologie-Komplexität (Bild 6.3). Als Basis wird ein Datenbanksystem verwendet, das die benötigten Daten speichert, die Möglichkeit zur Pflege bietet und aus dem Vorschläge generierbar sind. Dazu ist die Datenbank in mehrere Bereiche strukturiert, siehe Bild 6.5. Ferner unterstützt ein Integrationsplan die Einbindung der ZVF in das Programm. CoVaFind wird durch mehrere Softwareoberflächen (Formulare aus Microsoft Access©) realisiert. Zwar ist es erforderlich zunächst viele Daten wie z.B. die Detailbeschreibungen der Module in die Datenbank einzugeben, aber mit

der automatischen Generierung von Tabellen und Matrizen sind alle Entwicklungsschritte für die Expertenrunde einfach abzuarbeiten.

Im Rahmen einer Fallstudie wird die Entwicklung der zielorientierten Varianten-Findung und damit auch der computerunterstützten Varianten-Findung validiert (siehe Kapitel 7). Zur Anwendung kommt die Entwicklung eines Wirbelstromsensors als Beispiel für ein mikrotechnisches Bauteil. Die Herausforderung dabei ist, trotz der Vielzahl von zu berücksichtigenden Elementen in der Entwicklung, die angepasste Vorgehensweise zu nutzen und eine übersichtliche Darstellung zu ermöglichen. Bei der Entwicklung werden die Experten mittels der Schaltflächen intuitiv durch die Produktentstehung geführt. Dabei haben sie einerseits einen detaillierten Überblick über die Zusammensetzung der Produktvarianten, andererseits können sie durch Pfeiltasten, die sich auf dem Rahmen der Formulare befinden, zusätzlich zwischen mehreren Produktentwicklungen wechseln. Dadurch wird ein schneller Zugriff auf die Daten anderer Produkte und deren Entwicklungsstand gewährleistet.

Anhand der computerunterstützten Vorgehensweise kann die zielorientierte Varianten-Findung zur Entwicklung eines mikrotechnischen Produktes angewendet werden. Die Daten in der Fallstudie zeigen, dass die mit der Methode erzielten Ergebnisse mit denen der realen Entwicklung am Institut für Mikrotechnologie der Universität Hannover übereinstimmen. Durch die Beurteilung und Verarbeitung der Simulationsergebnisse sowie der Technologie-Komplexität kann die Varianten-Findung zielorientiert, für die Entwicklung von komplexen Produkten aus der Mikrotechnologie, geleistet werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur zielorientierten Varianten-Findung bei der Entstehung mikrotechnischer Produkte. Dabei stehen die Besonderheiten dieser Produkte und die daraus abgeleitete Vorgehensweise sowie die computerunterstützte Umsetzung der Methode im Vordergrund.

Ausgehend von den bestehenden Ansätzen in der Produktentwicklung wird deutlich, dass insbesondere die Charakteristiken von mikrotechnischen Produkten nicht gezielt bei den Entwicklungsschritten beachtet werden. Aus diesem Grund passt sich die Methode einerseits an die Bedürfnisse von Produkten aus dem Bereich der Dünnschichttechnik an, andererseits ist sie auch für konventionelle Produkte anwendbar. Im ersten Teil der Arbeit wird die zielorientierte Varianten-Findung (ZVF) systematisch in Abhängigkeit der produkt- und prozessspezifischen Aspekte der Mikrotechnologie entwickelt. Dabei gliedert sich die Methode in eine für dünnfilmtechnische Bauteile angepasste Struktur und ermöglicht so eine Beurteilung der Produktvarianten, hinsichtlich nicht direkt messbarer Faktoren wie z.B. Schwierigkeitsgrad, Reifegrad und Komplexität der Prozessschritte. Für die Entwicklung des Produktes werden drei Entwicklungsbereiche geschaffen, jeweils einer zur Produktdefinition, zur Beurteilung der Simulationsergebnisse und zur Beurteilung der Technologie-Komplexität. Um die Entwicklung zu durchlaufen, ist eine Reihe von Tätigkeiten beginnend mit der Produktbeschreibung bis hin zur Entwurfsfreigabe notwendig.

Der erste Teil der Arbeit dient der Entwicklung des Prozesses zur zielorientierten Varianten-Findung. Die ZVF umfasst insgesamt 9 verschiedene Formblätter, mit denen die Beurteilung der Produktvarianten kennzahlengestützt durchgeführt wird. Von zentraler Bedeutung sind dabei gekoppelte Aspekte, die aus der Bewertung von design- und technologiegerechtem Entwurf entstehen. Durch die Verwendung einer Konfigurations-Matrix, die als Referenztafel dient, können die definierten Produktvarianten aufgelistet werden. Eine Modul-Tabelle liefert hierfür entsprechende Module in unterschiedlichen Ausführungen. Die folgenden Schritte zur Beurteilung der Simulationsergebnisse sowie der Technologie-Komplexität bilden die Schwerpunkte dieser Arbeit. Zur Charakterisierung der Produktvarianten werden die Simulationsergebnisse bewertet. Mittels der Berechnung von Kennzahlen ist es möglich, die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Spezifikationserfüllung zu vergleichen und in der Design-Matrix darzustellen. Ferner erlaubt die Beurteilung der Technologie-Komplexität eine detaillierte Untersuchung der zur Fertigung des Produktes benötigten Prozessschritte. Diese Ergebnisse und die Bewertung der Produktvarianten mittels Kennzahlen werden in der Technologie-Matrix gezeigt. Durch die Berechnung einer Gesamtkennzahl aus Design- und Technologie-Kennzahl kann letztlich eine optimale Produktvariante ausgewählt werden. Ein Optimum einer Variante ist genau dann gefunden, wenn die Kombination der Erfüllung von Design- und Technologieaspekten ein Optimum annimmt. Infolge der Gesamtleistung,

bestehend aus Methode und auswählendem bzw. bewertendem Entwicklungsteam, wird in kurzer Zeit ein geeigneter Produktentwurf erarbeitet.

Der zweite Teil der Arbeit bezieht sich auf die Umsetzung der zielorientierten Varianten-Findung in softwareunterstützter Form. Hierbei wird die Methode durch die computerunterstützte Varianten-Findung (CoVaFind) in der Anwendung ergänzt. Dazu sind die drei Hauptelemente, nämlich die Definition der Produktvarianten, die Beurteilung der Simulationsergebnisse sowie die Beurteilung der Technologie-Komplexität programmieretechnisch realisiert. Zunächst wird eine Datenbank mit Daten aus dem Bereich der Dünnfilmtechnik erstellt, die durch Datenpflege ständig aktuell gehalten werden kann. Hierdurch sind neue Erkenntnisse beispielsweise auf Grund von Simulationen oder neuen Fertigungsverfahren schnell nutzbar. Der gesamte Programmablauf spiegelt die Vorgehensweise der ZVF wieder. Die geeignete Programmstruktur in Kombination mit der Teamarbeit von Experten zeigt, dass die computerunterstützte Varianten-Findung ein Werkzeug für die mikrotechnische Produktentwicklung ist, um alle Varianten, die am Anfang entstehen, gezielt bewerten zu können.

Im Rahmen einer Fallstudie wird im dritten Teil der Arbeit die entwickelte Methode validiert und ein Wirbelstromsensor mit Prozessschritten aus der Dünnfilmtechnik entwickelt. Mit Hilfe der Vorschläge aus der Datenbank erfolgt die Definition von Produktvarianten zusammengesetzt aus Modulen. Zunächst wird die Generierung der Design-Tabellen und der Design-Matrix durchlaufen. Daran schließt sich die Entstehung und Bearbeitung von Technologie-Tabellen und der Technologie-Matrix an. Letztlich wird eine Produktvariante auf Grund der berechneten Kennzahlen ausgewählt. Bei der Durchführung der Fallstudie zur Entwicklung des Wirbelstromsensors hat sich herausgestellt, dass Produktvariante 5 die optimale Variante ist. Die praktischen Arbeiten, die am Institut für Mikrotechnologie der Universität Hannover im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Wirbelstromsensors durchgeführt wurden, bevor die ZVF verfügbar war, favorisierten ebenfalls diese Produktvariante. Der Sensor ist im Vorfeld zu dieser Arbeit am Institut für Mikrotechnologie der Universität Hannover entwickelt und gefertigt worden.

Die Ergebnisse aus der Entwicklung der ZVF, der Programmierung von CoVaFind sowie der Anwendung in der Fallstudie zeigen, dass es möglich ist, mit der Methode gezielt Produktvarianten auszuwählen. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methode zur zielorientierten Varianten-Findung liefert einen Beitrag als Vorgehensweise zur Definition und Bewertung von Produktvarianten – insbesondere in der Mikrotechnologie. Ziel der Forschung auf diesem Gebiet muss in Zukunft einerseits ein weiterer Ausbau der Aktivitäten nach der Entwurfsfreigabe sein, um auch hier auf die Besonderheiten der Mikrotechnologie einzugehen. Damit einher geht die Entwicklung eines terminlichen Ablaufes in Form eines Meilensteinplans. Andererseits ist die Datenbank weiter auszubauen, um mit der Methode noch bessere Ergebnisse zu erzielen. Dies kann geleistet werden, da die Datenbank mit jeder Entwicklung umfangreicher wird und damit mehr Entwicklungswissen genutzt werden kann.

10 Literaturverzeichnis

- [AIC96] Aichele, C. : Kennzahlenbasierte Geschäftsprozessanalyse. Gabler, Wiesbaden, 1997.
- [AKA90] Akao, Y.: Quality Function Deployment. Productivity Press Inc., 1990
- [AND05] Andreeva, E.: Fertigung und Erprobung eines dünnfilmtechnischen Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung. Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [BEN04] Ben Amor, A., Ruffert, C., Gatzen, H.H.: NiFe 45/55 and its Application in a Strain Gauge Sensor. Proc. 206th Meeting of The Electrochemical Society, 2004, Honolulu, Hawaii, USA, L2 1170
- [BER98] Berger, M. K.: Effiziente Konzeption von Produktinnovationen. Universität Potsdam, Dissertation, 1998
- [BIS02] Bischoff, K.: Herr der Prozessketten – Prozess-QFD zur Beherrschung komplexer Produktionsabläufe. In QZ 47(2002) 6, S. 387-389.
- [BMB99] Aus dem Programm "Mikrosystemtechnik 1994 – 1999" des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
- [BOT93] Botta, V.: Kennzahlensysteme als Führungsinstrumente : Planung, Steuerung und Kontrolle der Rentabilität im Unternehmen. Berlin, Schmidt, 1993
- [BRU99] Brunner, F.J., Wagner, K.W.: Taschenbuch Qualitätsmanagement: der praxisorientierte Leitfaden für Ingenieure und Techniker. Hanser, München, 1999
- [BUC97] Buchberger, P.: MIDAS – Ein wissensbasiertes System zur Unterstützung des fertigungsgerechten Entwurfs von LIGA-Mikrostrukturen. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1997
- [BUR02] Burghardt, M.: Projektmanagement: Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Entwicklungsprojekten. Publicis Corp. Publ., Erlangen, 2002
- [CAN87] Canty, E. J.: Simultaneous Engineering: Expanding scope of quality responsibility, Digital Equipment Corporation White Paper, 1987
- [CLA04] Clausing, Don: The development – of winning technologies. ASME, New York, 2004.
- [DAE99] Daenzer, F.W.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1999

- [DEP00] Depolt, J.: Kennzahlenbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Telekooperation in der Produktentwicklung der Automobilindustrie. Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [DET03] Detecon&Diebold Consultants: Nanotechnologie-Bedeutung für die Automobil-Zulieferindustrie. Eschborn, Januar 2003
- [DGQ99] DGQ 11-04: Begriffe zum Qualitätsmanagement. Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V., Beuth Verlag, 1999
- [DIN95] DIN EN ISO 8402: Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung: Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- [DOB02] Dobberkau, K.: Aufgabenorientierte Methoden Anpassung in der Produktentwicklung am Beispiel des Qualitätsmanagements. Univ., Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 2002
- [DRÖ00] Dröschel, W.: Das V-Modell 97 : der Standard für die Entwicklung von IT-Systemen mit Anleitung für den Praxiseinsatz. Oldenbourg, München, 2000
- [EVE95] Eversheim, W.: Simultaneous Engineering – Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Springer, Berlin, 1995
- [EVE99] Eversheim, W.: Produktentstehung. In: Produktion und Management Springer, Berlin, 1995
- [FIS00] Fischer, W.-J.: Mikrosystemtechnik. Vogel Verlag, Würzburg, 2000.
- [FRI03] Friedmann, T.: Collaborative Engineering – Gemeinsam zum Erfolg. http://de.country.csc.com/COUNTRIESDOCS/de/de/mcs/mcs143/uploads/917_1.pdf
- [GAB01] Gabler: Lexikon Controlling und Kostenrechnung. Gabler, Wiesbaden, 2001
- [GAT98] Gatzen, H. H.; Tönshoff, H. K.: Risk Management and Product Integrity – A Simple Approach to Concurrent Engineering. TMCE '98: 2nd International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering. Manchester, 1998
- [GAT02] H.H. Gatzen, E. Andreeva, H. Iswahjudi: Eddy Current Microsensor Based on Thin-film Technology, IEEE Trans. on Magn., Vol. 38 (2002), No. 5, pp. 3368-3370
- [GAU00] Gausemeier, J.: Kooperatives Produktengineering. Bonifatius, Paderborn, 2000.
- [GEN94] Gentner, A.: Entwurf eines Kennzahlensystems zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung von Entwicklungsprojekten. Verlag Vahlen, München 1994.

- [GER97] Gerlach, G.; Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. Hanser Verlag, München, 1997.
- [GIS99] Gissler, A.: Wissensmanagement – Steigerung der Entwicklungseffizienz durch eine modellbasierte Vorgehensweise zur Umsetzung von Wissensmanagement in der Produktentwicklung. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1999
- [GRO83] Grochla, E.: Erfolgsorientierte Materialwirtschaft durch Kennzahlen: Leitfaden zur Steuerung und Analyse der Materialwirtschaft. FBO, Baden-Baden, 1983
- [GRO88] Groll, K.-H.: Erfolgssicherung durch Kennzahlensysteme, Rudolf Haufe Verlag, 1988 (2.Auflage)
- [GRO91] Groth, U.: Kennzahlensystem zur Beurteilung und Analyse der Leistungsfähigkeit einer Fertigung – Einsatz von personellen, organisatorischen und technischen Kennzahlen, Dissertation Braunschweig, 1992
- [GRU00] Grundler, E.: Innovationspotential Mikrosystemtechnik. In VDI-Z 142, Nr.7/8, 2000.
- [HAU98] Hauer, C.: Kennzahlengestützte Qualitätsregelkreise zur Steigerung der Kundenzufriedenheit bei Serviceprozessen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [HER02] Herzwurm, G.: Was ist QFD? <http://www.qfd-id.de/wasistqfd/index.html>, Köln
- [HOF99] Hoffmann, J.: Entwicklung eines QFD-gestützten Verfahrens zur Produktplanung und -entwicklung für kleinere und mittlere Unternehmen. Springer Verlag, 1999
- [HUM02] Hummel, T., Malorny, C.: Total Quality Management – Tipps für die Einführung. <http://www.hanser.de/leseprobe/2002/3-446-21863-7.pdf>
- [HUN00] Hunklinger, R.: Abfalltechnische Kennzahlen zur umweltgerechten Produktentwicklung. Darmstadt, Bibliothek des Inst. WAR, 2000
- [ICE] ICE 2371: International Electrotechnical Commission
- [IMA92] Imai, M.: Kaizen – Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. Langen-Müller-Herbig, München, 1992
- [INS97] Institut für Unternehmenskypernetik e.V.: Einführung von TQM-Regelkreisen in KMU. Mülheim an der Ruhr, 1997
- [INT02] [<http://www.intellisense.com/products/products.asp>]
- [ISH85] Ishikawa, K.: What is Total Quality Control, the Japanese Way. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- [ISO94] ISO 8402: Quality management and quality assurance – Vocabulary. International Organization of Standardization, Schweiz, 1994
- [ISW05] Iswahjudi, H.: Simulation zur Entwicklung eines Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung. Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [KAI98] Kaindel, H.; Lutz, B.; Tippold, P.: Methode der Softwareentwicklung – Vorgehensmodell und State-of-the-Art der professionellen Praxis. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1998.
- [KAMI03] Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z: Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements. Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [KAM98] Kamphausen, J. E.: Prozeßmanagement in der Produktentwicklung. Dissertation RWTH Aachen, 1998.
- [KAS00] Kasper, M.: Mikrosystementwurf. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [KOM98] Komorek, C.: Integrierte Produktentwicklung: Der Entwicklungsprozess im mittelständischen Unternehmen der metallverarbeitenden Serienfertigung. Universität Duisburg, Dissertation, 1997
- [LIN01] Lindemann, U.: Methoden in der Produktentwicklung. In: Konstruktion.53, 1/2, 2001
- [LIN95] Lincke, W.: Simultaneous Engineering: Neue Wege zu überlegenen Produkten. Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [LUS99] Lusti, M.: Data Warehousing und Data Mining. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999
- [LYS01] Lyshevski, S. E.: Nano- and Microelectromechanical Systems – Fundamentals of Nano- and Microengineering. CRC Press, Florida, 2001
- [MAD02] Madou, M.: Fundamentals of microfabrication. The science of miniaturization CRC Press, Florida, 2002
- [MAS99] Masing, W. Handbuch Qualitätsmanagement. Hanser, München, 1999
- [MED97] Medhat, Sa`ad: Concurrent Engineering – the Agenda for Success. Research Studies Press Ltd., Taunton, 1997
- [MEH00] Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik. Technische Universität Chemnitz, Habilitation, 2000
- [MES00] Mescheder, U.: Mikrosystemtechnik: Konzepte und Anwendungen. Teubner, Stuttgart, 2000

- [MEY76] Meyer, C.: Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme. Poeschel Verlag, Stuttgart, 1976
- [MST04] <http://www.mstonline.de/mikrosystemtechnik/papers/gmm02.htm>
- [MÜL90] Müller, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften: Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer – Verlag, Berlin, 1990
- [NET04] <http://www.net-lexikon.de/>
- [NEW00] Kennz. R18: Weichensteller für Concurrent Engineering – Assoziativer Topologie Bus. I-News, 2000.
- [NEX01] NEXUS "Network of Excellence in Multifunctional Microsystems" (gefördert von Esprit), 2001
- [NEX02] NEXUS "Network of Excellence in Multifunctional Microsystems" (gefördert von Esprit), 2002
- [NÜH01] Nührich, K.P.: Unternehmensdiagnose. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg 2001
- [OEH96] Oehlmann, R.: Ein Informationssystem für das Concurrent Engineering komplexer Produkte. Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft. Verlag Mainz, Aachen, 1996
- [OES04] Oestereich, B.: Objektorientierte Softwareentwicklung: Analyse und Design mit der UML 2.0. Oldenbourg, München, 2004
- [PAR93] Parsaei, H. R.; Sullivan, W. G.: Concurrent Engineering. Chapman & Hall, University Press, Cambridge, 1993
- [PEL03] Pelka, J., Botthof, A.: Mikrosystemtechnik: Zukunftsszenarien. Springer, Berlin, 2003
- [PET01] Peters, D.: Unterstützung des Entwurfsprozesses von Mikrosystemen mit direktem Optimierungsverfahren. Universität Bremen, Dissertation, 2001.
- [PFE99] Pfeifer, T.; Lesmeister, F.; Reinecke, R.: Prozeßorientierte Optimierung präventiver QM-Methoden – Praxistauglichkeit durch Vereinfachung Qualität und Zuverlässigkeit 4/99, Carl Hanser Verlag, München, 1999
- [PRO99] PROnova: Innovative Prozesse und Bauweisen für Elektronik- und verwandte mikrotechnische Produkte – Abschlussbericht. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, 1999
- [PTC03]. PTC Parametric Technology GmbH, Heppelmann, J.: Pro/CONCEPT™ revolutioniert die Produktkonzeption, Internet: <http://www.ptc.com/germany/company/news/press/releases/20021113.htm>, Unterschleißheim

- [RAU97] Rauch, C.: Prozessorganisation auf der Basis vernetzter Regelkreise. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1997
- [RAU00] Raupach, H.-C.: Simulation von Produktentwicklungsprozessen. Dissertation Berlin, 2000
- [RED01] Redeker, G.: Grundlagen der Qualitätssicherung. Vorlesungsumdruck, Institut für Qualitätssicherung, Universität Hannover, 2001
- [REI90] Reichmann, T. : Controlling mit Kennzahlen. Vahlen, München, 1990
- [SCH94] Schäfer, W. u. a.: Perspektiven der Fertigungsgeräte-Industrie in der industriellen Produktion von Mikrosystemen. Proc. Micro-Engineering 94, Stuttgart, 1994
- [SCH98] Schmalzl, B.: Managementkonzept im Wettstreit. C.H. Beck Verlag, München, 1998.
- [SEN01] Senturia, S. Microsystem Design. Kluwer Academic Publ., Boston, Mass. , 2001
- [SOH01] Sohrmann, R.: Kennzahlen-System zur integrierten Prozessbewertung unter Einbeziehung von Qualität, Umweltschutz und Arbeitssicherheit. Aachen, Shaker, 2001
- [SPA01] Spath, D.; Scharer, M.: Mit dem Methodenbaukasten Produkte treffsicher und schnell entwickeln. In: Spath, D. et al: Vom Markt zum Produkt. LOG_X Verlag, Stuttgart, 2001
- [SPA00] Spath, D.; Scharer, M.; Trender, L.: Bewertungsmethoden zur Unterstützung einer lebenszyklusgerechten Konstruktion. In: Industrie Management 16, S.9-13, 2000
- [SPA98] Spath, D.; Matt, D.; Geisinger, D.: Marktorientierte Neuproduktentwicklung. In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung. 3, 5, S.200-202, 1998
- [SPR02] Sprenger, S.: Kunden- und umweltorientierte Bewertung in der Produktentwicklung. Dissertation Hannover, 2002
- [STE04] Steg, H.: Internationale Marktentwicklung in der MST. VDI/VDE-IT, Teltow, 2004
- [VDE91] Fachausschuss der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik: Mikrosystemtechnik, Frankfurt, 1991
- [VDI93] VDI-Richtlinie 2221: Methode zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag, 1993.
- [VDI00] VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Grundlagen. VDI-Verlag, Blatt 1, Ausgabe 2000-03.

- [VOL98] Vollmuth, H. J.: Kennzahlen. – Verlag, Planegg, 1998.
- [WAH02] Wahrig: Fremdwörterlexikon. Bertelsmann Lexikon Verlag, 2002
- [WEB02] Weber, R.: http://www.biba.uni-bremen.de/users/web/download/Weber_1999_Concurrent_Engineering.pdf
- [WIN88] Winner, R. I.; J. P.; Bertrand, H. E.; Slusarczuk, M. M. G.: THE Role of Concurrent Engineering in Weapons Systems Acquisition. IDA-Report R-33/, Institutue for Defense Analyses, 1988
- [ZEI00] Zeihsel, F.: Systematische Produktentwicklung durch integrierte Dokumentation. Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2000
- [ZIS00] Zischka, S.: Zielgerichtete Qualitätsplanung in der Produktentwicklung: projektspezifisches Quality-Deployment. Shaker, Aachen, 2000
- [ZVE76] Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie e.V.: ZVEI-Kennzahlensystem, Ein Instrument zur Unternehmenssteuerung, 3.Auflage, Frankfurt/ M. 1976