

Thomas Schierbaum

Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID)

Systematic for early cost estimation of mechatronic systems in the technology Molded Interconnect Devices (MID)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Band 368 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2017

ISSN (Print): 2195-5239

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-942647-87-8

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

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

Satz und Gestaltung: Thomas Schierbaum

Herstellung über: readbox unipress in der readbox publishing GmbH
Münster

Printed in Germany

Laura & Emma

Geleitwort

Das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn ist ein interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik. Unser generelles Ziel ist die Steigerung der Innovationskraft von Industrieunternehmen im Informationszeitalter. Ein Schwerpunkt meiner Forschung liegt auf dem interdisziplinären Entwurf von Intelligenen Technischen Systemen.

Viele Unternehmen des Maschinenbaus und verwandter Brachen erfahren mit ihren Produkten eine immer stärker werdende Innovationsdynamik. Speziell im Bereich der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik kommt es auf eine hohe Funktionsdichte auf kleinem Bauraum und der daraus resultierenden Miniaturisierung an. Dies erfordert häufig neue Technologien und Fertigungsverfahren. Eine Technologie, die den Herausforderungen begegnet, ist die Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Trotz ihres offensichtlichen Potentials konnte sich die Technologie jedoch noch nicht nachhaltig durchsetzen. Häufig ist eine falsche Kosteneinschätzung dafür die Ursache.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Schierbaum eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID) entwickelt. Sie gliedert sich in ein fachdisziplinübergreifendes Vorgehen zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID ein.

Den Kern der Systematik bildet ein Kostenmodell, welches den Aspekt der Kostenbewertung bereits in der Konzipierung für das zu entwickelnde System ermöglicht. Zur Unterstützung bei der Kostenbewertung werden verschiedene Hilfsmittel wie Prozesskarten, Kostenstrukturen bereitgestellt. Erweiternde Konstrukte für die Modellierungstechnik CONSENS ermöglichen die Entwicklung einer plausiblen Kostenstruktur für das zu entwickelnde System in den frühen Entwicklungsphasen.

Zur Analyse und Bewertung der Kosten stellt die Systematik Methoden in einem Vorgehensmodell bereit. Insbesondere das Vorgehen zur frühzeitigen Analyse der Zielkosten und der zu kalkulierenden Kosten ermöglicht die Analyse und Bewertung der Kosten mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Die Systematik wurde an einem Demonstrator aus dem Sonderforschungsbereich 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ sowie anhand einer industriellen Anwendung aus dem Automobilsektor validiert.

Mit seiner Arbeit liefert Herr Schierbaum einen signifikanten Beitrag zur Weiterentwicklung der Entwicklungsmethodik für Intelligente Technische Systeme.

Paderborn, im Januar 2017 Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier

**Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf
mechatronischer Systeme in der Technologie
Molded Interconnect Devices (MID)**

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Schierbaum
aus Detmold

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die stets fordernde fachliche als auch persönliche Aus- und Weiterbildung in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Ich danke ihm besonders für das große Vertrauen in meine Arbeit und dass er mir ein selbständiges und kreatives Forschen ermöglichte. Seine konstruktive Kritik hat meine Arbeit wesentlich geprägt.

Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke vom Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Allen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Besonders bedanken möchte ich mich bei Professor Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Dr.-Ing. Harald Anacker, Dr.-Ing. Frank Bauer, Dipl.-Wirt.-Ing Anja Czaja, Dipl.-Ing. Christian Fechtelpeter, Dr.-Ing. Peter Iwanek, Dipl.-Ing. Christoph Jürgenhake, Dr.-Ing. Arno Kühn und M.Sc. Thorsten Westermann. Darüber hinaus danke ich allen Studierenden, die mich bei meiner Arbeit durch ihre Abschlussarbeiten oder durch ihre studentische Hilfsstätigkeit unterstützt haben.

Meinen Eltern danke ich für ihre konsequente Unterstützung meiner Ausbildung. Meinem Bruder Christian danke ich für das stets offene Ohr.

Mein größtes Dankeschön gilt jedoch Anja! Für das entgegengesetzte Verständnis. Für die motivierenden Worte. Dafür, dass du immer da bist, wenn ich dich brauche...

Paderborn, im Januar 2017

Thomas Schierbaum

Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [SGD14] SCHIERBAUM, T.; GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.: Method for the Identification and Comparison of Alternative Process Chains Focusing in Economics Efficiency Analysis During the Conceptual Design of Mechatronic Integrated Devices. In: Proceedings of 11th International Congress MID 2014, 24.-26. September, Nürnberg, Deutschland, 2014
- [SG15] SCHIERBAUM, T.; GAUSEMEIER, J.: Systematik zur Kostenbewertung von mechatronischen Systemen in der Technologie Molded Interconnect Devices. 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015

Zusammenfassung

Hohe Funktionsdichte auf kleinem Bauraum und damit einhergehende Miniaturisierung sind Erfolgsfaktoren für eine Vielzahl von mechatronischen Produkten. Ein Innovationstreiber in diesem Bereich ist die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Sie ermöglicht es, Elektronik direkt in mechanische Bauteile zu integrieren. Planare Schaltungsträger lassen sich so durch räumliche ersetzen. Das spart Raum, Teile und Kosten. Speziell die korrekte Kostenbewertung ist oftmals eine schwierige Hürde bei innovativen MID-Projekten. Bereits in der MID-Studie 2011 „Markt- und Technologieanalyse“ wurde die Bewertung als einer von vier wesentlichen Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte ausgemacht [FGG+11]. Dies wird durch Aussagen aus der Praxis untermauert. Daher wurde eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID erarbeitet.

Die Systematik gliedert sich in vier Bestandteile: ein Vorgehensmodell, welches die Tätigkeiten zur Kostenbewertung strukturiert und deren Ergebnisse sowie Hilfsmittel einordnet. Ein detailliertes Kostenmodell, welches alle relevanten Aspekte zur Kostenbewertung darstellt. Zudem stellt es Entwicklungswissen zur Verfügung. Eine Sprache zur Beschreibung der relevanten Produkt- und Produktionsprozessaspekte sowie ein Konzept zur rechnergestützten Anwendung der Systematik.

Die Systematik wird anhand von zwei Validierungsbeispielen angewandt: einen am Heinz Nixdorf Institut entwickelten Miniaturroboter BeBot, dessen Gehäuse eines der komplexesten MID-Teile darstellt sowie einer Beleuchtungseinheit für den Innenraum eines Automobils.

Summary

High density of functions at small space which goes along with miniaturization are success factors for a multiplicity of mechatronic products. One innovative technology in this field is MID (Molded Interconnect Devices). The technology enables integration of electronic parts into mechanical parts. Printed Circuit Boards can be substituted. This leads to a reduction of needed space, parts and costs. Especially cost estimation is often a difficult hurdle when it comes to highly innovative MID-Projects. Right cost estimation was identified as a main key factor in the MID-Studies 2011 [FGG+11]. This statement is underlined in practice. Therefore a systematic for early cost estimation of mechatronic systems in the technology MID was developed.

It consists of four elements: a detailed process model, which structures tasks, results and tools. A comprehensive cost model, which includes all relevant aspects for cost estimation. A modelling language to describe relevant aspects of the product and production system as well as a concept for the computer aided application.

The systematic is validated by two application examples: miniature robot BeBot, which was developed at the Heinz Nixdorf Institute and an interior lighting for vehicles.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	5
1.1 Problematik	5
1.2 Zielsetzung.....	7
1.3 Vorgehensweise	8
2 Problemanalyse.....	9
2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung	9
2.1.1 Systematik	9
2.1.2 Kosten.....	10
2.1.3 Absolute Vorteilhaftigkeit.....	11
2.1.4 Lösungskonzept.....	12
2.2 Mechatronische Systeme.....	12
2.2.1 Grundstruktur elektronisch-mechanischer Baugruppen	14
2.2.2 Differential- und Integralbauweise.....	15
2.3 Technologie MID	17
2.3.1 Beschreibung der Technologie MID.....	17
2.3.2 Schlüsselfaktoren erfolgreicher MID-Projekte	20
2.3.3 MID-Herstellverfahren	22
2.3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik.....	25
2.4 Entwicklung mechatronischer Systeme.....	30
2.4.1 Produktentstehungsprozess.....	30
2.4.2 V-Modell der VDI-Richtlinie 2206	32
2.4.3 Systematik nach KAISER.....	34
2.5 Kosten.....	36
2.5.1 Kategorien von Kosten.....	37
2.5.2 Kostenrechnung	39
2.6 Handlungsfelder.....	40
2.7 Problemabgrenzung.....	41
2.8 Anforderungen an die Systematik	43
3 Stand der Technik	45
3.1 Methoden zur Produktbewertung	45
3.1.1 Paarweiser Vergleich	45
3.1.2 Nutzwertanalyse	46

3.1.3	Analytic Hierarchy Process	48
3.1.4	Wertanalyse nach VDI-Richtlinie 2800 (Value Management) ..	49
3.2	Methoden zur Kostenbewertung	51
3.2.1	Vereinfachte Kostenermittlung nach VDI-Richtlinie 2225.....	52
3.2.2	Target Costing	53
3.2.3	Kostenvergleichsrechnung (Cost Comparison Method).....	55
3.2.4	Kosten-Nutzen-Analyse (Cost-Benefit Analysis).....	56
3.2.5	Bewertung der Herstellkosten nach VireS.....	57
3.2.6	Funktionskostenmatrix	58
3.2.7	Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung nach NißL	59
3.2.8	Transdisziplinäres Zielkostenmanagement nach ZIRKLER	61
3.3	MID-Hilfsmittel.....	62
3.3.1	Methodik zur Produktoptimierung nach PEITZ	62
3.3.2	Erweiterter MID-Konstruktionskatalog.....	64
3.3.3	Eigenschaftskarten der MID-Verfahren	66
3.3.4	Prozessübergangskosten nach FRANKE.....	68
3.4	Spezifikationstechniken	69
3.4.1	CONSENS	70
3.4.2	SysML	73
3.4.3	METUS	74
3.5	Handlungsbedarf.....	75
4	Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf	79
4.1	Bestandteile der Systematik.....	79
4.2	Vorgehensmodell	80
4.2.1	Aufbau des Vorgehensmodells	80
4.2.1.1	Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren	83
4.2.1.2	Phase 2: Zielkosten ermitteln.....	87
4.2.1.3	Phase 3: Kostenkalkulation durchführen.....	87
4.2.2	Einordnung in den Entwicklungsprozess.....	91
4.3	Kostenmodell	92
4.3.1	Zielkosten.....	92
4.3.2	Kostenkalkulationsmodell.....	95
4.3.2.1	Wertschöpfungskonzept.....	96
4.3.2.2	Kostenermittlung	98
4.3.2.3	Informationsfluss des Kostenkalkulationsmodells ..	104
4.4	Modellierungssprache	105
4.5	Konzept für die Werkzeugunterstützung	107
5	Anwendung der Systematik zur Kostenbewertung	111
5.1	Anwendungsbeispiel Miniaturroboter BeBot	111

5.1.1	Produkt und Produktionssystem konzipieren	112
5.1.2	Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren	115
5.1.3	Phase 2: Zielkosten ermitteln.....	119
5.1.4	Phase 3: Kostenkalkulation durchführen.....	121
5.2	Anwendungsbeispiel Innenraumbeleuchtungsmodul	127
5.2.1	Produkt und Produktionssystem konzipieren	127
5.2.2	Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren	129
5.2.3	Phase 2: Zielkosten ermitteln.....	131
5.2.4	Phase 3: Kostenkalkulation durchführen.....	132
5.3	Bewerten der Arbeit gemäß der Anforderungen	137
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
7	Abkürzungsverzeichnis.....	143
8	Formelverzeichnis	147
9	Literaturverzeichnis	149

Anhang

A1	Kompetenzkarten	A-1
A2	Prozesskarten.....	A-3

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes MID-Plan¹. Ziel des Projektes ist ein Entwicklungsplaner für Produkte in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Die vorliegende Arbeit ordnet sich in den Bereich der Entwurfsmethodik ein und beschreibt eine *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID*. Das Anwendungsbeispiel *Miniaturnarrobooter BeBot* entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ (SFB 614) der Universität Paderborn. Bei dem zweiten Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein Beleuchtungsmodul für den KFZ-Innenraum.

1.1 Problematik

Sich immer schneller ändernde Märkte stellen eine Herausforderung für produzierende Unternehmen dar. Nahezu alle Einflussfaktoren (z.B. Kunden, Technologien, Gesetze), die auf die Unternehmen wirken, verändern sich dynamisch [WZ09, S. 9]. Diese Situation ist grundsätzlich nicht neu. So führte beispielsweise die Industrialisierung zu Beginn des letzten Jahrhunderts zur Einführung der Arbeitsteilung und der Trennung von planenden und ausführenden Tätigkeiten [Ehr09, S. 182]. Heute führt die zunehmende Individualisierung von Produkten zu einer wachsenden Variantenvielfalt und kürzeren Produktlebenszyklen. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Produkte und der Produktentstehungsprozesse. Dies bedeutet für den Maschinenbau und verwandte Branchen, wie der Automobilindustrie, einen verstärkten Wettbewerb und gleichzeitig einen stetig wachsenden Zeit- und Innovationsdruck [GLR+00].

Viel versprechende Möglichkeiten für Produktinnovationen bieten mechatronische Systeme. Ursprünglich ist Mechatronik ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik, das die Erweiterung mechanischer Systeme um elektronische Funktionen widerspiegelt. Heute beruhen mechatronische Systeme auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Softwaretechnik und ggf. neuen Werkstoffen. Derartige Systeme ermöglichen Funktions- und Verhaltensverbesserungen und eine Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten [GRS+11, S. 8]. Das Innovationspotential liegt einerseits in der funktionalen Integration von mechanischen und elektrischen/elektronischen Komponenten (z.B. Steuerung der Sitzverstellung im Automobil) und andererseits in der räumlichen Integration von mechanischen und elektrischen/elektronischen Komponenten zu einer baulichen Einheit (z.B. Heckleuchte eines Automobils) begründet [VDI2206, S. 20]. Ein

¹ Entwicklungsplaner zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Entwicklung von MID-Produkten (MID-Plan), über die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

wesentliches Potential solcher Systeme liegt in der hohen Funktionsdichte auf gleichzeitig kleinem Bauraum und der daraus resultierenden Miniaturisierung. Weitere Potentiale der Integration liegen in der Gewichtsreduzierung und erhöhten Zuverlässigkeit [GF06, S. 4]. Speziell im Bereich der räumlichen Integration sehen sich die Entwickler heute steigenden Anforderungen in Bezug auf die Miniaturisierung und der damit einhergehenden optimalen Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums sowie der steigenden Funktionsintegration konfrontiert und verlangen nach neuen Lösungen. Produkte aus den Bereichen Smart Devices (Tablets, Smartphones, etc.), Automotiv, Medizintechnik und artverwandter Branchen verdeutlichen diese Entwicklung.

Eine dieser Technologien zur Förderung der beschriebenen Entwicklung ist MID (Molded Interconnect Devices). Die Technologie MID ermöglicht die Integration von mechanischen, elektronischen aber auch optischen, fluidischen und thermischen Funktionen in einer Baugruppe. Molded Interconnect Devices werden im Deutschen als spritzgegossene Schaltungsträger übersetzt [Fra13, S. 1]. Dabei werden i.d.R. spritzgegossene Kunststoffteile, bestehend aus einem speziellen dotierten Kunststoff, metallisiert und mit elektronischen Bauteilen bestückt. Neben den oben genannten Potentialen der Technologie MID ergeben sich weitere. Die wesentlichen sind [FGG+11, S. 40f.], [Fra13, S. 4]:

- hohe Gestaltungsfreiheit
- Funktionsintegration
- verkürzte Prozesskette
- Teilereduktion
- Integration von thermischen, fluidischen und optischen Funktionen
- geringere Herstellkosten

Diese Potentiale lassen sich durch zahlreiche Serienanwendungen in der Technologie MID z.B. im Automobilsektor belegen wie z.B. ein Adaptive Cruise Control (ACC) Sensor, welcher bei der Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit eingesetzt wird. Mit einem ACC-System kann ein Automobil selbstständig die Geschwindigkeit anpassen, sodass es nicht auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auffährt bzw. den Sicherheitsabstand unterschreitet [Fra13, S. 298f.]. Ein weiteres Beispiel findet sich im Bereich der Beleuchtung. Mit Hilfe der Technologie MID konnte eine schlanke und elegante OLED-Lichtquelle realisiert werden [Fra13, S. 295].

Trotz ihres offensichtlichen Potentials konnte sich die Technologie MID bisher nicht nachhaltig durchsetzen. Die Gründe dafür resultieren aus zahlreichen Barrieren, die oftmals zu einer Ablehnung der Technologie führen. Insbesondere werden MID häufig als Ursache einer Kostenerhöhung identifiziert. In der 2011 verfassten MID Studie „Markt- und Technologieanalyse“ des 3-D MID e.V. wird die korrekte Kostenabschätzung als ein wichtiger Schlüsselfaktor für erfolgreiche MID-Projekte genannt [FGG+11, S. 80]. Die wesentlichen Gründe für eine unkorrekte Kostenabschätzung liegen in der nicht exakten

Definition des Betrachtungsgegenstandes. Häufig werden lediglich das MID-Baugruppe und die dazugehörigen Fertigungsprozesse isoliert betrachtet. Dies ist in der Regel auf die Unerfahrenheit mit der Technologie zurückzuführen. Des Weiteren werden dadurch die Potentiale der Technologie MID häufig nicht voll ausgeschöpft.

Diese Problematik führt zu der Notwendigkeit, die Kostenbewertung von MID-Baugruppen methodisch zu unterstützen. Hierfür müssen drei Handlungsfelder adressiert werden: 1) Die frühzeitige disziplinübergreifende Konzipierung, welche die prinzipielle Wirkungsweise des zu entwickelnden Produkts und das dazugehörige Produktionssystem beschreibt. Denn bereits in dieser Phase wird eine Vielzahl an Entscheidungen getroffen, welche die Kosten für das Produkt weiterreichend determinieren. 2) Die Kostenbewertung selbst, welche zur Abschätzung entstehender Herstellkosten durchzuführen ist. 3) Die Technologie MID mit ihren Charakteristika, wie z.B. die starken wechselseitigen Abhängigkeiten von Produkt und Produktionssystem, welche bei der Technologie MID sehr stark ausgeprägt sind.

Speziell bei MID herrschen starke Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem, da die Produktgestalt stärker als bei anderen Technologien vom Produktionsverfahren determiniert wird. Hier fehlt nicht nur ein systematisches Vorgehen zur Kostenbewertung, sondern auch eine Technik zur Beschreibung und Definition der relevanten Aspekte (z.B. zu betrachtende Bauteile und Fertigungsprozesse der Baugruppe). Weiterhin fehlt es an einer Entscheidungsunterstützung sowie einem Kostenmodell zur Bewertung der Lösungsalternative. Zusammenfassend fehlt es an einer *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID*.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Sie unterstützt bei der Bewertung der Vorteilhaftigkeit hinsichtlich der Herstellkosten, im Sinne der ökonomischen Perspektive, d.h. es sollten nur Produkte realisiert werden, die einen positiven Beitrag zu den monetären Unternehmenszielen leisten können.

Die Systematik soll, basierend auf den Systemanforderungen, eine Grundlage für die Kostenbewertung schaffen sowie Hilfsmittel und Wissen zur Verfügung stellen, um diese durchführen zu können. Den Kern bildet ein Kostenmodell, welches den Anwender mit Hilfsmitteln bei der Erfassung der Ziel- sowie kalkulierten Kosten (vgl. Kap. 2.1.2) unterstützt. Ferner wird ein strukturiertes und in den Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme integriertes Vorgehen für die Kostenbewertung zur Verfügung gestellt. Als Resultat liegt eine Handlungsempfehlung, basierend auf der Kennzahl zur absoluten Vorteilhaftigkeit im Hinblick auf die Herstellkosten, vor. Die Kennzahl setzt sich aus dem Verhältnis von Zielkosten und kalkulierten Kosten zusammen.

Die durchgängige Anwendbarkeit der Systematik soll anhand von zwei Anwendungsbeispielen nachgewiesen werden. Bei dem ersten Anwendungsbeispiel handelt es sich um den Miniaturroboter BeBot, der im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 614 „Selbst-optimierende Systeme des Maschinenbaus“ am Heinz Nixdorf Institut entwickelt worden ist [GRS14 S. 50ff.]. Beim zweiten Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein Innenraumbeleuchtungsmodul aus dem automobilen Sektor.

1.3 Vorgehensweise

In **Kapitel 2** wird die eingangs beschriebene Problematik ausführlich betrachtet. Dazu werden zunächst die für diese Arbeit wesentlichen Begriffe erläutert und definiert. Anschließend werden mechatronische Systeme näher beschrieben und charakterisiert. Baugruppen in der Technologie MID werden dabei in die Klassen mechatronischer Systeme eingeordnet. Im Anschluss wird die Technologie MID tiefgehend vorgestellt. Neben den Herstellverfahren werden wesentliche Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte erläutert. Zudem wird auf die Entwicklung mechatronischer Systeme eingegangen. Die Entwicklung von MID-Baugruppen steht dabei im Fokus. Weiter werden unterschiedliche Kategorien von Kosten vorgestellt. Das Kapitel schließt mit der Problemabgrenzung und den Anforderungen an die geforderte Systematik.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Technik. Hierfür werden zunächst allgemeine Bewertungsverfahren für technische Systeme betrachtet. Anschließend werden Methoden zur Kostenbewertung untersucht. Die Analyse des Standes der Technik wird mit der Betrachtung von MID-spezifischen Methoden fortgesetzt. Anschließend werden Spezifikationstechniken zur Beschreibung mechatronischer Systeme analysiert. Abschließend werden die betrachteten Ansätze im Stand der Technik anhand der ermittelten Anforderungen aus Kapitel 2 bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

Den Kern der Arbeit bildet **Kapitel 4**. Hier wird die Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID beschrieben. Zu Beginn wird ein Überblick über die Bestandteile der Systematik gegeben, die in den darauf folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

Die Anwendung der Systematik erfolgt in **Kapitel 5**. Anhand eines Demonstrators wird die Systematik durchgängig angewandt. Abschließend wird die Systematik anhand der in Kapitel 2 erarbeiteten Anforderungen bewertet.

Die Arbeit schließt mit **Kapitel 6**. Es besteht aus einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiterführende Arbeiten. Der **Anhang** enthält ergänzende Informationen zu den Bestandteilen der Systematik.

2 Problemanalyse

Ziel der Problemanalyse sind Anforderungen an eine Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Das Kapitel ist daher wie folgt gegliedert: In Kapitel 2.1 werden Begriffe definiert, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Anschließend wird in Kapitel 2.2 auf mechatronische Systeme eingegangen. Darauf aufbauend wird in Kapitel 2.3 die Technologie MID näher erläutert. Darin werden insbesondere Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte und MID-Herstellverfahren vorgestellt. In Kapitel 2.4 wird der Produktentstehungsprozess beschrieben, um darauf aufbauend die Entwicklung mechatronischer Systeme anhand des V-Modells zu erläutern. Im darauf folgenden Kapitel 2.5 werden Kosten näher betrachtet. In Kapitel 2.6 werden Handlungsfelder aufgezeigt. Anschließend wird in Kapitel 2.7 die Problemabgrenzung vorgenommen. Abschließend werden darauf aufbauend in Kapitel 2.8 die Anforderungen an die Systematik abgeleitet.

2.1 Begriffsdefinitionen und Einordnung

Im Folgenden werden die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Begriffe kurz erläutert und im Kontext dieser Arbeit definiert.

2.1.1 Systematik

Laut Duden ist eine Systematik definiert als die:

*„planmäßige, einheitliche Darstellung, Gestaltung nach bestimmten
Ordnungsprinzipien“ [Dud14a-ol]*

Im Rahmen der Produktentwicklung wurde der Begriff erstmals von BISCHOF und HANSEN in den 1950er Jahren verwendet. Die Konstruktionssystematik wird von ihnen als

*„das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkennt-
nisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes“
[Han55, S. 36], [Hub76, S. 74]*

definiert. Auf dieser Basis lautet die Definition nach DUMITRESCU wie folgt:

*„Eine Entwicklungssystematik [ist] ein universelles Rahmenwerk, das
ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen
Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie er-
möglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz
für die kreative Leistung des Anwenders. Das Vorgehensmodell struk-
turiert den Entwicklungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichts-“*

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

Der Begriff Entwicklungssystematik grenzt sich von der Entwicklungsmethodik in zwei Punkten ab: (1) In die Entwicklungsmethodik fließen denk- und arbeitspsychologische Untersuchungen ein und (2) betrachtet zusätzlich organisatorische Aspekte [PBF+07, S. 10f.]. Beide Punkte fehlen in einer Entwicklungssystematik [Dum11, S. 6].

In der vorliegenden Arbeit wird **Systematik** wie folgt definiert: Eine Systematik ist ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung des ihr angedachten Zwecks bereitstellt. Das Vorgehensmodell strukturiert den Prozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Modellierungssprachen oder Werkzeuge sein.

Die zu entwickelnde Systematik umfasst somit ein Vorgehensmodell und dedizierte Hilfsmittel zur Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Es handelt sich um bestehende Hilfsmittel, Erweiterungen bereits bestehender Hilfsmittel und neu entwickelte Hilfsmittel. Sie werden in das Vorgehensmodell integriert.

2.1.2 Kosten

Der Begriff Kostenbewertung lässt sich in zwei Teilbegriffe zerlegen, welche im Folgenden definiert werden. Basierend auf den Definitionen der Teilbegriffe wird anschließend eine für die vorliegende Arbeit gültige Definition für die Kostenbewertung formuliert. **Kosten** werden stets als monetäre Größe aufgefasst [Koc66, S. 9] und werden vom Deutschen Institut für Normung wie folgt definiert:

„Kosten sind der in Geld bewertete Verzehr von Produktionsfaktoren und Fremdleistungen sowie öffentlichen Abgaben zum Erstellen und zum Absetzen von Gütern und/oder Diensten. Produktionsfaktoren sind Betriebsmittel, Material, menschliche Arbeit usw.“ [DIN32990-1]

Der Duden definiert **Kosten** als:

[...] alles, was für eine Sache aufgewendet wird oder worden ist, sowohl das Entgelt für die gekauften oder zu kaufenden Gegenstände als auch das Entgelt für die geleistete oder zu leistende Arbeit. [Dud14b-ol]

Zudem werden Kosten in Soll-Kosten auch Plan-, Ziel- oder Budgetkosten sowie IST-Kosten differenziert. Unter Soll-Kosten werden die aufgrund einer Vorausplanung erforderlichen Kosten zur Leistungserstellung verstanden. IST-Kosten werden als die tatsächlich angefallenen Kosten z.B. in einer Abrechnungsperiode oder für ein Produkt definiert [EKL05, S. 409].

IST-Kosten lassen sich somit erst nach der tatsächlichen Erstellung des Produktes erheben und bilden eine retrospektive Sicht. Da im Rahmen dieser Arbeit eine frühzeitige Kostenbewertung vorgenommen wird, werden diese Kosten als **kalkulierte Kosten** verstanden. Unter **kalkulieren** ist im Duden folgende Definition zu finden:

„Voraussichtlich entstehende Kosten im Voraus berechnen“ bzw.
„(eine Situation) in einer bestimmten Weise einschätzen“ [Dud16-ol]

Kalkulierte Kosten werden im Rahmen dieser Arbeit als voraussichtlich entstehende Kosten (zum Zeitpunkt der Bewertung) zur Herstellung des Produktes, der Baugruppe oder des Bauteils verstanden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die **Zielkosten** wie folgt definiert: Zielkosten beschreiben den Kostenrahmen bzw. die Kostenobergrenze für die Herstellkosten bezogen auf ein Produkt, eine Baugruppe oder ein Bauteil.

Das Deutsche Institut für Normung definiert **Bewertung** als:

„Tätigkeit zur Ermittlung der Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit der Betrachtungseinheit festgelegte Ziele zu erreichen“ [DIN9000]

Basierend auf diesen Definitionen wird die **Kostenbewertung** im Rahmen dieser Arbeit wie folgt verstanden: Sie beschreibt die Tätigkeit des Bewertens eines Lösungskonzepts vor dem Hintergrund voraussichtlich entstehender sowie erlaubter Kosten.

2.1.3 Absolute Vorteilhaftigkeit

Unter Vorteilhaftigkeit wird allgemein verstanden, dass eine Variante in Bezug auf ein oder mehrere Kriterien einen größeren Nutzen stiftet als eine andere Variante. In der Betriebswirtschaftslehre werden dazu häufig Kennzahlen wie der Kapitalwert gebildet. Bei diesen Ansätzen werden zwei oder mehr Alternativen miteinander verglichen. Hierbei spricht man von der relativen Vorteilhaftigkeit einer Variante, denn: Es wird in der Regel nicht geprüft, ob die Variante ein vorgegebenes Kriterium überhaupt erfüllt. Ein Beispiel: Der Kapitalwert einer Investition ist größer als der einer anderen, sie ist somit relativ vorteilhaft. Es ist jedoch nicht sichergestellt, dass mit der Investition ein ausreichender Geldrückfluss erwirtschaftet wird [Mül06, S. 215ff.].

Die absolute Vorteilhaftigkeit hingegen überprüft, ob ein gegebenes Ziel von einer Variante auch tatsächlich erreicht wird. Im Rahmen der Kostenbewertung findet ein Vergleich von Zielkosten und kalkulierten Kosten statt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Vergleich zur Bewertung der absoluten Vorteilhaftigkeit im Hinblick auf die Herstellkosten herangezogen. Mathematisch drückt sich diese Kennzahl wie folgt aus:

$$\text{Absolute Vorteilhaftigkeit} = \frac{\text{Zielkosten}}{\text{Kalkulierte Kosten}}$$

Das heißt, eine Variante ist absolut vorteilhaft, wenn ihre kalkulierten Kosten kleiner sind als ihre Zielkosten. Der Quotient muss also zwingend größer eins sein.

2.1.4 Lösungskonzept

Laut Duden ist ein Lösungskonzept ein

„klar umrissener Plan zur Lösung besonders eines schwerwiegenden politischen oder wirtschaftlichen Problems“ [Dud14c-ol]

Im Kontext dieser Arbeit beschreibt ein **Lösungskonzept** eine technische Realisierung eines vorgegebenen technischen Problems, welches gleichzusetzen mit einer Produktentwicklung ist. Das Lösungskonzept enthält alle benötigen Aspekte des Produktes sowie der notwendigen Prozesse und Ressourcen, die zur Realisierung des Produktes benötigt werden. Ein Lösungskonzept enthält demnach Informationen über das Produkt sowie des dazugehörigen Produktionssystems. Dazu gehören bspw. Anforderungen, Funktionen, Subsysteme oder Bauelemente genauso wie die Fertigungsabfolge und verwendete Ressourcen (z.B. Maschinen, Werker).

2.2 Mechatronische Systeme

Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik, welches 1969 von den Japanern MORI und KIKUCHI geprägt worden ist [Mor69]. Gemeint ist die Erweiterung mechanischer Systeme um elektrische/elektronische Funktionen. Kern der heutigen Vielzahl an Definitionen lieferten HARASHIMA ET AL. Sie beschrieben Mechatronik erstmalig als synergetisches Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik inkl. der Entwicklung und Produktion [HTF96, S. 1ff.]. Die VDI Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ liefert nachfolgende Übersetzung der im Original englischen Definition:

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

Mechatronische Systeme bieten eine große Bandbreite. Sie lassen sich nach GAUSEMEIER in drei Klassen differenzieren (vgl. Bild 2-1):

- Systeme, mit räumlicher Integration von Mechanik und Elektronik
- Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten
- Intelligente Mechatronik mit inhärenter Teilintelligenz

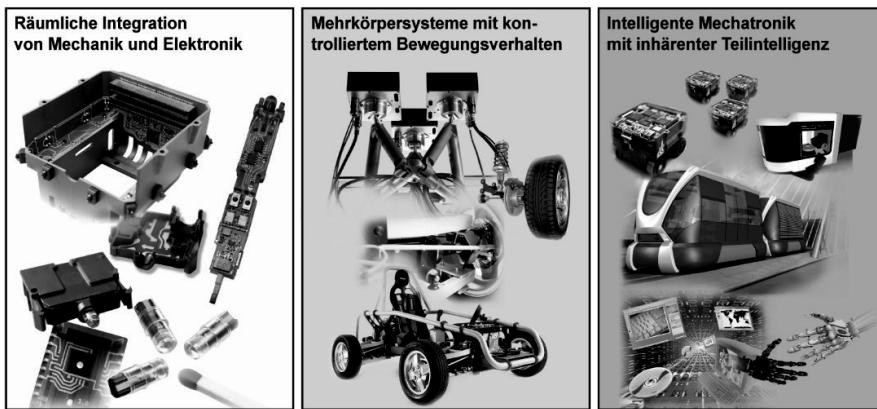


Bild 2-1: Klassen mechatronischer Systeme [GTS14, S. 26]

Die erste Klasse umfasst diejenigen Systeme, die eine hohe Integration mechanischer und elektronischer Funktionsträger auf kleinem Bauraum realisieren (integrierte mechatronische Systeme). Wesentliche Erfolgspotentiale liegen in der Funktionsintegration, Miniaturisierung, erhöhten Zuverlässigkeit sowie den geringen Herstellkosten. Die Aufbau- und Verbindungstechnik steht hier im Vordergrund. Starke Wechselwirkungen zwischen Produkt und zugehörigem Produktionssystem führen zu der Notwendigkeit diese parallel und integrativ zu entwickeln [GF06, S. 4].

Die zweite Klasse umfasst Systeme, die die Verbesserung der Verhaltensweise fokussieren. Systeme dieser Klasse können durch Sensor-Aktor-Verknüpfungen sowie mit Hilfe der Informationsverarbeitung selbstständig auf Änderungen in ihrer Umgebung reagieren. Ziel ist es, technische Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten zu realisieren. Im Vordergrund steht die ganzheitliche Optimierung des Gesamtsystems, indem sowohl das mechanische Grundsystem als auch die Informationsverarbeitung auf die erforderliche Bewegungsdynamik abgestimmt werden [JIZ+10, S. 2], [GF06, S. 3].

Systeme der dritten Klasse besitzen inhärente Teilintelligenz. Diese resultiert aus der sich abzeichnenden Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik, die neue Perspektiven bereitstellt, die weiter über den heutigen Stand hinausgehen. Sie sind somit in der Lage sich ihrer Umgebung und den Wünschen der Anwender im Betrieb anzupassen. Charakteristisch für solche Systeme ist die hohe informationstechnische Vernetzung untereinander sowie innerhalb eines Systems und zu Subsystemen [GRS14, S. 4].

Die vorliegende Arbeit fokussiert Systeme der ersten Klassen, welche oft als elektro-nisch-mechanische Baugruppen bezeichnet werden. Neben mechanischen und elektronischen Funktionen integrieren sie oftmals auch optische, fluidische und/oder thermische Funktionen [GF06, S. 4], [Fra13, S. 1]. Eine Beispielapplikation ist die Multi LED-Baugruppe aus der Medizintechnik (vgl. Bild 2-1, links). Die Multi LED-Baugruppe kommt bei der Zahnarztbehandlung zum Einsatz. Die Baugruppe substituiert die konventionelle

Hochdrucklampe. So können bestehende Komponenten beim Zahnarzt einfach umgerüstet werden. Wesentliche Vorteile für den Anwender bestehen in einer erhöhten Leuchtkraft und verlängerten Lebensdauer im Vergleich zu der herkömmlichen Lösung [2E15a-ol]. Aufgrund des geringen Bauraums und zur optimalen Ausleuchtung ist eine dreidimensionale miniaturisierte Lösung notwendig. Die LED-Lösung vereint elektrische, mechanische und optische Funktionen in einer Baugruppe [FGG+11, S. 72], [Fra13, S. 301f.]. Eine weitere Beispielapplikation ist ein Drucksensor (vgl. Bild 2-1, links). Der Drucksensor bietet die Möglichkeit, ein- und dasselbe Gehäuse sowohl für die Absolut- als auch für die Differenzdruckmessung zu konfigurieren. Dadurch werden Varianten ermöglicht bei gleichzeitiger Teilereduzierung. Durch die Dreidimensionalität des Gehäuses kann eine hohe Genauigkeit des Sensors erreicht werden. Der Sensor vereint mechanische, elektrische und fluidische Funktionen in einer Baugruppe [2E15b-ol].

2.2.1 Grundstruktur elektronisch-mechanischer Baugruppen

Die zuvor genannten Beispielapplikationen zeigen, dass elektronisch-mechanische Baugruppen sehr unterschiedliche Funktionen aufweisen können. In der Regel weisen diese Systeme eine einheitliche Grundstruktur auf. Sie bestehen aus einem Gehäuse, einem Schaltungsträger inkl. elektronischer Bauteile sowie elektronischen und mechanischen Schnittstellen. Bild 2-2 illustriert diesen Sachverhalt.

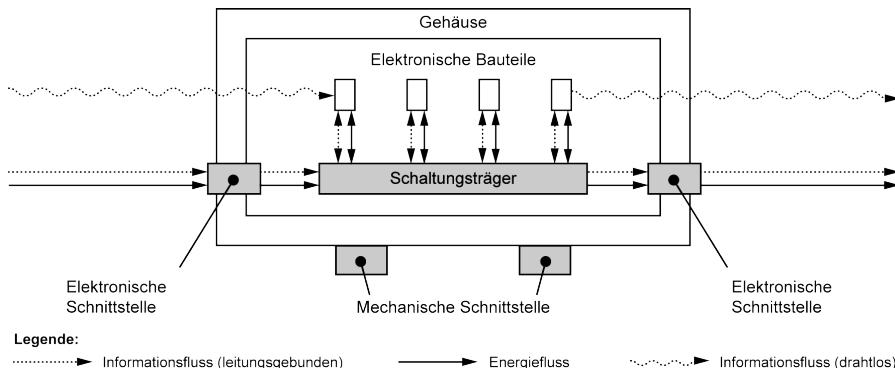


Bild 2-2: Grundstruktur elektronisch-mechanischer Baugruppen nach [Pei07, S. 9]

Gehäuse: Das Gehäuse bildet die mechanische Grundstruktur. Zudem schützt es die Bauteile vor schädigenden Umwelteinflüssen wie Staub, Schmutz, Feuchtigkeit und Stößen [GF06, S. 81f.].

Schaltungsträger: Auf dem Schaltungsträger sind die elektronischen Bauteile aufgebracht. Sie sind über Leiterbahnen miteinander verbunden. Es werden starre, starrflexible und flexible Schaltungsträger unterschieden. Starre Schaltungsträger tragen zu einer besseren mechanischen Stabilität der Baugruppe bei, wobei flexible Schaltungsträger bei schwierigen Geometrien geeigneter sind [Wat06, S. 14].

Schnittstellen: Es werden elektronische und mechanische Schnittstellen unterschieden. Es gibt auch eine Mischform, die elektro-mechanischen Schnittstellen. Sie werden für die Verbindung zu Nachbarbaugruppen benötigt [Wat06, S. 14].

Elektronische und mechanische Bauteile sind über Flussbeziehungen miteinander verknüpft. In der Konstruktionslehre z.B. nach PAHL/BEITZ [FG13] werden drei Arten von Flüssen unterschieden:

- **Energiefluss:** Zu Energieflüssen zählt jegliche Art an übertragener Energie z.B. mechanische, elektrische oder thermische Energie sowie deren physikalischen Größen (Strom, Kraft, Abwärme).
- **Informationsfluss:** Mit diesem Fluss werden die Informationen charakterisiert, die zwischen den elektronischen Bauteilen ausgetauscht werden, z.B. Steuersignale oder Messgrößen. Es werden leitungsgebundene (z.B. Kabel) und leitungsungebundene (z.B. Funk, Bluetooth, Infrarotlicht) Informationsübertragungsmöglichkeiten differenziert.
- **Stofffluss:** Mit Stoffflüssen wird der Transport von festen Körpern, Flüssigkeiten oder Gasen beschrieben. Das Befördern von Hydrauliköl mittels Pumpe zu einem Hydraulikzylinder stellt bspw. einen Stofffluss dar.

Bei elektronisch-mechanischen Baugruppen steht vor allem der Informationsfluss im Vordergrund. Die Eingangsinformationen werden von der Elektronik aufgenommen, verarbeitet und als Ausgangsinformationen weitergeleitet. Energie- und Stoffflüsse weisen häufig einen unterstützenden Charakter auf.

2.2.2 Differential- und Integralbauweise

Der Aufbau elektronisch-mechanischer Baugruppen kann je nach Zielsetzung variieren. Grundsätzlich werden zwei Arten unterschieden: Differential- und Integralbauweise [PBF+07, S. 447ff.], [EKL07, S. 318], [Ehr09, S. 478ff.], [Sch05, S. 125f.].

Bei der Differentialbauweise wird ein Bauteil oder eine Baugruppe in mehrere Einzelteile aufgespalten, die abschließend gefügt werden. Die Differentialbauweise kann aufgrund unterschiedlicher Gesichtspunkten vorteilhaft sein:

- Simplifizierung der Reparatur
- Aufteilung großer und daher schwer fertigbarer Bauteile
- Einfachere Fertigung

Die Integralbauweise ist gegenläufig zu der Differentialbauweise. Es wird angestrebt, die Einzelteilezahl zu reduzieren, indem Funktionalitäten in einem Bauteil oder Baugruppe vereint werden. Die Integralbauweise wird häufig aufgrund folgender Gesichtspunkte als vorteilhaft eingestuft:

- Teilereduzierung
- Gewichtsreduzierung
- Verkürzung der Prozesskette
- Miniaturisierung

Die Differentialbauweise erweist sich zudem häufig bei Einzel- und Kleinserienfertigung und bei großen Bauteilen als kostengünstiger. Die Bauteile lassen sich häufig aus vorhandenen Werkstoffen, Halbzeugen und/oder Normteilen herstellen. Zudem sind die benötigten Formen und Maschinen oft kostengünstiger. Die Teileanzahl ruft jedoch zugleich einen erhöhten Montageaufwand hervor [EKL07, S. 320], [Ehr09, S. 481]. Bild 2-3 zeigt unterschiedliche Arten der Differentialbauweise.

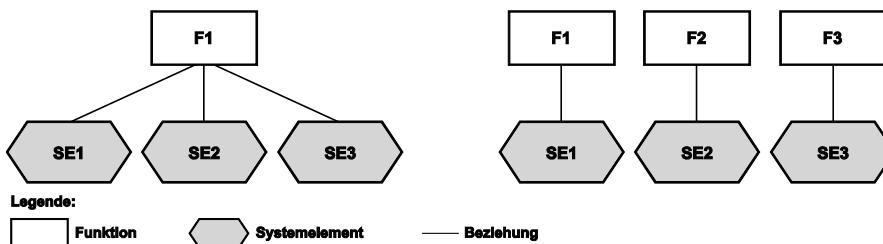


Bild 2-3: Differentialbauweise mit einer Funktion und mehreren Funktionen nach [Rap99, S. 63]

Die Integralbauweise erweist sich bei großen Stückzahlen und bei kleinen und mittleren Bauteilausmaßen als kostengünstiger. Dies ist damit zu begründen, dass bei größeren Stückzahlen die Werkzeug- und Rüstkosten weniger ins Gewicht fallen, zudem können Effekte durch sinkende Bearbeitungs-, Verbindungs- sowie Montagekosten erzielt werden. Durch die Reduzierung von Schnitt- und Verbindungsstellen, welche stets eine Schwächung des Bauteils zur Folge haben, steigt die Zuverlässigkeit der Produkte. Die Integralbauweise erzeugt zugleich eine höhere Komplexität. Ist diese fertigungstechnisch nur noch schwer zu beherrschen, werden die Grenzen der Bauweise deutlich [EKL07, S. 319], [Ehr09, S. 480]. Bild 2-4 zeigt unterschiedliche Arten der Integralbauweise.

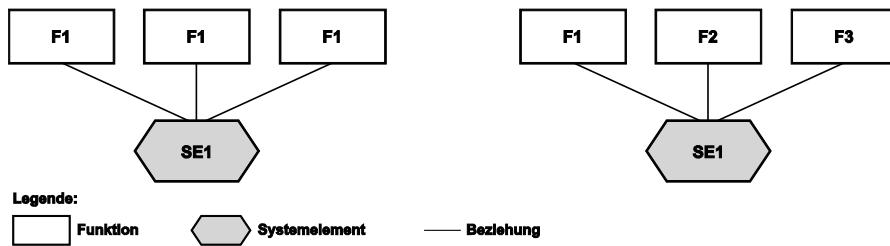


Bild 2-4: Integralbauweise mit gleichen und verschiedenen Funktionen nach [Rap99, S. 63]

2.3 Technologie MID

Die Technologie MID (Molded Interconnect Devices) ermöglicht dreidimensionale Schaltungsträger. Sie vereint sowohl elektronische als auch mechanische Funktionen auf einer Baugruppe und bietet weitreichende Möglichkeiten z.B. der Gestaltungsfreiheit, Miniaturisierung und Kostenreduzierung. Die Technologie wird in Kapitel 2.4.1 näher erläutert. Kapitel 2.4.2 befasst sich mit den MID-Herstellverfahren. In Kapitel 2.4.3 werden Grundlagen zur Aufbau- und Verbindungstechnik näher vorgestellt.

2.3.1 Beschreibung der Technologie MID

Molded Interconnect Devices sind dreidimensionale spritzgegossene Formteile mit Leiterbild. Das Leiterbild wird durch eine partielle Strukturierung und Metallisierung erzeugt. Anschließend lassen sich die Leiterbahnen und Kontakte mit elektronischen Bauteilen bestücken. Die Struktur der Leiterbahnen lässt sich auch in der Form gestalten, dass sie als Antennen oder Schirmungen genutzt werden können. Die Formteile bestehen in der Regel aus einem Thermoplast mit zusätzlichen Additiven. Bild 2-5 zeigt die fünf Fertigungsstufen vom Granulat bis zum fertigen Produkt.



Bild 2-5: Fünf Fertigungsstufen vom Granulat zum fertigen Produkt [For15a-ol]

Aber auch weitere Materialien sind denkbar wie z.B. Keramiken. Die Begriffserweiterung zu „Mechatronic Integrated Devices“ charakterisiert diese Perspektive. Neben den beschriebenen elektronischen Funktionen lassen sich sowohl mechanische (Steck- oder Schnappverbinder), fluidische (Kanäle), optische (Reflektoren) als auch thermische

(Wärmebrücken) Funktionen realisieren [Fra13, S. 1ff.]. Bild 2-6 zeigt den MIDster, er ist der Technologie-Demonstrator des 3-D MID e.V. und zeigt anschaulich, welches Potential die Technologie MID bietet: Das Gehäuse ist als 3D-Freiformfläche gestaltet, mit wenigen geraden Flächen. Darauf verlaufen die Leiterbahnen. Zudem sind auf dem Demonstrator LEDs, Mikrocontroller, Beschleunigungssensor und kapazitive Schalter realisiert worden. Die Energieversorgung wird über eine innenliegende Knopfzelle sicher gestellt. Mit Durchkontaktierungen ist sie mit den oben liegenden Leiterbahnen verbunden [For15-ol].

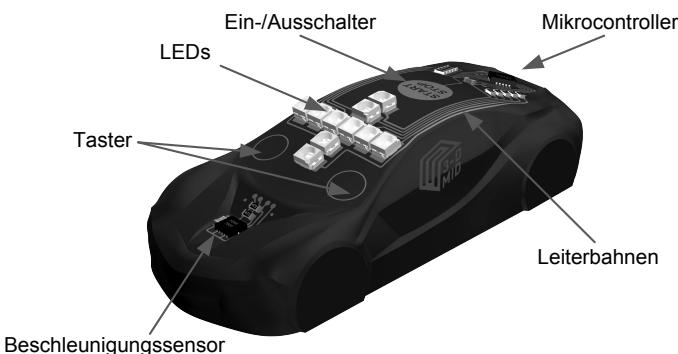


Bild 2-6: MID-Gehäuse des MIDster [For15b-ol]

Es wird deutlich, dass der MID-Demonstrator eine Reihe von elektronischen als auch mechanischen Funktionen erfüllt. PEITZ entwickelte in diesem Kontext insgesamt neun generische MID-Funktionen – fünf elektronische und vier mechanische [Pei07, S. 14f.]:

Elektronische MID-Funktionen

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

Mechanische MID-Funktionen

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

Die Technologie MID ermöglicht die Realisierung mehrerer Funktionen auf einem einzigen Bauteil. Daraus resultieren erhebliche Vorteile gegenüber anderen Technologien wie z.B. Miniaturisierung und Gewichtsreduzierung. Darüber hinaus ermöglicht die Technologie konstruktive Lösungen, die mit konventionellen Technologien gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren wären. Bild 2-7 zeigt die Charakteristika der Technologie MID, welche zu weitreichenden Nutzenpotentialen führen. Diese lassen sich in drei Bereiche differenzieren: Anwendungsbasierte, produktbasierte und produktions-technikbasierte Nutzenpotentialen. Die drei Bereiche können jedoch nicht komplett losgelöst voneinander betrachtet werden, da sie alle in Beziehung stehen. Sie beschreiben aus der jeweiligen Perspektive unterschiedliche Nutzenpotentialen. Die Nutzenpotentialen werden im Folgenden näher betrachtet.

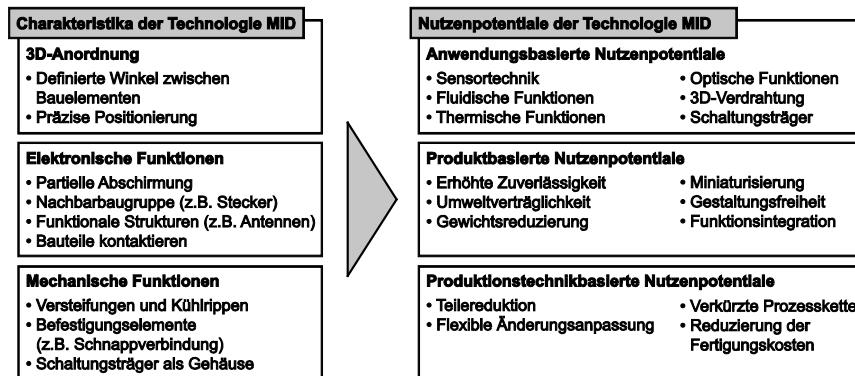


Bild 2-7: Charakteristika und Nutzenpotentiale der Technologie MID

Anwendungsbasierte Nutzenpotentiale

Sie beziehen sich zumeist auf Anwendungen, die nur sehr schwer oder gar nicht mit konventionellen Verfahren hergestellt werden können. Speziell im Bereich der Sensortechnik sind zwei maßgebliche Charakteristika der MID-Technologie ausschlaggebend: Zum einen die exakte Positionierung der mechanischen und elektronischen Komponenten, die

für viele Messprinzipien gegeben sein müssen. Zum anderen die Gestaltungsfreiheit und Miniaturisierung, die eine nahe Messung am Messort möglich macht. Zudem können neue Applikationen aufgrund optischer, fluidischer und thermischer Funktionen realisiert werden [FGG+11, S. 44].

Produktbasierte Nutzenpotentiale

Von den produktbasierten Nutzenpotentialen werden häufig vor allem die Funktionsintegration, Miniaturisierung und Gestaltungsfreiheit realisiert. Durch den Einsatz der Technologie MID können unterschiedliche Applikationen z.B. Stecker oder Antennen in einem Bauteil realisiert werden. Die Miniaturisierung korreliert stark mit der Gestaltungsfreiheit. Durch die verbesserte Ausnutzung des Bauraums wird oftmals auch eine Miniaturisierung erzielt. Zudem begünstigt die Integration mechanischer und elektronischer Funktionen eine weitere Verkleinerung der Bauteilgröße [FGG+11, S. 40f.], [GF06, S. 84]

Produktionstechnikbasierte Nutzenpotentiale

Produktionstechnische Nutzenpotentiale ergeben sich vor allem durch eine Teilereduktion, verkürzte Prozesskette und die Reduzierung der Fertigungskosten. Durch die für MID typische Integralbauweise werden Schnittstellen reduziert und Montageprozesse entfallen. Eine Kostenreduktion in der Fertigung wird nicht nur durch eine Integralbauweise und ihrer Charakteristika erreicht. Auch kann die MID-Prozesskette selber zu Kostenreduzierungen führen. Wichtig hierbei sind die Definition des korrekten Betrachtungsgegenstandes und die korrekte Bewertung [FGG+11, S. 42].

2.3.2 Schlüsselfaktoren erfolgreicher MID-Projekte

Neben der Strategie und der Struktur sind bereits frühzeitig in der Produktentwicklung weitere Faktoren zu berücksichtigen, um erfolgreiche Serienapplikationen in der Technologie MID realisieren zu können. Aus diesem Grund erfolgte im Rahmen der MID Studie 2011 die Identifikation von Schlüsselfaktoren in MID-Projekten. Bild 2-8 zeigt die vier wesentlichen Schlüsselfaktoren für erfolgreiche MID-Projekte.

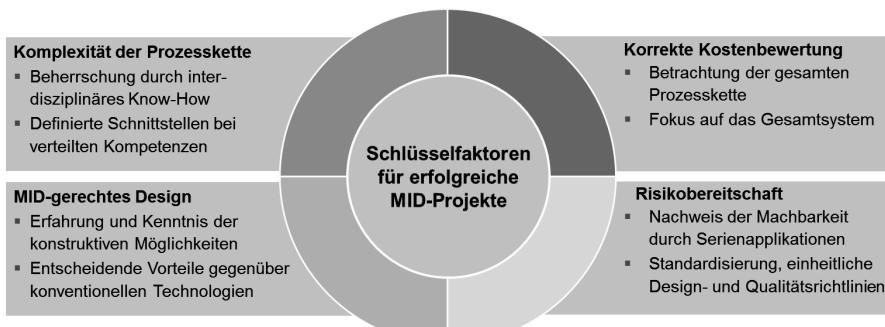


Bild 2-8: *Schlüsselfaktoren für MID-Projekte nach [FGG+11, S. 80]*

- 1) Komplexität der Prozesskette:** Das erforderliche interdisziplinäre Know-how ist entweder in den Unternehmen nicht ausreichend vorhanden oder wird nicht erfolgreich in den einzelnen Projekten zusammengeführt. Häufig sind die Kompetenzen über mehrere Unternehmen verteilt. Die Schnittstellen zwischen den Unternehmen sind nicht ausreichend definiert [FGG+11, S. 80], [Got13, S. 144f.].
- 2) MID-gerechtes Design:** Viele Unternehmen erkennen das Potential der Technologie und generieren vielversprechende Produktideen. Es fehlt jedoch häufig die notwendige Erfahrung mit dem Umgang der Technologie im Hinblick auf konstruktive Möglichkeiten sowie im Hinblick auf die Auswahl des Herstellverfahrens für eine konkrete Anwendung [FGG+11, S. 80].
- 3) Risikobereitschaft:** Gründe für die fehlende Risikobereitschaft bei einigen Unternehmen sind u.a. fehlende Nachweise der Langzeitzuverlässigkeit sowie MID-spezifische Design- und Qualitätsrichtlinien. Dem gegenüber stehen die steigende Anzahl an Referenzprojekten und erfolgreichen Serienapplikationen, die die Risikobereitschaft der Unternehmen fördern [FGG+11, S. 80].
- 4) Korrekte Kostenbewertung:** In vielen Fällen wird die Technologie MID fälschlicherweise als Kostentreiber ausgemacht. Eine korrekte Kostenkalkulation setzt die Betrachtung der gesamten Prozesskette sowie des Gesamtsystem voraus. Es müssen alle Prozesse von dem Spritzguss über die Metallisierung bis hin zur Aufbau- und Verbindungstechnik sowie weitere Prozesse betrachtet werden [FGG+11, S. 80].

2.3.3 MID-Herstellverfahren

Innerhalb der Technologie MID existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Herstellverfahren. Bild 2-9 zeigt den MID-Referenzprozess, welcher sich in fünf Schritte gliedert [GF06, S. 86], [Fra13, S. 6]. Die ersten drei Prozessschritte dienen der Herstellung des „nackten“ MID-Bauteils, die letzten zwei Prozessschritte sind der Aufbau- und Verbindungsstechnik zu zuordnen. Im ersten Prozessschritt wird der Schaltungsträger hergestellt. Anschließend wird dieser strukturiert und metallisiert. Im darauffolgenden Prozessschritt werden die elektronischen Bauteile aufgebracht. Abschließend werden diese mit dem Schaltungsträger kontaktiert.

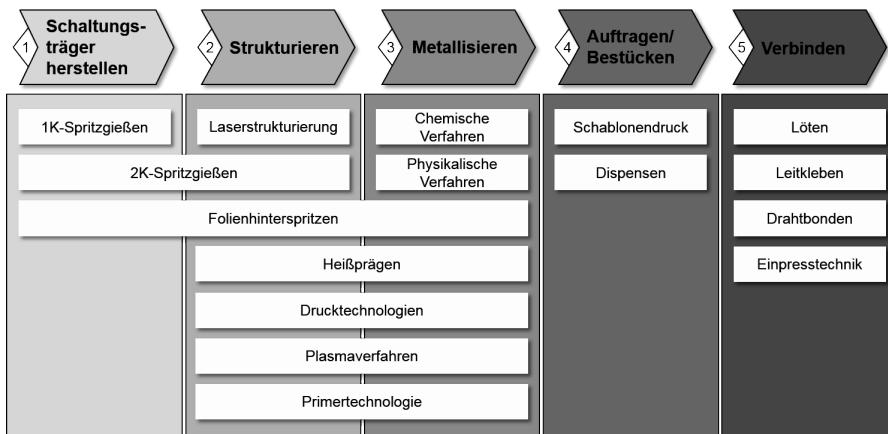


Bild 2-9: MID-Referenzprozess nach [Fra13, S. 86]

Jedem Prozessschritt sind Verfahrensschritte zugeordnet. Die Kombination einzelner Verfahrensschritte führt zu Verfahrensketten, die als MID-Herstellverfahren bezeichnet werden. Die weitverbreitetsten Verfahren in der Praxis sind Laserdirektstrukturieren (additiv und subtraktiv), Folienhinterspritzen, Zweikomponentenspritzguss sowie Heißprägen [Fra13, S. 5]. Im Folgenden werden diese vier MID-Herstellverfahren näher charakterisiert.

Laserstrukturierung

Bei der Laserstrukturierung werden subtraktive, semi-additive und additive Verfahren unterschieden. Für jedes Verfahren wird eine leicht unterschiedliche Prozessfolge durchlaufen. Bei dem subtraktiven Verfahren wird eine vollflächige Metallisierung vorgenommen. Danach wird ein Ätzresist aufgebracht, welches anschließend mittels Laser strukturiert wird. Abschließend wird das frei liegende Kupfer weggeätzt. Die nicht strukturierten Flächen bleiben erhalten und werden ggf. veredelt. Bei semi-additiven Verfahren wird im Gegensatz zum Ätzresist ein Photoresist aufgetragen, welches anschließend strukturiert

wird. Bei der nachfolgenden Galvanisierung lagert sich Kupfer auf den strukturierten Flächen ab. Abschließend werden das Photoresist sowie die Grundmetallisierung weggeätzt. Bei den additiven Verfahren ist die Laserdirektstrukturierung (LDS) weit verbreitet.

Die in Bild 2-10 gezeigte Prozesskette für die Laserdirektstrukturierung wird im Folgenden näher erläutert: Bei der Laserdirektstrukturierung besteht der Schaltungsträger aus einem thermoplastischen Kunststoffcompound, welcher im Einkomponentenspritzguss hergestellt wird. Dem Kunststoff ist ein Additiv zugesetzt, welches die Strukturierung und anschließende Metallisierung ermöglicht. Die Additive werden mit Laserstrahlung freigesetzt. Dadurch werden die Metallisierungskeime aktiviert und gleichzeitig die Oberfläche angerauht. Während der Metallisierung lagert sich an den strukturierten Bereichen Kupfer ab. Die Schichtdicke hängt maßgeblich von der Dauer der Galvanisierung ab. Bei Bedarf erfolgt eine Oberflächenveredelung mit Nickel und/oder Gold. Dies führt zu widerstandsfähigeren Leiterbahnen und einer längeren Haltbarkeit.

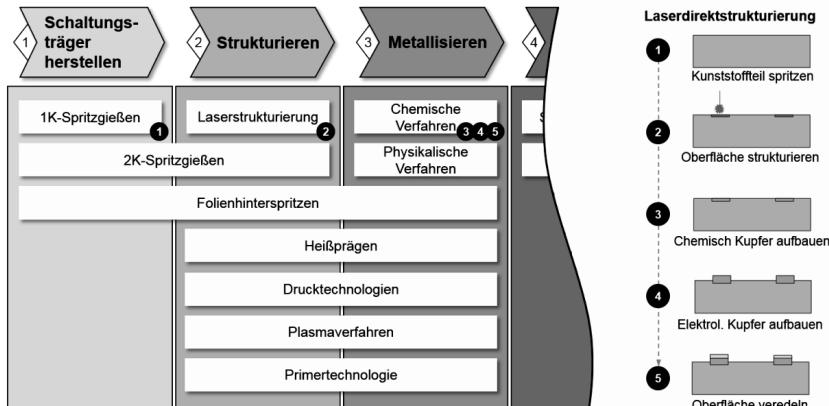


Bild 2-10: Prozesskette des MID-Verfahrens „Laserdirektstrukturierung“ nach [Fra13, S. 6], [GF06, S. 86]

Die Laserstrukturierung ist ein sehr flexibles Verfahren hinsichtlich dem geringen Änderungsaufwand für unterschiedliche Schaltungslayouts. Das Layout kann schnell und einfach im Strukturierungsprogramm des Lasers geändert werden. Nachteilig sind die vergleichsweise hohen Investitionen sowie die eingeschränkte räumliche Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen. Die Gestaltungsfreiheit wird durch die Freiheitsgrade der Laseranlage determiniert [Fra13, S. 66f.], [Got13, S. 7f.], [Kai09, S. 14f.].

Folienhinterspritzen

Das Folienhinterspritzen bietet die Möglichkeit starre und flexible Leiterplatten zu kombinieren und gleichzeitig mechanische Funktionen in das Bauteil zu integrieren. Die Prozesskette für das Folienhinterspritzen ist sehr kurz. Bei diesem Verfahren wird eine separat hergestellte – ein- oder mehrlagige – Leiterbildfolie in ein Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit einem Thermoplast hintspritzt. Wenn die Folie im Werkzeug nicht in einer

Ebene liegt, muss diese vorverformt und/oder mit Einschnitten versehen werden. Die Leiterbahnenfolien ermöglichen die Herstellung von mehrlagigen MID-Bauteilen, wobei die Lagen über Durchkontakteierungen mit der MID-Bauteil-Oberfläche verbunden werden können. Die Leiterbildfolien werden vor dem Hinterspritzen mit etablierten Verfahren aus der Leitplattentechnik (Ätzen, Galvanisieren, etc.) strukturiert und metallisiert. Um eine hohe Haftfestigkeit zwischen Leiterbahnenfolie und Kunststoff zu erreichen, müssen entweder ähnliche Werkstoffe verwendet oder Haftvermittler eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Bruchdehnung der Leiterbahnen und Faltenbildung ist lediglich eine eingeschränkte Dreidimensionalität möglich [For04, S. 198f.], [Fra13, S. 90].

Zweikomponentenspritzguss (2K-Spritzguss)

Beim 2K-Spritzguss werden der Schaltungsträger und die Leiterbahnstruktur mittels zwei aufeinander folgenden Schüssen hergestellt. Es kommen zwei Komponenten zum Einsatz. Dabei ist eine Komponente metallisierbar. Daraus ergeben sich zwei Verfahrensabläufe. Bei der ersten Variante wird zunächst der metallisierbare Kunststoff gespritzt. Im zweiten Schuss wird dieser mit der nicht-metallisierbaren Komponente umspritzt. Die metallisierbaren Leiterbahnen liegen anschließend frei. Bei Variante zwei ist der Verfahrensablauf umgekehrt: Beim ersten Schuss wird der nicht-metallisierbare Kunststoff gespritzt. Beim zweiten Schuss wird die metallisierbare Komponente zugeführt. Sie stellt das Leiterbahnlayout dar.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Verfahrensabläufen werden zudem zwei unterschiedliche Verfahren unterschieden: das PCK-Verfahren (Printed Circuit Board Kollmorgen) und das SKW-Verfahren (Sankyo Kasei Wiring Board). Die beiden Verfahren funktionieren ähnlich, nur wird der leiterbahntragende Kunststoff beim SKW-Verfahren erst nach dem Spritzen durch Katalyse metallisierbar gemacht, beim PCK-Verfahren ist er es bereits vor dem Schuss. Beiden Verfahren schließt sich nach dem Spritzguss die chemische Metallisierung an.

Der 2K-Spritzguss bietet eine hohe Gestaltungsfreiheit von Schaltungsträger und Leiterbahnen. Es können leicht große Leiterbahnquerschnitte realisiert werden. Zudem können hohe Stückzahlen bei gleichbleibender Genauigkeit realisiert werden. Nachteilig bei diesem Verfahren ist der große Änderungsaufwand. Hohe Investitionen können vermieden werden, da der Kunststoff mit Standard-Spritzgießmaschinen verarbeitet werden kann. Die Werkzeugkosten können bei komplizierten Geometrien mitunter sehr hoch ausfallen [For04, S. 154f.], [Fra13, S. 89f.].

Heißprägen

Beim Heißprägen wird eine bereits strukturierte und metallisierte Kunststofffolie auf den Schaltungsträger gepresst. Die Kunststofffolie wird unter hohem Druck und Hitze mittels Prägestempel aufgepresst. Auf dem Prägestempel befindet sich das negative Leiterbahnlayout. Durch die Hitze wird der Schaltungsträger lokal aufgeschmolzen und eine formschlüssige Verbindung mit der Prägefolie realisiert.

Beim Heißprägen werden das Hub- und das Abrollverfahren unterschieden. Beim Hubverfahren wird die Kunststofffolie mittels vertikal verfahrbarem Prägestempel aufgebracht. Bei diesem diskontinuierlichen Verfahren ist eine präzise Prägestempelführung sowie Temperaturregelung essentiell, um reproduzierbare Ergebnisse gewährleisten zu können. Beim Abrollverfahren wird die Prägefolie mit einem Prägerad aufgebracht. Abweichend zum Hubverfahren wird die Prägekraft lediglich entlang der Kontaktlinie des Prägerads mit dem Schaltungsträger wirksam. Dadurch können große zusammenhängende Flächen realisiert werden.

Das Heißprägen ist ein vergleichsweise günstiges Verfahren. Die Prozesszeiten sind kurz und es können zahlreiche Thermoplaste verarbeitet werden. Zudem ist keine chemische Nachbehandlung des Bauteils notwendig. Nachteile des Verfahrens sind die geringe Gestaltungsfreiheit – der Verlauf der Leitbahnen darf eine Neigung von $\pm 45^\circ$ zur Prägefäche nicht überschreiten. Die Prägestempel müssen nach etwa 500-1000 Zyklen gereinigt werden. Aktivitäten in der Forschung zeigen, dass die Zykluszahl durch eine Oberflächenbehandlung des Prägestempels auf 3000-4000 erhöht werden kann [AiF09-ol, S. 93], [For04, S. 162ff.], [Fra13, S. 84ff.].

2.3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Eine Herausforderung bei der Herstellung elektronisch-mechanischer Baugruppen allgemein und insbesondere bei MID-Baugruppen stellt die Bestückung und Kontaktierung elektronischer Bauteile auf den Schaltungsträger dar. Die entsprechenden Prozesse werden unter dem Begriff Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) subsumiert. Im Folgenden wird ein Überblick über die etablierten Technologien gegeben.

Montagetechnik

Die Montagetechnik korrespondiert stark mit der Aufbau- und Verbindungstechnik. Sie umfasst das Aufbringen von Verbindungsmedien wie Lotpasten und Leitklebern sowie das Bestücken von Bauelementen auf den Schaltungsträger. Das Aufbringen der Verbindungsmedien erfolgt entweder über den Schablonendruck oder das Dispensen.

Beim **Schablonendruck** wird eine Metallschablone auf den Schaltungsträger gelegt. Sie besitzt an den Stellen Aussparungen an denen Lotdepots vorgesehen sind. Mit Hilfe eines Rakels wird die Lotpaste aufgetragen. Der Rakel wird über die Schablone gezogen. So füllen sich die Lotdepots mit Lotpaste. Nach dem Entfernen der Schablone bleiben die Lotdepots auf dem Schaltungsträger zurück [Fra13, S. 127].

Beim **Dispensen** wird das Medium mittels Dispensautomaten sequentiell aufgebracht. Es wird keine Schablone benötigt. Das Verfahren ist in Bezug auf Änderungen oder Varianten sehr flexibel. Der Dispenser verfährt über den Schaltungsträger. Das Medium wird präzise dosiert und appliziert. Durch Handhabungseinrichtungen ist das Dispensverfahren auch für dreidimensionale Schaltungsträger geeignet. Die Prozessgeschwindigkeit ist allerdings geringer als beim Schablonendruck [Fra13, S. 128].

Aufbautechnik

Unter Aufbautechnik werden die Aufbauvarianten für elektronische Baugruppen verstanden. Die elektronischen Bauteile werden über den Schaltungsträger miteinander verbunden. Der Schaltungsträger besteht aus einem elektrisch isolierenden Material oder weist mindestens eine isolierende Schicht auf. Es werden starre und flexible Schaltungsträger unterschieden. Klassische starre Schaltungsträger sind Leiterplatten (Printed Circuit Boards – PCBs), sie sind planar und bestehen aus verpresstem glasfaserverstärkten Kunststoff. Die Kupferleiterbahnen werden geätzt. Leiterplatten können ein- oder beidseitig bestückt werden. Mehrlagige Leiterplatten (sog. Multilayer) weisen eine sehr hohe Leiterbahndichte auf. Durch die Technologie MID sind dreidimensionale thermoplastische Schaltungsträger realisierbar. Flexible Schaltungsträger bestehen aus kupferbeschichteten Kunststofffolien. Ein wesentlicher Vorteil der Folien ist die elastische Verformbarkeit. Die Folien können sowohl gebogen, verdreht oder auch gerollt werden.

Die Bauformen elektronischer Bauteile werden in die Through Hole Technology (THT), Surface Mount Technology (SMT) sowie Chip on Board (CoB) differenziert.

Bei der **Through Hole Technology (THT)** werden die Bauteile in Kontaktlöcher durch den Schaltungsträger gesteckt und auf der Rückseite mittels Lot elektrisch und mechanisch kontaktiert. Aufgrund des relativen großen Platzbedarfs ihrer Anschlussdrähte, werden sie immer seltener verwendet.

Substituiert werden die THT-Bauteile durch die der **Surface Mount Technology (SMT)**. Die Bauteile werden als Surface Mount Devices (SMD) bezeichnet. Sie werden über lötfähige Anschlussflächen direkt mit dem Schaltungsträger kontaktiert. Insbesondere Chips werden häufig auch flächig kontaktiert. Die Ball Grid Arrays (BGA) besitzen Kontaktflächen auf der Unterseite in Form eines Schachbretts. Über Lotkugeln, den sog. Balls, werden die Bauteile mit dem Schaltungsträger kontaktiert. Vorteile der Surface Mount Technology sind die hohe Packungsdichte, die geringe Bauhöhe, das geringe Gewicht sowie die rationelle Bestückung auf Vorder- und Rückseite des Schaltungsträgers.

Bei **Chip on Board (CoB)** werden ungehäuste Siliziumchips verwendet. Da sie kein Gehäuse besitzen, bauen sie noch kleiner. Die Chips werden mit hauchdünnen Drähten (Bonddrähten) oder Leitkleber mit dem Schaltungsträger kontaktiert und anschließend mit Kunststoff (Glob-Top) vergossen.

Bild 2-11 zeigt die beschriebenen Bauformen. Neben THT, SMT und CoB gibt es eine Vielzahl an Misch- und Sonderbauformen elektronischer Bauteile, die im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Betrachtung finden.

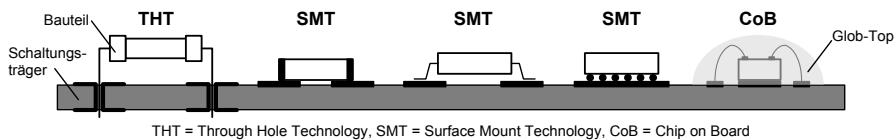


Bild 2-11: Bauformen elektronischer Bauteile nach [Sch99, S. 64]

Verbindungstechnik

Als Verbindungstechnik wird die elektronische und mechanische Kontaktierung der elektronischen Bauteile mit dem Schaltungsträger verstanden. Die Verfahren werden in die Kategorien Löten, Kleben, Bonden und Eimpresstechnik einteilen.

Beim **Löten** werden elektronische Bauteile unter zu Hilfenahme eines Zusatzwerkstoffes (Lot) stoffschlüssig mit dem Schaltungsträger verbunden. Es entsteht eine elektrisch leitfähige und mechanisch feste Verbindung. Jedes Lötverfahren weißt seine eigene Charakteristik in Bezug auf das Flussmittel, die Bereitstellung des Lotes sowie die Wärmezufuhr, auf. Das Reflowlöten kommt bei mehr als 80% der weltweit produzierten elektronischen Baugruppen zu Einsatz [Fra13, S. 158]. Beim Reflowlöten werden Infrarot-, Konvektions- und Kondensationslötungen unterschieden. Bild 2-12 visualisiert die drei Lötverfahren, welche im Folgenden näher erläutert werden.

In **Infrarotstrahlungsöfen** treffen elektromagnetische Wellen auf die Baugruppe. Die Strahlen werden dort teilweise absorbiert oder reflektiert. Der Effekt ist sehr stark material- und oberflächenabhängig. Die Folge kann eine stark inhomogene Temperaturverteilung über das Bauteil sein. Zusätzlich wird dieser Effekt durch eine hohe Bestückdichte, durch große Bauteile sowie durch z.B. Wandungen speziell bei dreidimensional geformten Schaltungsträgern verstärkt. In diesen Bereichen kommt es verstärkt zu Abschattungseffekten. Selbst bei optimaler Prozessführung können Temperaturunterschiede von bis zu 40K in der Peakzone auftreten. Das birgt die Gefahr, Bauelemente oder das Substratmaterial thermisch zu überlasten, wohin gegen andere Bauelemente noch keine ausreichende Temperatur für den Lötprozess erreicht haben. Speziell für MID-Baugruppen ist das Verfahren aufgrund der vorherrschenden Nachteile häufig ungeeignet [Fra13, S. 160], [Sch99, S. 319ff.].

Beim **Konvektionslöten** erfolgt die Wärmeübertragung auf die Baugruppe durch das Umwälzen von Prozessgas (Luft oder Stickstoff). Die Zirkulation des Prozessgases, welche durch Lüfter und Düsensysteme gesteuert wird, ermöglicht eine sehr homogene Erwärmung der Bauelemente und des Schaltungsträgers. Es entstehen keine lokalen thermischen Überlastungen. Die Prozessgastemperatur liegt daher nur geringfügig über der benötigten Arbeitstemperatur. Die Temperaturunterschiede betragen in der Peakzone oftmals weniger als 20K. Analog zum Infrarotlöten können bei diesem Verfahren ebenfalls Abschattungseffekte aufgrund der dreidimensionalen Geometrie komplexer MID-Baugruppen auftreten [Fra13, S. 160f.], [Sch99, S. 329f.].

Beim **Kondensationslöten** wird die Erwärmung der Baugruppe mittels Kondensation einer Trägersubstanz realisiert. Die Trägersubstanz (Dampfphase) kondensiert (Phasenübergang) auf der kälteren Baugruppe und führt durch die direkte Übertragung der Kondensationswärme zur schnellen Aufheizung. Der Siedepunkt der Trägersubstanz stellt gleichzeitig die maximale Prozesstemperatur beim Löten dar. Thermische Überlastungen der Bauelemente oder des Schaltungsträgers sind somit ausgeschlossen. Die Temperaturunterschiede betragen zwischen 0K und 2K. Die Trägersubstanz kondensiert solange an der Baugruppe, bis sie die Temperatur der gesättigten Dampfphase angenommen hat. Je kälter die Stelle auf der Baugruppe ist, desto stärker kondensiert die Trägersubstanz. Dies hat eine sehr homogene Temperaturverteilung über die gesamte Baugruppe zur Folge. Sie ist von der Bauteilgeometrie unabhängig. Als Dampfmedium werden thermisch stabile Kohlenwasserstoffe verwendet. Sie gewährleisten reproduzierbare Prozessabläufe und sind mit unterschiedlichen Siedepunkten verfügbar. Das Kondensationslöten ist allerdings für 3D-MIDs mit schöpfenden Strukturen ungeeignet, da der Ablauf des Kondensats behindert wird und es zur Reduzierung der Wärmeübertragung kommt und dadurch eine ungleichmäßige Temperaturverteilung hervorgerufen werden kann [Fra13, S. 161ff.], [Sch99, S. 325ff.].

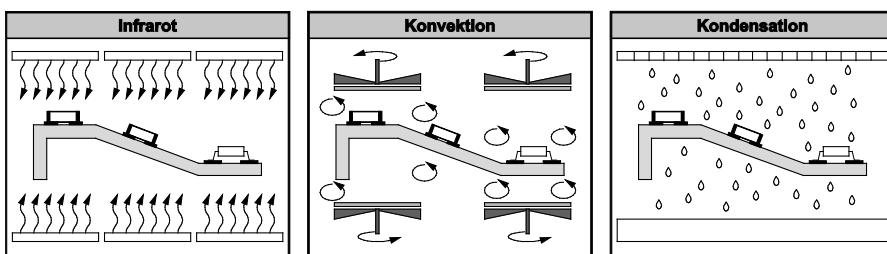


Bild 2-12: Lötverfahren des Reflowlötsens nach [Fra13, S. 162]

Beim **Kleben** wird die Kontaktierung mittels thermisch aushärtbaren, elektrisch leitfähigen Klebstoffen realisiert. Es können auch nicht leitfähige Klebstoffe Verwendung finden. Dieses Verfahren beschränkt sich aber bei MID-Baugruppen zumeist auf die Chipmontage und ähnelt vom Verlauf stark dem Verfahren mit leitfähigen Klebstoffen. Daher wird das Verfahren hier nicht näher beschrieben.

Beim Leitkleben kommen Klebstoffe zum Einsatz, die mit metallischen Partikeln (meistens Silber) gefüllt sind. Der Leitkleber erfüllt sowohl die elektrische als auch die mechanische Kontaktierung des Bauteils mit dem Schaltungsträger. Für die Aushärtung des Klebstoffes werden weit niedrigere Temperaturen (80°C-150°C) als beim Lötprozess benötigt. Dies ermöglicht den Einsatz thermisch empfindlicher Substratmaterialien. Der Selbstzentrierungseffekt der Bauelemente der beim Löten einsetzt, tritt beim Leitkleben nicht auf. Es resultieren weitaus höhere Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der Bauelemente auf dem Schaltungsträger [Sch99, S. 374f.], [Fra13, S. 166f.].

Das **Drahtboden** kommt bei der Chipmontage am häufigsten zum Einsatz. Es werden Ultraschall-Bonden (US) und Thermosonic-Bonden (TS) unterschieden. Der große Vorteil des US gegenüber dem TS ist, dass der Prozess bei Raumtemperatur durchgeführt werden kann. Daraus resultiert eine geringe Temperaturbelastung des Bauelements und des Substrats. Die Bonddrähte bestehen in der Regel aus Aluminium (Al) oder Gold (Au). Sie dienen der elektrischen Kontaktierung. Die mechanische Kontaktierung wird mittels Klebstoff realisiert. Er fixiert den Chip auf dem Bauteil. Häufig kommen thermisch leitfähige Klebstoffe zum Einsatz um die Wärmeabfuhr zu unterstützen. Zum Schutz vor Feuchte, Staub, etc. sowie mechanischen Belastungen werden die Chips mit einem Glob-Top (vgl. Bild 2-11) überzogen [Sch99, S. 412], [Fra13, S. 174ff.].

Ein weiteres Verfahren ohne thermische Belastung ist die **Einpresstechnik**. Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels eingepresstem Metallstift in ein dafür vorgesehenes, durchmetallisiertes Loch (Durchkontaktierung) im Schaltungsträger. Es ist kein Verbindungsmedium notwendig [Fra13, S. 169].

Nach dem Auftragen der Verbindungsmedien erfolgt die **Bestückung** der Bauelemente. Die Bauelemente werden manuell, mittels konventionellen 2D-Bestückautomaten oder 3D-Bestückungssystemen appliziert. Die manuelle Bestückung wird bei Kleinserien oder bei Bauelementen eingesetzt, die nicht oder nur sehr schwer automatisch bestückt werden können. Konventionelle Bestückautomaten sind für die Fertigung von Flachbaugruppen optimiert. Sie zeichnen sich durch eine hohe Bestückleistung, hohe Bestückgenauigkeit sowie ein großes verarbeitbares Bauelementespektrum aus. Der Bestückkopf ist in der x-y-Ebene verfahrbar. Zudem ist er in der Lage das Bauelement zu rotieren und in z-Richtung zu verfahren. Die Bauteile werden mit einer Vakuumpipette angesaugt, gegriffen und platziert. Der Schaltungsträger ist ortsfest angebracht. Der Aufbau des Bestückautomaten ist nur bedingt für dreidimensionale Schaltungsträger geeignet, da die Höhendifferenz auf dem Schaltungsträger den z-Hub nicht überschreiten darf. Eine Möglichkeit dreidimensionale Schaltungsträger zu bestücken, ist die Verwendung eines beweglichen Werkstückträgers. Dieser kann entweder manuell oder maschinell bedient werden. Dabei unterscheiden sich die Werkstückträger in ihren Freiheitsgraden. Manuelle Werkstückträger können zumeist um eine Achse gekippt werden. Diese Systeme sind in der Lage 2D, 2½ D und n x 2D Geometrien zu bestücken. Die Bestückung von dreidimensionalen Schaltungsträgern kann mit unterschiedlichen Bestücksystemen erfolgen. Es lassen sich zwei grundsätzliche Ansätze unterscheiden: Kartesische Portalsysteme mit erweiterter Kinematik und Roboterlösungen. Kartesische Portalsysteme sind ähnlich einem 2D-Bestückautomaten. Die Erweiterung der Kinematik (z.B. zusätzliche Dreh- und Kippachsen) erfolgt auf Seiten des Werkstückträgers, anhand zusätzlicher Aktorik. Es kommen 3D-Werkstückträger im Maschinenbett oder 6-Achs-Roboter zum Einsatz. Bei den Roboterlösungen werden die benötigten Freiheitsgrade auf Seiten des Bauelementträgers realisiert. Ein 6-Achs-Roboter bestückt die Bauelemente auf dem ortsfesten Schaltungsträger. Es sind auch Mischformen dieser Ansätze denkbar [FGG+11, S. 30f.], [Fra13, S. 132ff.], [Sch99, S. 93ff.].

2.4 Entwicklung mechatronischer Systeme

Die Entwicklung mechatronischer Systeme erfordert das Zusammenwirken mehrerer Fachdisziplinen wie der Mechanik, Elektronik/Elektrik und der Informationstechnik sowie der Produktionssystementwicklung. Die daraus entstehende Komplexität stellt besondere Anforderungen an den Entwicklungsprozess. Das enge Zusammenwirken der verschiedenen Fachdisziplinen erfordert die effiziente Kommunikation und Kooperation der beteiligten Fachleute. Die verschiedenen Sichten der einzelnen Fachdisziplinen müssen früh in der Entwicklung zusammengeführt werden. Vor diesem Hintergrund ist eine Vielzahl von Vorgehenssystematiken für die Entwicklung mechatronischer Systeme entstanden. Stellvertretend werden drei Systematiken vorgestellt. Sie spannen den Bogen von generellen zu spezifischen Vorgehensweisen. Zunächst wird in Kapitel 2.4.1 das 3-Zyklenmodell der Produktentstehung näher erläutert. Es beschreibt den grundsätzlichen Ablauf von der Geschäfts-/Produktidee bis zum erfolgreichen Serienanlauf. Die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme“ beschreibt ein generelles, fachdisziplinübergreifendes Vorgehen. Die VDI-Richtlinie 2206 ist Gegenstand in Kapitel 2.4.2. In Kapitel 2.4.3 wird auf die Entwicklung für mechatronische Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices eingegangen.

2.4.1 Produktentstehungsprozess

Bild 2-13 visualisiert den Produktentstehungsprozess nach GAUSEMEIER. Dieser erstreckt sich von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf. Er umfasst die drei Hauptaufgabenbereiche strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung. Zudem erfolgt er zunehmend global verteilt und in Kooperation mit zahlreichen Entwicklern, Zulieferern, etc. Daraus ergeben sich zahlreiche Herausforderungen innerhalb des Produktentstehungsprozess wie z.B. wachsende Interdisziplinarität, kürzere Produktlebenszyklen oder steigender Kostendruck. Nachfolgend werden die drei Zyklen und deren Aufgaben näher erläutert.

Von der Geschäftsidee...

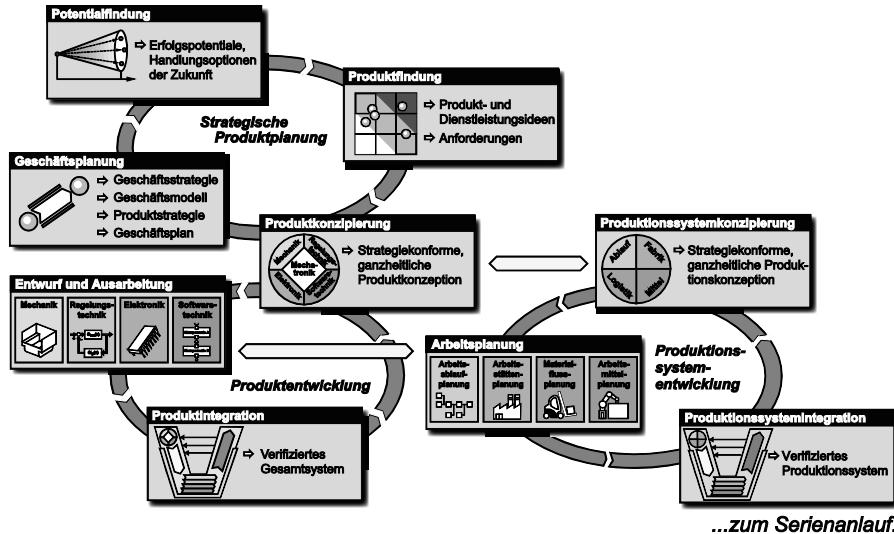


Bild 2-13: 3-Zyklenmodell der Produktentstehung nach GAUSEMEIER [GP14, S. 26]

Erster Zyklus: Von den Erfolgspotentialen der Zukunft zur Erfolg versprechenden Produktkonzeption

Dieser Zyklus charakterisiert das Vorgehen vom Finden der Erfolgspotentiale der Zukunft bis zur erfolgversprechenden Produktkonzeption – der sog. prinzipiellen Lösung. Er umfasst die Aufgabenbereiche Potentialfindung, Produktfindung, Geschäftsplanung und Produktkonzipierung. Das Ziel der Potentialfindung ist das Erkennen zukünftiger Erfolgspotentiale sowie die Ermittlung entsprechender Handlungsoptionen. Auf Basis der Produktfindung, die sich im Kern mit der Suche und Auswahl neuer Produkt- und Dienstleistungen zur Erschließung der Erfolgspotentiale befasst, und der Geschäftsstrategie, wird die Produktstrategie erarbeitet. Die Geschäfts- und Produktstrategie sind Aspekte der Geschäftsplanung. Die Produktstrategie enthält u.a. Aussagen über die einzusetzenden Technologien. Sie mündet in einem Geschäftsplan, der darstellt, dass mit dem neuen Produkt ein attraktiver Return on Investment zu erzielen ist [GP14, S. 25f.].

Zweiter Zyklus: Produktentwicklung/Virtuelles Produkt

Dieser Zyklus umfasst die fachgebietsübergreifende Produktkonzipierung, den fachgebietspezifischen Entwurf und die entsprechende Ausarbeitung sowie die Integration der Ergebnisse der einzelnen Fachgebiete zu einer Gesamtlösung. Da in diesem Zusammenhang das Bilden rechnerinterner Modelle und darauf aufbauende Analysen eine immer wichtiger werdende Rolle eingenommen haben, haben sich die Begriffe Virtuelles Produkt bzw. Virtual Prototyping verbreitet [SK97, S. 307f.], [GP14, S. 26].

Dritter Zyklus: Produktionssystementwicklung/Digitale Fabrik

Den Ausgangspunkt bildet die Konzipierung des Produktionssystems. Dabei sind die vier Aspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung, Arbeitsstättenplanung und Produktionslogistik (Schwerpunkt: Materialflussplanung) integrativ zu betrachten. Die genannten vier Aspekte werden im Verlauf des dritten Zyklus weiter konkretisiert. Analog zu den Begriffen Virtuelles Produkt und Virtual Prototyping haben sich bei der Produktionssystementwicklung die Begriffe Virtuelle Produktion bzw. Digitale Fabrik etabliert. Es werden ebenfalls rechnerinterne Modelle gebildet und Analysen durchgeführt [GP14, S. 26].

Produkt- und Produktionssystementwicklung sind parallel und eng aufeinander abgestimmt zu entwickeln. Nur so kann sichergestellt werden, dass auch alle Möglichkeiten der Gestaltung eines leistungsfähigen und kostengünstigen Erzeugnisses voll ausgeschöpft werden. Speziell bei mechatronischen Erzeugnissen, die sich durch die räumliche Integration von Mechanik und Elektronik auszeichnen (z.B. Molded Interconnect Devices) wird bereits das Produktkonzept durch die in Betracht gezogenen Fertigungsverfahren und Produktionssysteme determiniert. Es bestehen starke Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Sie bestehen bereits in der Konzipierung und werden im Verlauf von Entwurf und Ausarbeitung weiter konkretisiert. Die beiden waagerechten Pfeile in Bild 2-13 verdeutlichen diese wechselseitige Beziehung [GP14, S. 26f.].

Die wesentlichen Herausforderungen, wie oben beschrieben, liegen häufig nicht in den einzelnen Fachdisziplinen sondern in deren Synchronisation und in der übergeordneten Gestaltung des Gesamtsystems.

2.4.2 V-Modell der VDI-Richtlinie 2206

Die VDI-Richtlinie wurde angesichts der steigenden Interdisziplinarität bei der Entwicklung mechatronischer Produkte erarbeitet und stellt einen praxisorientierten Leitfaden für die systematische Entwicklung derartiger Produkte dar. Das Vorgehen der VDI-Richtlinie 2206 umfasst drei elementare Bestandteile:

- 1) Problemlösungszyklus auf Mikroebene:** Der Problemlösungszyklus auf Mikroebene unterstützt den Entwickler bei der Bearbeitung vorhersehbarer und planbarer Teilaufgaben, aber auch bei der Bewältigung plötzlicher, unvorhersehbarer Herausforderungen. Er basiert auf dem allgemeinen Problemlösungszyklus, wie er z.B. aus dem Systems Engineering [DH02, S. 47ff.] bekannt ist. Er gliedert sich in fünf Schritte: Situationsanalyse, Analyse und Synthese, Analyse und Bewertung, Entscheidung sowie Planen des weiteren Vorgehens bzw. Lernen [VDI2206, S. 26ff.].

2) V-Modell auf Makroebene: Das V-Modell auf Makroebene wurde aus der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen der Mechatronikentwicklung angepasst. Es beschreibt das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung. Es ist in Abhängigkeit der Entwicklungsaufgabe spezifisch auszuprägen. Je nach Entwicklungsaufgabe und dessen Komplexität sind die Phasen mehrmals zu durchlaufen. Für wiederkehrende Arbeitsschritte können Prozessbausteine definiert werden. Bild 2-14 zeigt den Prozessbaustein für den Systementwurf sowie das V-Modell [VDI2206, S. 29ff.].

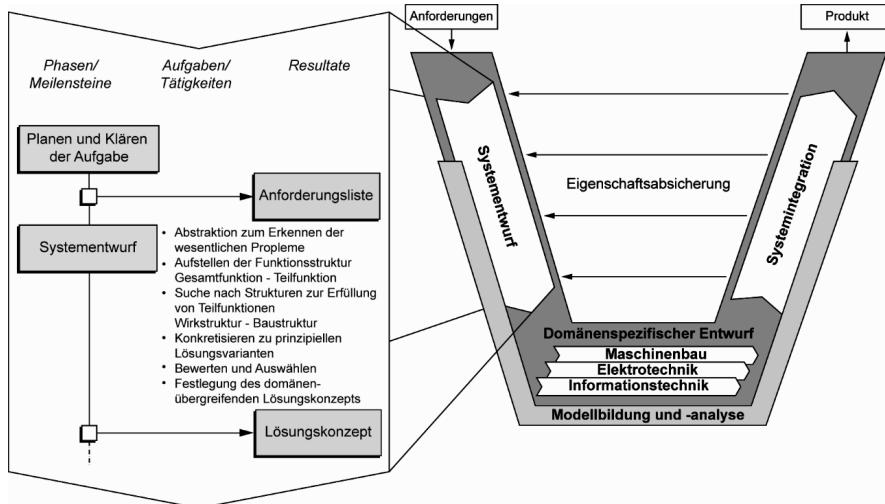


Bild 2-14: V-Modell mit dem Prozessbaustein Systementwurf nach [VDI 2206, S. 32]

Anforderungen: Sie bilden die Präzisierung des Entwicklungsauftrages und bilden zugleich den Maßstab für die spätere Produktbewertung.

Systementwurf: Ziel ist die Festlegung der wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweise des Systems. Diese wird fachdisziplinübergreifend spezifiziert. Ergebnis ist das Lösungskonzept.

Domänenpezifischer Entwurf: In diesem Schritt wird das Lösungskonzept weiter konkretisiert. Dies geschieht innerhalb der Fachdisziplinen, getrennt voneinander.

Systemintegration: Die Ergebnisse des domänenpezifischen Entwurfs werden zu einem Gesamtsystem integriert. Es wird im Hinblick auf ein korrektes Zusammenwirken untersucht.

Eigenschaftsabsicherung: Das Lösungskonzept wird anhand der Anforderungen überprüft. Es ist sicherzustellen, dass die tatsächlichen Systemeigenschaften auch den gewünschten entsprechen.

Modellbildung und -analyse: In den einzelnen Phasen werden rechnerinterne Modelle erstellt. Sie dienen zur Untersuchung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Analyse- und Simulationswerkzeugen.

Das Ergebnis des Makrozyklus ist das Produkt. Dabei muss es sich nicht zwangsläufig um das reale Produkt handeln. Vielmehr sind es unterschiedliche Reifegrade des Produkts die am Ende eines Makrozyklus vorliegen wie Labormuster, Funktionsmuster oder Vorserienprodukte. Das fertige mechatronische Produkt entsteht in der Regel nicht bei einmaligem Durchlaufen des Makrozyklus. Es sind mehrere Durchläufe erforderlich [VDI2206, S. 29ff.].

- 3) **Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte:** Für wiederkehrende Tätigkeiten können vordefinierte Prozessbausteine hinterlegt werden. In der VDI-Richtlinie 2206 sind Prozessbausteine für den Systementwurf, den domänenspezifischen Entwurf, die Systemintegration, die Eigenschaftsabsicherung, die Modellbildung und -analyse definiert. Bild 2-14 zeigt den Prozessbaustein für den Systementwurf und die dafür definierten Tätigkeiten.

2.4.3 Systematik nach KAISER

KAISER [Kai09] erarbeitete eine Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID. Sie strukturiert den Entwicklungsprozess in verschiedene Phasen und integriert Methoden sowie Richtlinien mit dem Ziel, die Komplexität der Entwicklung besser beherrschbar zu machen. Die Abhängigkeiten zwischen Geometrie, Produktionssystem und den Prozessen der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), die speziell bei der Technologie MID sehr stark vertreten sind, finden Berücksichtigung. Das Ergebnis ist die Spezifikation von Produkt und Produktionssystem. Das Produkt und Produktionssystem werden mit Hilfe einer Spezifikationstechnik beschrieben (vgl. Kapitel 3.4). Grundsätzlich lassen sich dafür verschiedene Beschreibungssprachen einsetzen. Im Rahmen der Arbeit findet die am Heinz Nixdorf Institut entwickelte Spezifikationstechnik CONSENS² Verwendung (vgl. Kapitel 3.4.1). Die Systematik stellt zwei Vorgehensmodellarten zur Verfügung. Bild 2-15 zeigt das generische Vorgehensmodell, welches dem Entwickler als Leitfaden dient. Darin sind Phasen und Meilensteine sowie entsprechende Ziele definiert, die während der Entwicklung zu durchlaufen sind. Zudem werden Methoden zur Verfügung gestellt, welche in den einzelnen Phasen Anwendung finden können. Zudem beschreibt die Systematik ein spezifisches Vorgehensmodell für die Lasedirektstrukturierung. Dieses detailliert das generische Vorgehensmodell. Die Phasen und Meilensteine des generischen Vorgehens werden im Folgenden erläutert [Kai09, S. 78ff.].

² CONSENS: CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

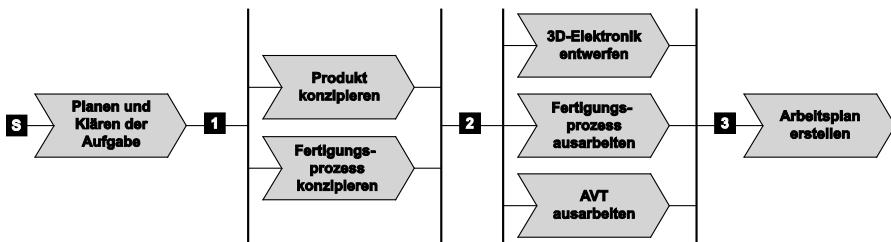


Bild 2-15: Generisches Vorgehensmodell nach KAISER [Kai09, S. 78]

Planen und Klären der Aufgabe: Im Entwicklungsauftrag sind neben Aussagen zum Produkt (z.B. Funktionalität) auch Aussagen zu Terminen und Kosten enthalten [PBF+07, S. 213]. Ausgehend vom Entwicklungsauftrag werden die Produktanforderungen ermittelt. Diese können sowohl technische als auch wirtschaftliche Anforderungen sein. Sie werden mit Hilfe einer Anforderungsliste dokumentiert und im Verlauf der Entwicklung weiter detailliert.

- Meilenstein 1: Es liegen der spezifizierte Entwicklungsauftrag sowie eine vorläufige Anforderungsliste vor.

Produkt konzipieren: Ausgehend vom Entwicklungsauftrag und der Anforderungsliste werden die Produktfunktionen definiert. Es werden Lösungen zur Funktionserfüllung gesucht. Hierzu eignet sich beispielsweise der erweiterte MID-Konstruktionskatalog (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Lösungen werden mittels Nutzwertanalyse anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet. Anschließend wird unter Berücksichtigung von fertigungstechnischen Restriktionen die Wirkungsweise und prinzipielle Gestalt des Produktes festgelegt.

Fertigungsprozess konzipieren: Parallel zur Produktkonzipierung erfolgt die Konzipierung des Fertigungsprozesses. Auf der einen Seite ergeben sich Restriktionen für die Fertigungstechnologie durch das Produktkonzept, auf der anderen Seite beeinflussen fertigungsbedingte Restriktionen stark das Produkt. In der Entwicklung wird auf dieser Grundlage das vorteilhafteste MID-Herstellverfahren ausgewählt.

- Meilenstein 2: Es liegen das Produkt- und Produktionskonzept, in Form der detaillierten Anforderungsliste, der prinzipiellen Gestalt sowie den Arbeitsvorgängen und dazugehörigen Fertigungsmitteln, vor.

3D-Elektronik entwerfen: Auf Basis des Produktkonzepts wird der Entwurf des Schaltungsträgers sowie des Schaltungslayouts entworfen. In Anlehnung an PAHL/BEITZ [FG13] wird erst die Grob- und anschließend die Feingestalt festgelegt. Zur Erfüllung der elektronischen Funktionen werden entsprechende Bauelemente ausgewählt und zum Schaltplan verknüpft.

Fertigungsprozess ausarbeiten: Zunächst wird das detaillierte Produkt auf Verträglichkeit mit dem Fertigungskonzept überprüft. Anschließend wird die Fertigungsprozesskette

weiter detailliert. Es werden die Anlagen und Handhabungssysteme z.B. für die Strukturierung oder Bestückung ausgewählt. Parallel erfolgt die Ausarbeitung der AVT. Sie wird anschließend in den Fertigungsprozess integriert.

Aufbau- und Verbindungstechnik ausarbeiten: In dieser Phase werden die AVT-Prozesse ausgewählt. Es wird überprüft, welche Prozesse eingesetzt werden können. Dies hängt stark vom Produktkonzept ab. Maßgeblichen Einfluss haben der Werkstoff und die Geometrie des Produkts. Anschließend erfolgen die Auswahl der Anlagen, Werkstoffe sowie die Definition der Prozessparameter. Als Ergebnis liegt der ausgearbeitete Fertigungsprozess für die Aufbau- und Verbindungstechnik vor.

- Meilenstein 3: Der Gesamtentwurf des MID-Produkts sowie der dazugehörige Fertigungsprozess inkl. AVT liegen als Resultate vor.

Arbeitsplan erstellen: In der letzten Phase wird die Arbeitsablauf- und Arbeitsmittelplanung vorgenommen. Bei der Arbeitsablaufplanung werden die Arbeits- und Montagepläne sowie Maschinensteuerungsprogramme festgelegt. In der Arbeitsmittelplanung werden, unter Berücksichtigung von Restriktionen wie Stückzahl und Toleranzen die Maschinen und Vorrichtungen definiert.

2.5 Kosten

In jeder Phase des Produktlebenszyklus werden vom Produkt Kosten verursacht. In den frühen Phasen der Entwicklung fallen lediglich geringe Kosten für die Konzeption, Gestaltung sowie Entwicklung des Produktes an. Statistisch entfallen 20% der Lebensdauerkosten in diesen Phasen an. Dem gegenläufig werden ca. 95% der späteren Kosten bereits mit dem Ende der Entwicklung determiniert. So lässt sich schon früh in der Entwicklung, also bereits in der Konzeptphase, eine belastbare Aussage hinsichtlich der Kosten treffen. Zu diesem Zeitpunkt sind ca. 70% der Kosten determiniert [INC12]. Bild 2-16 visualisiert diesen Sachverhalt anschaulich. Auf der Ordinate werden die kumulierten Lebensdauerkosten aufgetragen. Auf der Abszisse ist der zeitliche Verlauf von der Konzeptphase bis zum Betrieb und Entsorgung dargestellt. Wie bereits oben beschrieben, entstehen verhältnismäßig wenig Kosten in den Phasen der Entwicklung. Es werden aber bereits bis zu 95% der späteren Kosten festgelegt. Daher sollte ein besonderes Augenmerk auf die Kostenbewertung bereits in den frühen Phasen erfolgen, denn hier ist zum einen die Möglichkeit am größten auf das Erreichen des Kostenziels hinzuwirken, zum anderen steigen die Kosten zur Beseitigung von Mängeln in den späteren Phasen stark an. In der Literatur wird hier häufig von der „rule of ten“ gesprochen [CF92], [Ehr09, S. 140], [EKL05, S. 12], [PBF+07, S. 711].

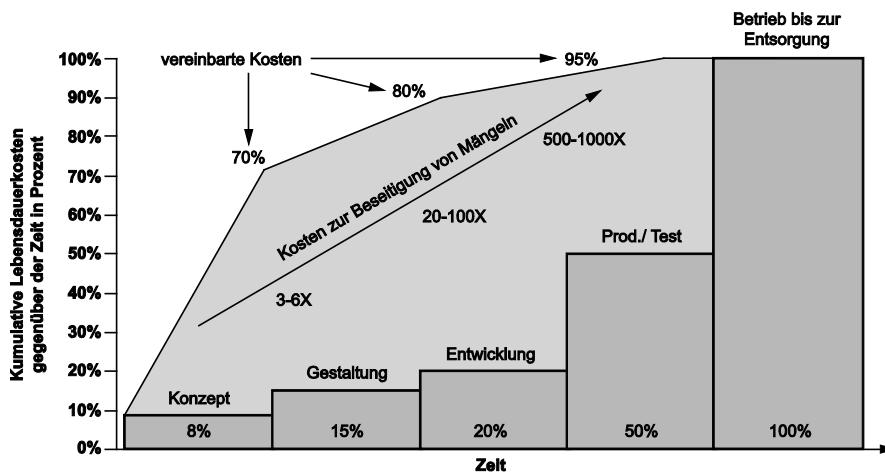


Bild 2-16: Kumulierte Lebensdauerkosten über die Zeit [INC12]

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Kategorien von Kosten sowie die Kostenrechnung näher erläutert.

2.5.1 Kategorien von Kosten

Die vom Produkt verursachten Kosten können unter einer Vielzahl von Perspektiven Beachtung finden. Im Hinblick auf eine kosteneffiziente Produktentwicklung sind vor allem die durch das Produkt verursachten Kosten relevant. Vor diesem Hintergrund hat sich die in Bild 2-17 dargestellte Gliederung der Kosten etabliert. Die Basis legen die **Herstellkosten**. Dies sind jene Kosten, die direkt dem Herstellprozess des Produktes zugeordnet werden können. Sie umfassen im Wesentlichen Material- und Fertigungskosten. Diese lassen sich wiederum durch Einzel- und Gemeinkosten zusammenfassen. Darüber hinaus existieren Kosten, die nicht direkt einem Produkt zugeordnet werden können. Sie werden über Zuschlagsätze kalkuliert. Zu ihnen zählen die Verwaltungs- und Vertriebskosten. Zusammen mit den Herstellkosten bilden sie die **Selbstkosten**. Die Selbstkosten gehen wiederum in die **Lebenslaufkosten** ein. Die Lebenslaufkosten sind jene Kosten, die dem Nutzer über die gesamte Lebensdauer des Produkts entstehen. Dazu zählen unter anderem der Kaufpreis, Instandhaltungs- und Wartungskosten, Energiekosten bis hin zu den Entsorgungskosten [EKL07, S. 5f.], [FKH+94]. Für die Kostenbewertung im Rahmen dieser Arbeit sind die Herstellkosten relevant.

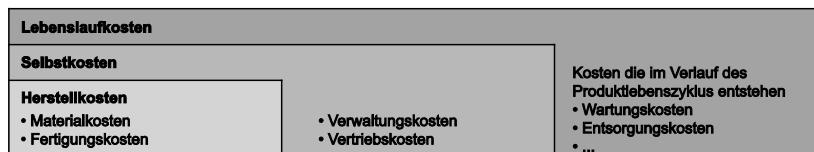


Bild 2-17: Produktbezogene Kosteneinteilung nach [EKL07, S. 161]

Herstellkosten lassen sich unter verschiedenen Aspekten gliedern. Es werden Einzel- und Gemeinkosten sowie fixe und variable Kosten unterschieden. Dabei handelt es sich nicht um unterschiedliche Kosten, sondern um eine Charakterisierung unter verschiedenen Aspekten [EKL07, S.412], [Vaß15, S. 16f].

Einzel- und Gemeinkosten

Die Kosten differenzieren sich nach ihrer Zurechenbarkeit zu einem Kalkulationsobjekt (z.B. Produkt oder Dienstleistung). **Einzelkosten** können dem Kalkulationsobjekt direkt zugeordnet werden, da sie durch das Kalkulationsobjekt verursacht werden. Nach VDI-Richtlinie 2234 „wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur“ werden Einzelkosten wie folgt definiert:

„Einzelkosten (direkte Kosten) können einer bestimmten Leistung direkt zugeordnet werden, da sie sich für ein bestimmtes Produkt ganz genau und mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erfassen lassen (z.B. Fertigungslohnkosten, Materialkosten, Maschinenstundenkosten).“ [VDI2234, S. 10]

Gemeinkosten können, im Gegensatz zu den Einzelkosten, nicht direkt dem Kalkulationsobjekt zugerechnet werden. Sie werden auch als indirekte Kosten bezeichnet. Sie werden mit Hilfe von prozentualen Zuschlagssätzen dem Kalkulationsobjekt zugeordnet. Nach VDI-Richtlinie 2234 werden Gemeinkosten wie folgt definiert:

„Gemeinkosten (indirekte Kosten) werden durch mehrere oder alle Leistungen gemeinsam verursacht und können so nicht unmittelbar einem speziellen Produkt zugeordnet werden. Sie lassen sich nur mit Hilfe von Verteilungsschlüsseln und Gemeinkostenzuschlagssätzen den einzelnen Produkten zurechnen. Solche Gemeinkosten können Materialgemeinkosten, Fertigungsgemeinkosten, Entwicklungsgemeinkosten, Verwaltungsgemeinkosten und Vertriebsgemeinkosten sein.“ [VDI2234, S. 10]

Fixe und variable Kosten

Eine weitere Untergliederung der Kosten wird häufig in fixe und variable Kosten vorgenommen. Dabei sind die **Fixkosten** unabhängig von der Ausbringungsmenge. Zu ihnen zählen z.B. Gehälter und Mieten. Mit steigender Ausbringungsmenge sinken die fixen Kosten pro Stück. Nach VDI-Richtlinie 2234 werden Fixkosten wie folgt definiert:

„Fixe Kosten fallen unabhängig von der Höhe der Beschäftigung für einen bestimmten Zeitraum in gleicher Höhe an (z.B. feste Gehälter, Mieten, Zinsen, Abschreibungen).“ [VDI2234, S. 10]

Im Gegensatz zu den fixen Kosten, ändern sich die **variablen Kosten** mit der Ausbringungsmenge. Sie fallen für jedes ausgebrachte Stück immer wieder an, wie z.B. Fertigungsmaterialkosten.

2.5.2 Kostenrechnung

Ein Teil eines Unternehmens beschäftigt sich mit der Kostenrechnung. Die Kostenrechnung hat das Ziel, den Güterverzehr wertmäßig abzubilden. Unter dem Güterverzehr wird der Verbrauch von Produktionsfaktoren (z.B. Arbeit und Material) verstanden. Die Kostenrechnung gliedert sich in die drei Teilgebiete Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung [VS12, S. 34f.]. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Kostenartenrechnung

Die Kostenartenrechnung erfasst alle Kosten, die bei der Beschaffung, Lagerung, Produktion und dem Absatz betrieblicher Leistungen (z.B. Produkt) im Unternehmen angefallen sind, bezogen auf eine Abrechnungsperiode. Es ist hilfreich, sich an einem Kostenplan zu orientieren, um alle Kosten erfassen zu können. Grundsätzlich werden Arbeits-, Material-, Kapital- und Fremdleistungskosten unterschieden. Eine Erweiterung um z.B. Wagniskosten ist durchaus üblich. Die Kostenartenrechnung bezieht ihre Zahlen aus der Buchhaltung oder aus weiteren Hilfsrechnungen wie der Lohn- und Gehaltsbuchhaltung [VS12, S. 61].

Kostenstellenrechnung

Aufbauend auf den Zahlen der Kostenartenrechnung kann die Kostenstellenrechnung durchgeführt werden. Sie gibt Aufschluss darüber, wo im Unternehmen – in welchem Unternehmensbereich – welche Kosten angefallen sind. Die Kostenstellen lassen sich nach betrieblichen Funktionen, nach Verantwortungsbereichen oder nach Betriebsräumen gliedern. Häufig findet die Gliederung nach betrieblichen Funktionen Anwendung. Daraus ergeben sich vier Hauptkostenstellen nach denen i.d.R. differenziert wird: Material-, Fertigungs-, Verwaltungs- und Vertriebskostenstelle. Zusätzlich besteht ihre Aufgabe in der Ermittlung der Kalkulationssätze, die das verursachungsgerechte Umlegen der Gemeinkosten auf einzelne Produkte ermöglichen. Die Kostenstellenrechnung ist das Bindeglied zwischen der vorhergehenden Kostenartenrechnung und der nachgelagerten Kostenträgerrechnung [Kae13, S. 50].

Kostenträgerrechnung

Die Kostenträgerrechnung weist die in der Kostenarten- und Kostenstellenrechnung erfassten Kosten einzelnen Kostenträgern und -trägergruppen zu. Die Kosten eines Kostenträgers (z.B. Produkt) setzen sich aus den Materialkosten, Fertigungskosten und Verwaltungs- und Vertriebskosten zusammen. Diese werden als Selbstkosten bezeichnet. Die Summe aus Material- und Fertigungskosten bildet die Herstellkosten. Die Kostenträgerrechnung erfüllt den Zweck der Preisermittlung, der Erfolgsüberprüfung für die Produktionsprogrammplanung sowie der Vergleichsrechnung zwischen verschiedenen Produkten. Dabei sind zwei Arten der Kalkulation zu unterscheiden: Die Vor- und Nachkalkulation. Bei der Vorkalkulation erfolgt die Berechnung vor der Leistungserstellung und basiert häufig auf Erfahrungswissen. Bei der Nachkalkulation werden die tatsächlich angefallenen IST-Kosten verwendet [EKL07, S. 418].

2.6 Handlungsfelder

Die zu entwickelnde Systematik bewegt sich in den drei Handlungsfeldern Konzipierung, Kostenbewertung und der Technologie MID.

Konzipierung: Speziell bei der Technologie gibt es starke Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem. Die Produktgestalt wird stärker als bei anderen Technologien von dem Produktionsverfahren determiniert. Dies führt zwangsläufig auch zu starken Abhängigkeiten hinsichtlich der Kosten. Denn es werden schon während der Konzipierung bewusst oder unbewusst viele Entscheidungen getroffen, die u.a. die Kosten des Produkts determinieren. Dazu zählt z.B. das Herstellverfahren, zu verwendende Werkstoffe und die grundsätzliche Struktur des Produkts. Bereits in dieser Phase liegen Informationen vor, die für die Kostenbewertung herangezogen werden können. Diese sind in der Regel nicht explizit vorhanden, sondern müssen adäquat dargestellt werden. Vielfach bleiben Aspekte unberücksichtigt, weil sie schlicht nicht im Fokus der Betrachtung liegen und Teil der Entwicklungsaufgabe sind. Diese müssen jedoch früh berücksichtigt werden, da die Kosten des Produkts wesentlich zum Erfolg oder Misserfolg beitragen. Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme und deren Produktionssystem kommen immer häufiger Spezifikationstechniken bzw. Modellierungssprachen zum Einsatz [GLL12, S. 18]. Mit ihrer Hilfe lassen sich Produkt und Produktionssystem anhand unterschiedlicher Aspekte beschreiben. Auch Informationen zur Kostenbewertung können aus der modelltechnischen Beschreibung gewonnen werden. Handlungsbedarf besteht darin, alle für die Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID relevanten Informationen frühzeitig und vollständig zu Verfügung zu stellen.

Kostenbewertung: Die Kostenbewertung erfolgt in aller Regel erst spät im Entwicklungsprozess wenn 95% der Kosten bereits festgelegt sind. Häufig wird dann erst festgestellt, dass Kostenvorgaben nicht erreicht werden können – kosten- und zeitintensive Änderungen sind die Folge. Methoden der Kostenbewertung haben zudem häufig vergleichenden Charakter, d.h. sie bewerten unterschiedliche Konzepte gegeneinander ohne zu überprüfen, ob das Kostenziel überhaupt erreicht wird. Handlungsbedarf ergibt sich für eine frühzeitige und umfassende Kostenbewertung.

Technologie MID: Die Technologie MID hat großes Potential für eine Kostenreduzierung. Dies ist zum einen darin begründet, dass die Prozesskette sehr kurz ist. Zum anderen begünstigt die für MID-Produkte typische Integralbauweise die Teilereduzierung und somit auch die Kostenreduzierung. Häufig wird die Technologie jedoch fälschlicherweise als Kostentreiber wahrgenommen. Bei der Betrachtung wird außer Acht gelassen, wie sich eine MID-Baugruppe in den Gesamtsystemkontext einfügt und wie sich die gesamte Prozesskette verändert. Handlungsbedarf besteht in einer ganzheitlichen Betrachtung der MID-Baugruppe sowie einer einheitlichen Basis für die Kostenvergleiche.

Bild 2-18 visualisiert die drei Handlungsfelder und zeigt auf, wo sich die *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf* wiederfindet: Im direkten Spannungsfeld aller drei Handlungsfelder.

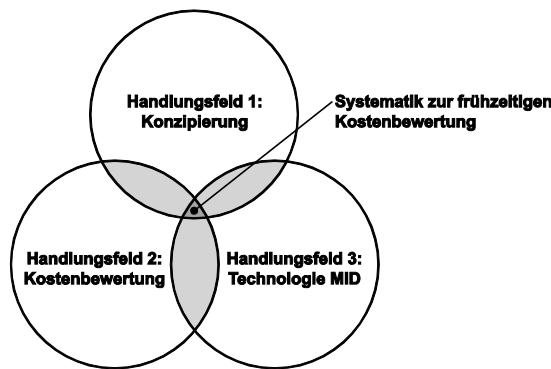


Bild 2-18: Handlungsfelder

2.7 Problemabgrenzung

Elektronisch-mechanische Baugruppen in der Technologie MID zeichnen sich durch eine hohe Funktionsdichte, Miniaturisierung sowie einer erhöhten Gestaltungsfreiheit aus [GF06, S. 3f.], [Fra13, S. 4], [FGG+11, S. 40]. Die Integralbauweise führt zu einer reduzierten Teilezahl und begünstigte reduzierte Fertigungskosten. Die kürzere Prozesskette der Technologie im Vergleich zu konventionellen Technologien fördert zusätzlich die Reduzierung der Fertigungskosten. Häufig werden die weitreichenden Potentiale der Technologie aber nicht korrekt bewertet. Die Technologie MID wird sogar häufig als Kostentreiber wahrgenommen. Diese Annahme beruht auf einer nicht korrekt durchgeführten Bewertung elektronisch-mechanischer Baugruppen. Eine umfassende Kostenbewertung mechatronischer Systeme führt zu drei wesentlichen **Nutzenpotentialen**:

- **Entscheidungsunterstützung:** Von zentraler Bedeutung ist die Fähigkeit Lösungskonzepte korrekt bewerten zu können. Aufgrund vielfältiger Wechselwirkungen, Restriktionen und der hohen Komplexität elektronisch-mechanischer Baugruppen ist die Bewertung nicht immer einfach vorzunehmen. Hier bietet aufbereitetes Wissen eine weitreichende Entscheidungsunterstützung bei der Bewertung und Auswahl unterschiedlicher Lösungskonzepte.
- **Kostenbewertung:** Kosten sind ein entscheidender Faktor für den späteren Markterfolg eines Produktes. Werden die Kosten nicht korrekt bestimmt, kann dies zu einem Verlust für die Unternehmung führen. Eine frühzeitige und umfassende Kostenbewertung für Lösungskonzepte ist essentiell, um die absolute Vorteilhaftigkeit (vgl. Kap. 2.1.2) bestimmen zu können.
- **Vergleichbarkeit:** In der Regel werden unterschiedliche Konzepte während der Entwicklung verfolgt, die nach und nach im Entwicklungsprozess verworfen werden. Bei der Entscheidung für oder gegen ein Konzept ist es essentiell, dass die Konzepte überhaupt miteinander vergleichbar sind. Dafür ist eine gemeinsame Basis notwendig. Diese ist früh in der Entwicklung zu definieren.

Die Entscheidung für oder gegen ein Lösungskonzept benötigt weitreichende und valide Informationen bereits in der frühen Phase des Entwurfs. Bereits frühzeitig werden 70% der Produkt- und Produktionskosten festgelegt [Ehr07, S. 140]. Diese korrekt zu erfassen bringt Herausforderungen mit sich. Basierend auf der „rule of ten“ können in der frühen Phase der Entwicklung noch relativ einfach und kostengünstig Anpassungen am Produktkonzept vorgenommen werden, um etwaige Kostenziele erreichen zu können. Drei wesentliche **Herausforderungen** bei der Kostenbewertung sind dabei hervorzuheben:

- **Betrachtungsgegenstand:** Elektronisch-mechanische Baugruppen sind in ein Gesamtsystem eingebettet. Es bestehen Schnittstellen zwischen den Baugruppen. Sie sind mechanischer, elektronischer oder informationstechnischer Art. Sie können jedoch auch eine Mischform z.B. elektromechanischer Art sein. Zudem erfüllen die Baugruppen definierte Funktionen und müssen schlussendlich auch produziert werden. Die Eigenschaften der Baugruppe die für die Kostenbewertung betrachtet werden, haben einen starken Einfluss auf das Resultat. Die Definition des Betrachtungsgegenstandes stellt also im Wesentlichen die Weichen für die korrekte Bewertung eines oder mehrerer Konzepte.
- **Bewertungsgrundlage:** Aufbauend auf dem Betrachtungsgegenstand muss eine einheitliche Basis für die Kostenbewertung entstehen – die Bewertungsgrundlage. Es wird Wissen über das Produkt, das Produktionssystem, die Kostenzusammensetzung sowie die Technologie benötigt. Die Bewertungsgrundlagen unterschiedlicher Lösungskonzepte müssen einen einheitlichen Informationsgehalt aufweisen. Der Informationsgehalt setzt sich aus der Güte der Informationen und der Menge bzw. dem Umfang der Informationen zusammen [FG13, S. 382].
- **Fehlende Methodik:** Die heute etablierten Methodiken tragen der Kostenbetrachtung nicht ausreichend Rechnung. Sie fokussieren in der Regel nur einen bestimmten Aspekt. Sie unterstützen die Entwickler nur unzureichend. Doch gerade bei der Kostenbewertung von mechatronischen Systemen in der Technologie MID ist eine systematische Vorgehensweise und ganzheitliche Betrachtung unabdingbar.

Es besteht somit **Bedarf** für eine *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID)*. Sie soll in der frühen Phase der Produktentstehung bei der Kostenbewertung unterstützen und sich in das Vorgehen zur Entwicklung mechatronischer Systeme einfügen. Im Sinne der Definition in Kapitel 2 sollte eine Systematik einen Leitfaden für das Vorgehen sowie Hilfsmittel in Form von Methoden und Wissen bereitstellen. Die Systematik sollte folgende Bestandteile umfassen:

- **Strukturiertes Vorgehensmodell:** Bestandteil der Systematik muss ein Vorgehensmodell sein, das die frühzeitige Kostenbewertung mechatronischer Systeme systematisiert. Das Vorgehen gliedert sich in Phasen und Meilensteine. Den Phasen sollen die notwendigen Tätigkeiten und entsprechende Hilfsmittel zugeordnet

sein, die durchzuführen bzw. einzusetzen sind. Eine idealtypische Darstellung ist ausreichend.

- **Kostenmodell:** Das Kostenmodell ist der zentrale Bestandteil der Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf. Das Kostenmodell bietet für alle zu betrachtenden Aspekte der Lösungskonzepte eine Kostenstruktur. Ferner gibt es an, wie die einzelnen Kosten der Bestandteile in die Kostenbewertung einfließen. Die Inhalte des Kostenmodells sind so gestaltet, dass jeder Anwender in der Lage ist, die Kostenstrukturen selbst zu definieren und z.B. um unternehmensinterne Kalkulationssätze zu erweitern.
- **Modellierungssprache:** Die Kostenbewertung benötigt eine aussagekräftige und einheitliche Grundlage auf dessen Basis die Bewertung durchgeführt werden kann. Es sollte nach Möglichkeit auf eine bestehende Modellierungssprache zurückgegriffen werden, welche um benötigte Aspekte erweitert wird. Insbesondere eine funktionale, eine strukturelle und eine produktionstechnische Sicht sind unerlässlich.
- **Techniken und Wissen zur Entscheidungsunterstützung:** Produkt- und Produktionssystemeigenschaften bestimmen maßgeblich die Herstellkosten. Um diese bewerten zu können, ist zum einen Wissen notwendig, welches dem Entwickler zur Verfügung gestellt werden muss. Zum anderen sind Techniken notwendig, die maßgebliche Eigenschaften in Bezug auf die entstehenden Kosten des Produkts und Produktionssystem identifizieren helfen.

2.8 Anforderungen an die Systematik

Aus der Problemanalyse resultieren folgende Anforderungen an eine *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Modular Interconnect Devices (MID)*:

A1) Betrachtung der gesamten Prozesskette: Im Rahmen der Kostenbewertung müssen alle relevanten Prozessschritte innerhalb der Prozesskette betrachtet werden. Hierzu müssen die relevanten Prozessschritte zunächst identifiziert werden. Die relevanten Prozessschritte sind individuell für jede Entwicklung und beschränken sich nicht ausschließlich auf die MID-Prozesskette sondern können weitere vor- und nachgelagerte Prozessschritte (z.B. Montage) umfassen.

A2) Definition eines gemeinsamen Betrachtungsgegenstandes: Für die Kostenbewertung muss ein Betrachtungsgegenstand definiert werden, der für alle Lösungskonzepte gleich ist. Nur so kann die Vergleichbarkeit der Resultate sicher gestellt sein. Dieser ist zu Beginn der Kostenbewertung zu definieren. Er muss alle relevanten Aspekte des Produktes und Produktionssystems sowie Kostenziele unmittelbar oder mittelbar enthalten.

A3) Bereitstellen einer einheitlichen Bewertungsgrundlage: Die Basis auf der die Bewertung durchgeführt wird muss Informationen für die Bewertung der Kosten enthalten.

Es müssen alle relevanten Aspekte abbildungbar sein. Dazu zählen insbesondere Informationen zur Erhebung der Kosten auf Seiten des Produkts sowie Produktionssystems.

A4) Bereitstellen eines Kostenmodells: Das Kostenmodell muss alle relevanten Kostenparameter enthalten und in einen Kontext bringen. Es muss sowohl Produkt- als auch Produktionskosten berücksichtigen. Das Kostenmodell muss sich individualisieren lassen um den Anforderungen des Anwenders zu entsprechen. Die Kostenstruktur wird durch unterschiedliche Parameter beeinflusst. Nach VDI-Richtlinie 2235 sind die produktseitigen Haupteinflussgrößen: Prinzipielle Lösung, Baugröße, Werkstoff und Stückzahl. Diese Faktoren haben großen Einfluss auf die Fertigungsverfahren und somit auf die Fertigungs- und Materialkosten [VDI2235, S. 11]. Für die Kostenbewertung müssen die oben genannten Faktoren betrachtet werden.

A5) Bewerten der absoluten Vorteilhaftigkeit: Für das jeweilige Lösungskonzept muss die absolute Vorteilhaftigkeit im Hinblick auf die vorgegebenen Kostenziele bewertet werden. Ein relativer Vergleich zwischen mehreren Varianten reicht nicht aus, da nicht sichergestellt werden kann, ob die vorgegebenen Kostenziele erreicht wurden. Daher sind sowohl Zielkosten als auch die kalkulierten Kosten zu ermitteln, zu bewerten und Handlungsempfehlungen zu geben.

A6) Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung: Das in der Systematik enthaltene Wissen über Tätigkeiten, Methoden und Richtlinien zur Kostenbewertung muss für den Anwender einfach zugänglich sein. Die Systematik soll daher durch ein Konzept zur Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung ergänzt werden. In diesem soll dargelegt werden, wie das Wissen aufbereitet, abrufbar und wie der Anwender bei der Kostenbewertung aktiv unterstützt werden kann.

A7) Bereitstellen von technologierelevantem Wissen und Methoden: Die Anwender müssen durch geeignete Hilfsmittel bei der Durchführung der Bewertung unterstützt werden. Hierzu muss Wissen in geeigneter Form abgelegt und repräsentiert werden. Dabei sind vor allem Aspekte zu berücksichtigen, die für eine Kostenbewertung relevant sind (kalkulierte Kosten, Zielkosten, Restriktionen, etc.).

A8) Systematische Vorgehensweise: Eine systematische Vorgehensweise sorgt dafür, dass alle notwendigen Schritte durchlaufen und nichts übersprungen oder unzulässig vereinfacht wird. Die Systematik muss ein Vorgehensmodell enthalten, das einen zielgerichteten Leitfaden für die Kostenbewertung der Technologie MID bietet. Das Vorgehen muss sich in das etablierte Vorgehen zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID eingliedern.

A9) Orientierung am Systementwurf: Im Rahmen des Systementwurfs etablierte sich insbesondere die Generierung erster Lösungskonzepte in Form von Wirkstrukturen auf Basis zu erfüllender Funktionen. Die Systematik muss sich in dieses Vorgehen integrieren und speziell die frühen Phasen der Entwicklung fokussieren. Ihre Bestanteile sind entsprechend auszuarbeiten.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden Systematiken, Methoden und Werkzeuge zur Bewertung mechatronischer Systeme und MID-Baugruppen untersucht. Des Weiteren werden dedizierte Hilfsmittel im Kontext MID betrachtet. In Kapitel 3.1 werden Methoden zur Produktbewertung diskutiert. In Kapitel 3.2 werden Methoden zur Kostenbewertung vorgestellt. In Kapitel 3.3 werden dedizierte MID-Methoden und MID-Werkzeuge untersucht. In Kapitel 3.4 werden Modellierungstechniken/-sprachen eingehend untersucht. In Kapitel 3.5 werden die Ansätze anhand der ermittelten Anforderungen aus Kapitel 2.8 bewertet und der Handlungsbedarf abgeleitet.

3.1 Methoden zur Produktbewertung

Im Rahmen der Entwicklung werden Produkte bewertet. Es existiert eine Vielzahl an Bewertungsverfahren mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Im Folgenden werden die bedeutendsten kurz charakterisiert und bewertet.

3.1.1 Paarweiser Vergleich

Der paarweise Vergleich ist eine einfache und universell einsetzbare Methode mit dem Ziel unter den vorliegenden Konzepten die vorteilhafteste zu identifizieren. Es werden stets zwei Lösungsalternativen in Bezug auf ein definiertes Bewertungskriterium mit einander verglichen. Es können mehrere Varianten verglichen werden, jedoch immer nur zwei im direkten Vergleich. Bild 3-1 zeigt einen paarweisen Vergleich mit drei Varianten. Die Lösungen werden in einer Matrixstruktur jeweils in Spalte und Zeile eingetragen. Jede Matrix betrachtet ein Kriterium. In das Feld der Matrix wird jene Variante eingetragen, die im direkten Vergleich in Bezug auf das betrachtete Kriterium vorteilhafter ist. Ein Beispiel: Variante A wiegt 1,0 kg, Variante B wiegt 1,3 kg. Das betrachtete Kriterium sei geringes Gewicht. Im direkten Vergleich ist Variante A besser geeignet und ist in das Matrixfeld einzutragen. Sind beide Varianten gleichwertig, wird das Feld frei gelassen. Die Bewertung wird oberhalb der Diagonalen eingetragen. Anschließend werden die Summen über Zeilen und Spalten gebildet. Es ergibt sich die Anzahl der Präferenzen. Die Zahlenwerte werden je Variante addiert. Dies ist die Summe des Vergleichs. Die Variante mit der höchsten Summe gilt als vorteilhaft. Die Methode eignet sich gut für kleine Entscheidungsprobleme, sowohl in Bezug auf die Anzahl der Varianten als auch der Kriterien, die zu bewerten sind. Bei größeren Entscheidungsproblemen steigt der Aufwand im beträchtlichen Maße an [FG13, S. 388ff.], [Lin09, S. 289].

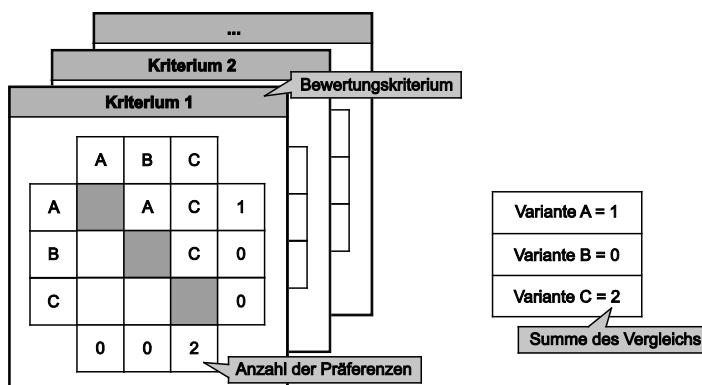


Bild 3-1: Paarweiser Vergleich für Kriterien nach [FG13, S. 389]

Bewertung: Ein Vergleich unterschiedlicher Lösungskonzepte ist mit dieser Methode gut möglich. Die Kriterien die bewertet werden sollen sind frei definierbar. Die Methode stellt jedoch keine Bewertungsgrundlage zur Verfügung. Aussagen über die Güte der Eignung bleiben aus, da nur die Vorteilhaftigkeit im direkten Vergleich betrachtet wird. Ob die Varianten die gestellten Anforderungen überhaupt erfüllen, wird nicht überprüft. Aufgrund des Fehlens der Produkt- und Produktionssystembeschreibung im Rahmen der Methode werden die Anforderungen A1, A2 und A3 nicht erfüllt. Ferner fehlt es an einem Kostenmodell (A4). Anforderung A5 kann nur teilweise erfüllt werden, da zwar Varianten anhand definierter Kriterien verglichen werden, jedoch erfolgt lediglich eine relative Bewertung im Hinblick auf ein Kriterium. Anforderung A6 und A7 können aufgrund von fehlenden Hilfsmitteln in Form Wissensdokumenten nicht erfüllt werden. In der Literatur finden sich Beschreibungen wie die Methoden eingesetzt werden soll. Ein dediziertes Vorgehensmodell ist jedoch nicht vorhanden. Anforderung A8 wird daher nur teilweise erfüllt. Die Methode ist universell im Systementwurf einsetzbar, fokussiert aber nicht die Bewertung von Lösungskonzepten in der Entwicklung. Der Forderung nach der Orientierung am Systementwurf (A9) wird nur teilweise nachgekommen.

3.1.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse wurde Mitte der 1970er Jahre von ZANGEMEISTER und BECHMANN entwickelt. Im Laufe der Zeit sind viele Varianten entstanden. Die Nutzwertanalyse findet in vielfältigen Bereichen Anwendung. Sie dient zur Bewertung des Nutzens unterschiedlicher Handlungsalternativen. Zumeist wird die Nutzwertanalyse auf komplexe Entscheidungsprobleme angewandt. Ihr Ablauf ist wie folgt strukturiert: Das Gesamtproblem wird fragmentiert, also in Teilprobleme zerlegt, mit dem Ziel das Entscheidungsproblem zu vereinfachen. Bild 3-2 zeigt beispielhaft die Bewertung von Systemvarianten mittels Nutzwertanalyse. Die Teilprobleme oder -aspekte werden anhand von Kriterien bewertet. Sie bilden das sog. Zielsystem. Es gibt zahlreiche Varianten der Nutzwertanalyse. In der Regel werden die Kriterien von 0 (schlecht) bis 10 (sehr gut) bewertet. Zudem können

die Einzelkriterien gewichtet werden. Hierzu wird häufig eine Einstufung der Bewertergruppe³ vorgenommen oder aber der paarweise Vergleich genutzt. Beim paarweisen Vergleich werden jeweils zwei Kriterien verglichen und das eine als wichtiger und das andere Kriterium als unwichtiger bewertet (vgl. Kap. 3.1.1). Aus den Bewertungssummen lässt sich so die Gewichtung errechnen. Die Kriterien können sowohl quantitativ als auch qualitativ sein. Die Bewertung des Kriteriums wird anschließend mit der Gewichtung multipliziert und ergibt den Nutzwert für ein Kriterium. Der Nutzwert jedes Kriteriums wird aufsummiert. Die Summe bildet den Nutzwert für eine Alternative. Die Alternative mit dem höchsten Nutzwert ist die vorteilhaftigste und ist auszuwählen [FG13, S. 390], [GP14, S. 418], [Kue14, S.1], [Zan76].

Bewertungs-kriterien (Zielssystem)	Ge-wich-tung [in %]	Systemvarianten			
		System 1		System 2	
		Bew.	Nutzw.	Bew.	Nutzw.
1 Einmalige Kosten	(35)				
1.1 Hardware	10	3	0,30	5	0,50
1.2 Software	15	6	0,90	7	1,05
1.3 Einführung	10	7	0,70	8	0,80
2 Laufende Kosten	20	5	1,00	9	1,80
3 Akzeptanz	10	7	0,70	3	0,30
4 Funktionalität	15	3	0,45	9	1,35
5 Integrationsfähigkeit	10	4	0,40	5	0,50
6 Techn. Attraktivität	10	9	0,90	6	0,60
	100		5,35		6,90

Bild 3-2: Bewertung von Systemvarianten mittels Nutzwertanalyse [GP14, S. 418]

Bewertung: Die Methode ist vielfältig einsetzbar und es existiert eine Vielzahl an Varianten. Die Bewertung wird durch eine Bewertergruppe getroffen, die die Entscheidung entweder im Kollektiv oder unabhängig voneinander treffen. Die Nutzwertanalyse stellt den Rahmen für die Bewertung bereit, in dem Sie eine Entscheidung anhand von gewichteten Kriterien herbeiführt. Eine Bewertungsgrundlage für das Problem wird jedoch nicht zur Verfügung gestellt. In kritischen Fällen kann so lediglich eine Vermutung über die Ausprägung eines Kriteriums getroffen werden. Ferner wird nicht überprüft, inwieweit die vorgenommene Bewertung konsistent ist. Aufgrund der fehlenden Beschreibung des Produkt- und Produktionssystems werden die Anforderungen A1-A3 nicht erfüllt. Ferner werden im Rahmen der Nutzwertanalyse keine Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, sodass die Anforderungen A4, A6 und A7 ebenfalls nicht erfüllt werden. Da bei der Nutzwertanalyse die Variante mit der höchsten Punktzahl am vorteilhaftesten ist, jedoch keine

³ Eine Bewertergruppe setzt sich aus Experten zusammen, die gemeinsam oder getrennt voneinander die Bewertung durchführen. Es wird empfohlen, dass die Gruppe aus mehreren Personen besteht, die aus unterschiedlichen Bereichen stammen, um ein breitgefächertes und interdisziplinäres Meinungsbild schaffen zu können [FG13, S. 382f.].

Aussage über die absolute Vorteilhaftigkeit getroffen wird, kann diese gestellte Anforderung (A5) nur teilweise erfüllt werden. Zudem wird zwar ein strukturgebender Rahmen zur Verfügung gestellt, aber auch hier fehlt es an einem dedizierten Vorgehensmodell. Anforderung 8 wird nur teilweise erfüllt. Die Methode ist im Systementwurf einsetzbar, ist aber nicht für diesen Einsatz entwickelt worden. Eine Orientierung am Systementwurf (A9) ist somit nur teilweise gegeben.

3.1.3 Analytic Hierarchy Process

Der Analytic Hierarchy Process (AHP) wurde von dem amerikanischen Wissenschaftler THOMAS SAATY entwickelt und stellt ein Verfahren zur Entscheidungsunterstützung dar. Der AHP ist vor allem im angelsächsischen Bereich stark verbreitet. Wie bei der Nutzwertanalyse ist das Ziel des AHP die Lösung komplexer Entscheidungsprobleme. Das Problem wird analog zur Nutzwertanalyse fragmentiert. Zur Bewertung werden die Ziffern 1 bis 9 sowie deren Kehrwerte (1/9, etc.) verwendet. Dabei steigt die Wichtigkeit relativ zwischen zwei Entscheidungsalternativen mit dem Zahlenwert an: 1 (gleich wichtig) bis 9 (sehr viel wichtiger). Analog dazu sinkt die Wichtigkeit mit den Kehrwerten: z.B. 1/3 (etwas unwichtiger) bis 1/9 (sehr viel unwichtiger). Die Ergebnisse der Vergleiche werden in Matrixform notiert. Zudem gelten die fünf Axiome des AHP:

- 1) Axiom 1 (Reziprozität) besagt, dass jede Matrix von Paarvergleichen reziprok sein muss: $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$.
- 2) Axiom 2 (Hierarchie) definiert, dass das Entscheidungsproblem durch eine Hierarchie darstellbar sein muss.
- 3) Das dritte Axiom (Vergleichbarkeit) besagt, dass alle Alternativen bzgl. der Kriterien bewertbar sein müssen.
- 4) Axiom 4 (Vollständigkeit) drückt aus, dass alle relevanten Kriterien für die Entscheidungsfindung in der Hierarchie abgebildet sein müssen.
- 5) Das fünfte Axiom (Abhängigkeit) besagt, dass Kriterien einer höheren Ebene nur von Kriterien einer tieferen Ebene abhängig sind, nicht aber umgekehrt.

Zusätzlich zur Bewertung wird eine Konsistenzüberprüfung durchgeführt. Dafür hat SAATY den sog. Consistency Index (C.I.) definiert. Er besagt, wie konsistent der paarweise Vergleich ist. Die Einzelwerte für jede Alternative werden aufsummiert. Die Alternative mit der größten Summe ist die vorteilhafteste und ist auszuwählen. Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Sie besagt, wie robust das Ergebnis gegenüber einer Änderung ist, bzw. wie sensibel es auf z.B. eine Änderung der Kriteriengewichtung reagiert. Ein Ergebnis gilt als robust, wenn marginale Änderungen keinen Einfluss auf die Rangfolge der Alternativen haben [Saa80], [SV12].

Bewertung: Die Methode ist in vielen Bereichen einsetzbar. Die Bewertung wird durch eine Gruppe oder Einzelpersonen vorgenommen. Dabei wird vor allem die Wichtigkeit der Alternativen bezugnehmend auf jeweils ein Kriterium bewertet. Dabei wird allerdings nicht betrachtet, wie gut das Kriterium überhaupt von der jeweiligen Alternative erfüllt wird. Die Methode stellt zudem keine Bewertungsgrundlage zur Verfügung. Die Durchführung der Methode ist jedoch relativ aufwändig, da für jedes Kriterium ein paarweiser Vergleich aller Alternativen durchgeführt werden muss. Ein weiterer Kritikpunkt, der in der Literatur häufig zu finden ist, ist das Phänomen des „rank reversals“. Es besagt, dass sich die Präferenzreihenfolge, nach Hinzufügen einer weiteren Alternative, ändert. Auch bei dieser Methode gilt: Aufgrund der fehlenden Produkt- und Produktionssystembeschreibung werden die Anforderungen A1, A2 und A3 nicht erfüllt. Ferner fehlt ein Kostenmodell sowie Hilfsmittel zur Bewertung. Anforderung A4, A6 und A7 können nicht erfüllt werden. Die weiteren Anforderungen werden teilweise erfüllt: Analog zur Nutzwertanalyse gilt jene Variante als vorteilhaft, welche die größte Summe nach der Bewertung aufweist. Eine Überprüfung, ob die gestellten Anforderungen erfüllt werden, bleibt aus. Auch fehlt es bei dieser Methode an einem Vorgehensmodell (A8). Ein Fokus auf die frühe Entwicklungsphase ist nicht gegeben (A9).

3.1.4 Wertanalyse nach VDI-Richtline 2800 (Value Management)

Die Wertanalyse (WA) wurde um 1947 in den USA entwickelt. Ihr Fokus liegt auf der Verbesserung existierender Produkte und der Entwicklung neuer Produkte, aber auch auf der Verbesserung von Verwaltungsabläufen [VDI2800-1, S. 2]. Im Mittelpunkt der Analyse stehen die Kosten. Dabei werden diejenigen Kosten betrachtet, die weder der Qualität, dem Gebrauch, der Lebensdauer, der Optik oder dem Verkauf nützen. Die Wertanalyse ist eine übergeordnete Systematik, die ein Methodenportfolio zur Verfügung stellt, mit dem Ziel Produkte zu verbessern. Dabei existieren zwei Stoßrichtungen: Die Kosten reduzieren, wobei die Anforderungen immer noch erfüllt werden, oder die Nutzenmaximierung bei gleichbleibenden Kosten. Innerhalb eines WA-Projektes können vielfältige Methoden wie Quality Function Deployment (QFD), Nutzwertanalyse, Return-On-Investment-Analyse (ROI), etc. zum Einsatz kommen [VDI11, S. 40]. In der VDI-Richtlinie 2800 ist sie wie folgt definiert:

„Wertanalyse (WA) wird definiert als ein organisierter und kreativer Ansatz, der einen funktionsorientierten und wirtschaftlichen Gestaltungsprozess mit dem Ziel der Wertsteigerung eines WA-Objekts zur Anwendung bringt.“ [VDI2800-2, S. 2]

Ein WA-Objekt wird als entstehender oder bestehender Funktionsträger verstanden, der im Rahmen der Wertanalyse Betrachtung finden soll. Dies sind z.B. Produkte, Dienstleistungen oder Organisationsabläufe [Con13, S. 439].

Die WA-Methodik ist gekennzeichnet durch [Fis08, S. 87], [VDI11, S. 27]:

Funktionsbezogene Betrachtungsweise: Bei der Funktionsbeschreibung, hat sich das Grundprinzip der Konstruktionslehre mittels Substantiv-Verb-Kombination durchgesetzt, um eine lösungsneutrale Beschreibung des WA-Objekts zu erhalten [Con13, S. 439].

Bereichsübergreifende Teamarbeit: An der Projektdurchführung sind viele Fachleute aus unterschiedlichen Disziplinen beteiligt. Die Teamzusammensetzung muss der Interdisziplinarität Rechnung tragen und ermöglicht so den Konsens über Funktionen, Lösungen und Kosten zu erhalten [VDI2800-1, S. 12].

Systematisches Vorgehen: Für die Durchführung der Wertanalyse wurde das ursprüngliche Vorgehensmodell erweitert. Im Zuge der Neuauflage der VDI-Richtlinie wurde das ursprüngliche sechs-phäsiige Vorgehen um weitere vier Phasen ergänzt. Bild 3-3 zeigt das erweiterte Vorgehen. Bei dem Durchlaufen der Phasen sind zwei Regeln zu beachten: Es darf kein Arbeitsschritt ausgelassen werden und die Sequenz der Arbeitsschritte muss eingehalten werden [VDI2800-1, S. 20].

Das Vorgehen gliedert sich in zehn Phasen und ist in Bild 3-3 dargestellt. In **Phase 0** wird das Projekt vorbereitet. Es erfolgt die Klärung, ob das vorliegende Problem sinnvoll mit der Wertanalyse zu bearbeiten ist. In **Phase 1** erfolgt die Projektdefinition. Sie ist Voraussetzung für einen gesicherten Projektablauf und gute Ergebnisse. Die Projektdefinition ist klar und eindeutig zu formulieren. Die Bewertungskriterien sind soweit wie möglich zu quantifizieren, mindestens aber zu qualifizieren. In **Phase 2** werden die Arbeitspakete definiert sowie das benötigte Fachwissen und Ressourcen. Dies wird in einem Ablaufplan dargestellt. In **Phase 3** wird die Ausgangssituation des WA-Objektes analysiert. In der darauf folgenden **Phase 4** wird das WA-Objekt abstrahiert und in Form von Funktionen beschrieben. Kundenbedürfnisse werden in nutzerbezogene Funktionen umgewandelt und diesen produktbezogene Funktionen zugeordnet. So soll ein möglichst breites Lösungsfeld erschlossen werden. **Phase 5** bildet den Schwerpunkt der Methode. Es kommen Ideenfindungstechniken sowie Informationsquellen zum Einsatz, um möglichst hochwertige Lösungsideen zu erhalten. In **Phase 6** werden die Lösungsideen bewertet und Lösungsansätze formuliert. Während **Phase 7** werden schrittweise ganzheitliche Lösungskonzepte entwickelt sowie Vor- und Nachteile herausgestellt. In **Phase 8** werden die Lösungen anhand der zuvor definierten Kriterien bewertet und ausgewählt. **Phase 9** schließt das Vorgehen ab. Die Umsetzung der erarbeiteten Lösung in ein reales Produkt wird überwacht. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse dokumentiert.

Arbeitsschritte: VDI 2800, 2010	
0	Projekt vorbereiten – Machbarkeit untersuchen
1	Projekt definieren
2	Projekt vorbereiten – Projektarbeit freigeben
3	Umfassende Daten über das Projekt sammeln
4	Funktionen, Kosten, Detailziele festlegen
5	Lösungsideen sammeln und entwickeln
6	Lösungsideen bewerten
7	Ganzheitliche Vorschläge entwickeln – Lösung auswählen
8	Lösungen präsentieren – Entscheidung herbeiführen
9	Lösungen realisieren – Ergebnis dokumentieren

Bild 3-3: Vorgehensmodell bei der Wertanalyse nach VDI-Richtlinie 2800 [VDI2800-1, S. 20]

Bewertung: Die Methode fokussiert die systematische Verbesserung von WA-Objekten (z.B. Produkte oder Prozesse). Zu diesem Zweck stellt sie ein Methodenportfolio sowie ein Vorgehensmodell bereit. Die Bewertung bezieht sich vorwiegend auf Funktionen und Kosten. Die integrative Betrachtung von Produkt und zugehörigem Produktionssystem ist Gegenstand der Betrachtung, jedoch nicht unter technologischen Gesichtspunkten. Genauso bleibt eine modelltechnische Abbildung von Produkt und Produktionssystem unberücksichtigt. Die Wertanalyse stellt ein Vorgehensmodell zur Verfügung, sodass Anforderung A8 voll erfüllt wird. Auch bei dieser Methoden werden unterschiedliche Varianten betrachtet. Es erfolgt jedoch lediglich eine relative Bewertung. Anforderung A5 kann daher nur teilweise erfüllt werden. Es fehlt der Methode an einer modelltechnischen Beschreibung von Produkt und Produktionssystem sowie ein Kostenmodell und technologierelevantes Wissen. Die weiteren Anforderungen (A1- A4, A6 und A7) an die Systematik können somit nicht erfüllt werden. Eine Orientierung am Systementwurf (A9) wird ebenfalls nicht vorgenommen.

3.2 Methoden zur Kostenbewertung

Die Kosten stellen ein wesentliches Kriterium bei der Bewertung von Produkten während der Entwicklung dar. Kostenziele müssen erfüllt werden. Um dies gewährleisten zu können, wurden Methoden entwickelt, um eine Kostenbewertung durchzuführen. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Methoden vorgestellt und bewertet.

3.2.1 Vereinfachte Kostenermittlung nach VDI-Richtlinie 2225

Die VDI-Richtlinie 2225 – *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren* – besteht aus Blatt 1 bis Blatt 4 und weist enge Zusammenhänge zu den VDI-Richtlinien 2234 „Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur“ und 2235 „Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren“ auf [VDI2225-1, S. 2]. Die VDI-Richtlinie 2225 fasst verschiedene Methoden zusammen. Sie erleichtern dem Konstrukteur die Produktbewertung nach technischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten [VDI2225-1, S. 2]. **Blatt 1** und **Blatt 2** befassen sich schwerpunktmäßig mit der Ermittlung von Material- und Herstellkosten. Basis für die Ermittlung bildet eine maßstäbliche Skizze oder die vorhandene Stückliste. Es werden die Bruttowerkstoffkosten ermittelt. Hierzu werden die Bruttovolumina aller Einzelteile der Eigenfertigung bestimmt. Das Bruttovolumen setzt sich aus dem Nettovolumen (späteres Bauteil) und dem Verschnitt zusammen. Zur Bestimmung der Bruttowerkstoffkosten wird auf eine Kennzahl, die Relativkostenzahl, zurückgegriffen [VDI2225-1, S. 3]. Die Kennzahl bezieht sich auf einen Grundwerkstoff (USt 37-2). Mit der Kennzahl werden die kostenmäßigen Veränderungen zum Grundwerkstoff ausgedrückt. Kostet ein Werkstoff z.B. doppelt so viel, ist die Kennzahl 2. Hiermit soll den werkstoffpreisbezogenen Schwankungen entgegengewirkt werden. Es gilt die Annahme, dass die Relativkosten zwischen den Werkstoffen konstant sind. D.h. für die Kalkulation muss lediglich der Preis des USt 37-2 bekannt sein. Für den eingesetzten Werkstoff kann dann aus dem Tabellenwerk (VDI 2225 Blatt 2) die entsprechende Relativkostenzahl ausgewählt werden. In Blatt 2 der VDI-Richtlinie 2225 sind Relativkostenzahlen für über 800 Werkstoffe für verschiedene Bauteilgrößen (klein, mittel, groß) hinterlegt [VDI2225-2, S. 3]. Die ermittelten Bruttowerkstoffkosten werden anschließend mit dem Werkstoffgemeinkostenzuschlagssatz multipliziert. Daraus ergeben sich die Materialkosten [VDI2225-1, S. 3]. Für die anschließende Ermittlung der Herstellkosten ist der Quotient zwischen Materialkosten und Materialkostenanteil zu bilden. Der Wert für den Materialkostenanteil kann dem Tabellenwerk aus der VDI 2225 Blatt 2 entnommen werden. Dieser ist dort für verschiedene Erzeugnistypen (z.B. Krane, Staubsauger oder Wanduhren) hinterlegt [VDI2225-2, S. 36f.].

Blatt 3 der VDI-Richtlinie 2225 beschreibt die technisch-wirtschaftliche Bewertung. Die Bewertungsergebnisse werden mittels Stärkediagramm visualisiert. In dem Diagramm wird technische (x-Achse) und wirtschaftliche Wertigkeit (y-Achse) einer Variante dargestellt. Zur Bewertung wird eine Punkteskala von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut) vorgeschlagen. Als Bezugsgröße wird eine ideale Lösung angenommen, welche alle Bewertungsmerkmale ideal erfüllt. Die technische Wertigkeit wird aus dem Quotient von dem Punktewert der Variante und dem maximal erreichbaren Punktewert der fiktiven Ideallösung gebildet [VDI2225-1, S. 4]. Maßgeblich für die wirtschaftliche Bewertung sind die Herstellkosten. Für die wirtschaftliche Wertigkeit gilt: Zunächst wird der kleinste Marktpreis eines Konkurrenzproduktes ermittelt. Dieser wird durch einen Zuschlagsfaktor korrigiert. Es ergeben sich die zulässigen Herstellkosten. Diese werden wiederum um

einen Faktor (z.B. 0,7) korrigiert. Dadurch soll auch in wirtschaftlicher Hinsicht eine ausreichende Lebensdauer gewährleistet werden. Es ergeben sich die idealen Herstellkosten. Die wirtschaftliche Wertigkeit wird aus dem Quotienten von idealen Herstellkosten und Herstellkosten gebildet [VDI2225-3, S. 3ff.].

Blatt 4 beschreibt die Methode der Bemessungslehre. Mit ihr werden die technische und wirtschaftliche Sicht verknüpft. Dazu wird die Bemessungsgleichung aufgestellt. Sie setzt sich einer Beanspruchungsgleichung (technische Sicht) und einer Kostengleichung (wirtschaftliche Sicht) zusammen. Das Vorgehen wird in der Richtlinie anhand eines Biegebalkens anschaulich erläutert: Für die Beanspruchungsgleichung ist der Zusammenhang zwischen Beanspruchung, Material und Abmessungen des Balkens rechnerisch formuliert. Für die Kostengleichung sind die Materialkosten sowie die Fertigungskosten rechnerisch formuliert. Die Formeln werden anschließend ineinander eingesetzt und ergeben die Bemessungsgleichung [VDI2225-4, S. 3ff.]. Im weiteren Verlauf von Blatt 4 werden Anwendungsbeispiele aufgezeigt z.B. zum Bemessen von Trägern und Wellen [VDI2225-4, S. 12ff.], Druckbehälter [VDI2225-4, S. 26ff.] oder Zahnrädern [VDI2225-4, S. 41f.].

Bewertung: Bei der Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 werden sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte betrachtet. Es erfolgt keine Gewichtung der Aspekte. Die wirtschaftliche Bewertung ist im Wesentlichen auf den Materialeinsatz, -art und -preis zurückzuführen. Grundlage ist die Gestalt des Produktes. Eine Bewertungsgrundlage für das Problem wird nicht zur Verfügung gestellt. In kritischen Fällen kann so lediglich eine Vermutung über die Ausprägung eines Kriteriums getroffen werden.

Im Rahmen der Kostenermittlung erfolgt keine Modellierung von Produkt und Produktionsystem, daher werden die Anforderungen A1- A3 nicht erfüllt. In der VDI Richtlinie 2225 werden in Blatt 1 und Blatt 2 Kostengrößen (grobe Geometrien und Relativkostenzahlen) als Basis zur Kostenermittlung vorstellt. Dadurch kann die Anforderung A4 teilweise erfüllt werden. Ein Vergleich mit einem vorgegebenem Kostenrahmen wird jedoch nicht herbei geführt. Genauso wenig erfolgt eine Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung als auch das zur Verfügung stellen von technologierelevantem Wissen und Methoden. Daher werden die Anforderungen A5- A7 nicht erfüllt. Die Richtlinie stellt einen strukturierten Rahmen zur Durchführung der Kostenermittlung dar, daher wird Anforderung A8 voll erfüllt. Eine Einordnung in die Phase des Systementwurfs bleibt leider aus (A9).

3.2.2 Target Costing

Das Target Costing (Zielkostenrechnung) ist ein Instrument des strategischen Kostenmanagements. Es hat seinen Ursprung in der japanischen Wirtschaft und wurde im Jahr 1965 vom Automobilhersteller Toyota entwickelt. Anfang der 90er Jahre gelangte die Methode über die USA nach Deutschland [Sei93, S. 5ff.].

Im Fokus des Target Costing steht die Fragestellung, welche Kosten ein Produkt maximal generieren darf, um es am Markt absetzen zu können. Diese Fragestellung stützt sich auf den Umstand, dass heute die meisten Märkte Käufermärkte sind, auf denen eine immense Wettbewerbsintensität herrscht. Diese Märkte definieren den erzielbaren Preis.

Das Target Costing kommt in der frühen Phase der Produktentstehung zum Einsatz, um die Kostenstrukturen frühzeitig im Hinblick auf die Markt- und Kundenanforderungen beeinflussen zu können. Es stellt ein Hilfsmittel dar, die Bedürfnisse des Marktes in allen Phasen der Produktentstehung mit zu berücksichtigen. Es entsteht eine Entscheidungskette über alle Phasen der Produktentstehung hinweg, die den Faktor Kosten im Fokus hat. [Hor93, S. 4]. Die Zielkosten werden nach einem definierten Schema ermittelt, welches in Bild 3-4 dargestellt ist.

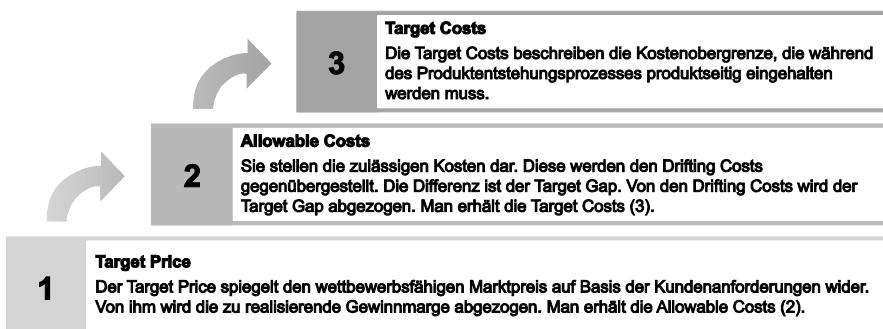


Bild 3-4: Vorgehen zur Ermittlung der Target Costs vgl. [GWR09, S. 149]

Zunächst wird der **Target Price** auf geeignete Art und Weise ermittelt. Dieser spiegelt den wettbewerbsfähigen Marktpreis auf Basis der Kundenanforderungen wieder. Hieran wird die zu realisierende Gewinnmarge abgezogen. Das Ergebnis stellen die **Allowable Costs** (zulässige Kosten) dar. Sie stellen die maximalen Kosten dar, die für das Produkt auftreten dürfen. Diese weichen oftmals von den Drifting Costs (erwartenden Kosten), auf Basis von Know-how und Erfahrungswissen, des Unternehmens ab. Die Differenz zwischen den beiden Größen wird als Target Gap bezeichnet. Er bezieht den Kostenreduktionsbedarf. Unter Berücksichtigung von externen und internen Einflussfaktoren werden die **Target Costs** (Zielkosten) festgelegt. Sie stellen im Produktentstehungsprozess die Kostenobergrenze dar, die produktseitig eingehalten werden muss.

Bewertung: Die Methode geht von einem erzielbaren Marktpreis auf Basis der Kundenanforderungen aus. Auf dieser Basis werden die Target Costs bestimmt, welche die Kostenobergrenze des Produktes darstellen. Eine Erfassung der vom Produkt verursachten Kosten wird nicht berücksichtigt. Das Target Costing erfüllt die gestellten Anforderungen an die Methoden nur unzureichend. Das Produkt sowie das Produktionssystem wird nicht betrachtet. Die Methode ermöglicht eine marktseitige Betrachtung und Definition der Kostenobergrenze für das zu entwickelnde Produkt auf Basis der Kundenanforderungen. Daher erfüllt die Methode lediglich Anforderung A8 in vollem Umfang. Alle weiteren

Anforderungen (A1-A7 und A9) können nicht erfüllt werden. Die Methode des Target Costing stellt eine gute Basis zur Ermittlung der Zielkosten für den Entwicklungsgegenstand (vgl. Phase 1 der Systematik zur Kostenbewertung – Zielkosten abfragen) dar. Sie ist eine Möglichkeit die Zielkosten zu ermitteln.

3.2.3 Kostenvergleichsrechnung (Cost Comparison Method)

In der Betriebswirtschaftslehre gibt es eine Vielzahl an Methoden der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. Sie dienen als Instrument zur Investitionsbewertung und zur Entscheidungsfindung. Zu nennen sind hier bspw. die Kostenvergleichsrechnung, Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung, Kapitalwertmethode und Annuitätenmethode. Diese Methoden weisen jeweils einen unterschiedlichen Betrachtungsschwerpunkt auf. In ihrem Ablauf sind diese Methoden durchaus vergleichbar. Daher soll an dieser Stelle stellvertretend die Kostenvergleichsrechnung näher erläutert werden [FSS14, S. 884ff.].

Die Kostenvergleichsrechnung ist ein in der Betriebswirtschaftslehre etabliertes Verfahren zur Beurteilung von Investitionsobjekten. Mit Hilfe der Methode wird eine Vorteilhaftigkeitsentscheidung auf Grundlage von Kosten durchgeführt. Es werden mehrere Investitionsobjekte miteinander verglichen. Mit Hilfe der Methode lässt sich allerdings keine absolute Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Alternativen treffen. Betrachtet werden alle Kosten, die während der Nutzungsdauer entstehen [Wes06, S. 106]. Bild 3-5 zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung zweier Investitionsobjekte im Rahmen der Kostenvergleichsrechnung. Es werden die kalkulatorischen Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen und Betriebskosten zu den Gesamtkosten aufsummiert. Maschine 1 hat geringere Abschreibungen und Zinsen. Die Betriebskosten sind mit 43 €/h im Vergleich zu Maschine 2 sehr hoch. Maschine 2 hingegen übersteigt die Abschreibungen und Zinsen von Maschine 1. Durch die geringeren Betriebskosten von 23 €/h sind die Gesamtkosten um 22.500 € geringer. Maschine 2 ist Maschine 1 vorzuziehen.

	Maschine 1	Maschine 2
1 kalk. Abschreibung (€/Jahr)	6.000	10.000
2 kalk. Zinsen (€/Jahr)	1.500	5.000
3 Betriebskosten (€/Jahr)	$1.500 \times 43 \text{ €/h} = 64.500$	$1.500 \times 23 \text{ €/h} = 34.500$
4 Gesamtkosten (€/Jahr)	72.000	49.500
5 Kostendifferenz (€/Jahr)		22.500

Bild 3-5: Anwendungsbeispiel zur Kostenvergleichsrechnung [Wes06, S. 107]

Bewertung: Die Methode stellt Investitionsobjekte gegenüber und bewertet diese anhand der Kosten. Dabei werden Kennzahlen erhoben und miteinander verglichen. Für eine Anwendung für die Bewertung von Produktkonzepten in der Produktentstehung ist diese Methode weniger geeignet, da die Kosten nicht ausreichend differenziert betrachtung finden. Zudem wird keine Aussage über eine absolute Vorteilhaftigkeit einer Alter-

native getroffen. Lediglich die relative Vorteilhaftigkeit wird betrachtet. Eine Betrachtung von Produkt und Produktionssystem ist nicht Gegenstand dieser Methode. Des Weiteren wird dem Anwender weder ein Kostenmodell, eine Rechnerunterstützung, noch technologierelevantes Wissen zur Verfügung gestellt. Die korrespondierenden Anforderungen (A1-A4, A6 und A7) können somit nicht erfüllt werden. Zwar werden alternativen miteinander verglichen, Aussagen über die absolute Vorteilhaftigkeit werden nicht getroffen. Dies führt zu einer teilweisen Erfüllung von Anforderung A5. Durch die Vorgabe eines gewissen Bewertungsschemas kann die Forderung nach einer systematischen Vorgehensweise teilweise erfüllt werden (A8). Eine Orientierung am Systementwurf (A9) bleibt aus, da hier lediglich eine Kennzahlenbasierte Bewertung erfolgt.

3.2.4 Kosten-Nutzen-Analyse (Cost-Benefit Analysis)

Die Methode kommt häufig bei der Bewertung von Investitionsprojekten im öffentlichen Sektor zum Einsatz. Mit Hilfe der Methode wird die Vorteilhaftigkeit einer Entscheidung bewertet. Als vorteilhaft gilt diejenige Alternative mit dem höchsten Nettonutzen. Er wird aus der Differenz von Nutzen und Kosten gebildet. Dabei wird im Vorfeld versucht, nicht monetäre Größen wie z.B. Zuverlässigkeit in monetäre Größen umzuwandeln. Das Vorgehen lässt sich in die Vorbereitungs-, Berechnungs- und Beurteilungsphase unterteilen. In der Vorbereitungsphasen werden Daten zu den Alternativen gesammelt und analysiert. Zudem erfolgt hier die Zielformulierung. In der Berechnungsphase werden Kosten und Nutzen für jede Alternative ermittelt. Für die Bewertung werden häufig klassische Methoden der Investitionsrechnung herangezogen wie z.B. die Kapitalwertmethode. Anschließend wird der Nettonutzen gebildet. Zusätzlich werden jene Kriterien aufgeführt, die sich nicht monetär bewerten lassen. In der abschließenden dritten Phase werden die Alternativen beurteilt und in eine Rangfolge gebracht. Die Vorteilhafteste wird ausgewählt [SK11, S. 329f.].

Bewertung: Die Methode betrachtet sowohl den Nutzen als auch die Kosten die von einer Alternative verursacht werden. Die Methode fokussiert Entscheidungsprobleme der Investitionsrechnung und vernachlässigt dementsprechend Aspekte des Produktes und der Produktion (A1-A3). Also große Herausforderung für die Anwendung der Methode wird häufig die schwierige Transformation des Nutzens in monetäre Größen genannt und generiert daher einen geringeren praktischen Nutzen als theoretisch möglich ist. Ein Kostenmodell wird nicht zur Verfügung gestellt (A4). Durch den Vergleich unterschiedlicher Alternativen wird Anforderung A5 teilweise erfüllt. Wissen sowie Methoden, als auch eine Rechnerunterstützung werden nicht angeboten (A6 und A7). Die Methode stellt ein Vorgehensmodell zur Verfügung welches sich in drei Phasen (Vorbereitungs-, Berechnungs- und Beurteilungsphase) aufteilt. Anforderung A8 wird somit voll erfüllt. Eine Orientierung am Systementwurf (A9) bleibt leider aus.

3.2.5 Bewertung der Herstellkosten nach VireS

Im Verbundprojekt VireS⁴ wurde eine Methode für die frühzeitige Herstellkostenbewertung entwickelt. Die Methode basiert auf Kennzahlen wie z.B. Maschinenstundensatz, Rüstzeiten oder Qualitätsgrad, die auf Basis von Erfahrungs-/Expertenwissen geschätzt werden. Die Bewertung der Herstellkosten geschieht auf Basis der Konzeption des Produktionssystems. In die Bewertung fließen unterschiedliche Stück- und Variantenzahlen mit ein. Für die Stück- und Variantenzahlen können Intervalle angegeben werden, die in der Simulation Berücksichtigung finden.

Das Vorgehen zur Anwendung der Methode gliedert sich in vier Phasen: Analyse der Eingangsinformationen, Berechnung der Gesamtanlageneffektivität (OEE⁵), Berechnung der Herstellkosten, Visualisierung und Analyse (vgl. Bild 3-6).

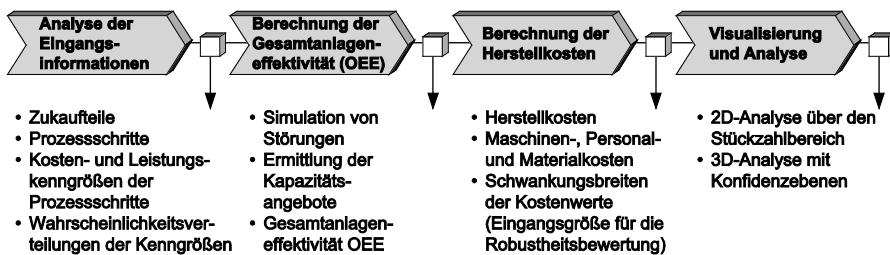


Bild 3-6: Vorgehen zur Bewertung der Herstellkosten [GLL12, S. 154]

Analyse der Eingangsinformationen: Ausgangspunkt bildet hier die Beschreibung des Produktionssystems sowie die Definition der Zukaufteile. Das Produktionssystem wird als Folge von Prozessschritten beschrieben. Jeder Prozessschritt besteht aus einem Puffer und der Bearbeitungsstation (z.B. Maschine oder Werker). Die Größe der Puffer wird vom Benutzer definiert. Die Prozessfolge gibt Aufschluss über die Montage- bzw. Fertigungsfolge. Den Prozessschritten werden Kennzahlen hinterlegt (z.B. Qualitätsrate, mittlere Reparaturzeit oder mittlere Betriebsdauer). Den Zukaufteilen werden ebenfalls Informationen annotiert wie z.B. Einkaufspreis, Teuerungsrate oder mögliche Preisrabatte. Abschließend werden den Parametern Unsicherheiten zugewiesen die auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z.B. Normalverteilung) basieren. Diese Daten fließen in die Simulation ein, welche auf Zufallszahlen basiert [GLL12, S. 154f.].

Berechnung der Gesamtanlageneffektivität: In dieser Phase wird die Gesamtanlagen-effektivität berechnet. Sie wird aus dem Produkt von Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad

⁴ Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung (VireS), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Projektlaufzeit: Juli 2008 bis Juni 2011

⁵ OEE: Overall Equipment Effectiveness

und Qualitätsgrad gebildet. Der Verfügbarkeitsgrad beschreibt ungeplante Systemausfälle. Der Leistungsgrad berücksichtigt Abweichungen von der geplanten Bearbeitungszeit aufgrund von kleinen Ausfällen oder Leerläufen der Maschine. Der Qualitätsgrad beschreibt den Ausschuss oder nachzuarbeitende Teile. Zu diesem Zeitpunkt existierende Unsicherheiten werden ebenfalls mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben und abgeschätzt [GLL12, S. 155ff.].

Berechnung der Herstellkosten: Die Herstellkosten basieren auf dem Kapazitätsbedarf. Aus dem Kapazitätsbedarf ergeben sich zahlreiche benötigte Informationen, um die Herstellkosten berechnen zu können. Ausgangspunkt für die Kalkulation ist die Gesamtanalyseeffektivität. Zusätzlich müssen Aussagen über das Schichtmodell, Personal- sowie Maschinenstundenbedarf und Personal- sowie Maschinenstundenkosten getroffen werden. In dieser Phase werden die Herstellkosten in Abhängigkeit der Variantenzahl sowie Stückzahl ermittelt. Die Simulation der Herstellkosten basiert auf verschiedenen Berechnungsformeln [GLL12, S. 158ff.].

Visualisierung und Analyse: Es wird eine 2D-Analyse hinsichtlich der Stückzahlen durchgeführt. Zudem erfolgt eine 3D-Analyse mit Konfidenzebenen. Die Ergebnisse werden außerdem visualisiert [GLL12, S. 163ff.].

Bewertung: Die Methode berücksichtigt alle vorher definierten Prozessschritte der Fertigung. Anforderung A1 kann daher teilweise erfüllt werden. Die Definition eines gemeinsamen Betrachtungsgegenstandes (A2) sowie die Bereitstellung einer einheitlichen Bewertungsgrundlage (A3) bleiben aus. Die Basis für die Kostenberechnung bildet Erfahrungs- bzw. Expertenwissen. Für die Berechnung werden zahlreiche Annahmen getroffen, deren Unsicherheiten mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgedeckt werden sollen. Die Forderung nach einem Kostenmodell (A4) wird teilweise erfüllt. Der Vergleich unterschiedlicher Lösungskonzepte ist nicht vorgesehen, wird aber auch nicht ausgeschlossen. Dies führt zu einem nicht erfüllen von Anforderung A5. Zur Berechnung der Herstellkosten wird der Anwender rechnertechnisch unterstützt. Die korrespondierende Anforderung (A6) wird voll erfüllt. Technologierelevantes Wissen wird nicht zur Verfügung gestellt (A7). Das Vorgehen wird durch ein explizites Vorgehensmodell beschrieben. Die Anwendung der Methode orientiert sich am Systementwurf. Die Anforderungen A8 und A9 werden voll erfüllt.

3.2.6 Funktionskostenmatrix

Die Funktionskostenmatrix wird häufig im Kontext der Wertanalyse oder des Target Costing angewandt. Sie dient dazu, Zielkosten auf Basis von Funktionen für Bauteile zu identifizieren. Das Verfahren zur Bestimmung der Zielkosten ist zweistufig [Joo06, 306], [VDI2800-1, S. 20].

Im ersten Schritt werden die Funktionen über die Komponenten des Systems aufgetragen. Dabei können unterschiedliche Konkretisierungsgrade vorliegen. Die Bestimmung der

Zielkosten kann zunächst auf Systemebene erfolgen, später auf Subsystemebene, bis auf die Bauteilebene. Den Funktionen wird der Anteil an der Erfüllung der Hauptfunktion zugewiesen. Die Summe über die Funktionen muss am Ende 100% betragen.

Für die Bewertung der einzelnen Funktionen hinsichtlich ihres Anteils am Gesamtnutzen aus Kundensicht wird in der Literatur die Conjoint-Analyse [BEP+11] empfohlen. Zunächst sollen mit ihrer Hilfe die Produktfunktionskombinationen bewertet und in eine Rangfolge gebracht werden, um anschließend mittels der multivariaten statistischen Datenanalyse Teilnutzen zu bestimmen. Anschließend sollte der Nutzenbeitrag je Produktfunktion aufgelistet werden. Sie bestimmen zugleich den Anteil am Gesamtnutzen.

Im nächsten Schritt wird der Anteil der jeweiligen Komponenten an der Funktionserfüllung je Funktion in die Zellen eingetragen. Der Grundaufbau der Matrix bleibt unverändert. In der Zelle, in der zuvor der Funktionserfüllungsgrad eingetragen wurde, wird nun die gewichtete Funktionserfüllung eingetragen. Sie ergibt sich aus dem Erfüllungsgrad multipliziert mit dem Anteil der Funktion an der Hauptfunktion. Die Summe der gewichteten Funktionserfüllung je Komponente wird mit den Zielkosten des Gesamtsystems multipliziert. Es ergeben sich die Zielkosten je Komponente [Bur99], [Dit98], [Sei93].

Bewertung: Die Methode baut auf den Produktfunktionen auf. Mit ihr können die Zielkosten je Komponente bestimmt werden. Für die Durchführung der Methode ist Erfahrungs- bzw. Expertenwissen notwendig. Die Methode ist für komplexe Systeme sehr aufwändig durchzuführen. Der Vergleich unterschiedlicher Lösungskonzepte ist nicht vorgesehen, wird aber auch nicht ausgeschlossen. Die Ermittlung der Funktionen sowie die Ermittlung von Komponenten, die sie erfüllen, sind nicht Teil der Methode. Zudem werden keine Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, welche die Anwendung der Methode unterstützen. Da die Methode erst relativ spät im Entwicklungsprozess Anwendung findet können die Anforderungen A1-A3 nicht erfüllt werden. Durch das Fehlen von Hilfsmitteln werden die Anforderungen A4, A6 und A7 nicht erfüllt. Da nur die Zielkosten erhoben werden, kann keine absolute Vorteilhaftigkeit (A5) ermittelt werden. Der Funktionskostenmatrix liegt ein Vorgehensmodell zu Grunde. Somit wird Anforderung A8 voll erfüllt. Eine Orientierung am Systementwurf (A9) bleibt aus.

3.2.7 Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung nach NiBL

Die Arbeit von NiBL hat die Zielsetzung bei der Zielkostenverfolgung in der Entwicklung wettbewerbsfähiger Produkte zu unterstützen [NiB06, S. 5]. Dazu wurde ein Modell entwickelt, welches den Produktentwickler in die Lage versetzt, selbst mit den im Unternehmen vorhandenen Kosteninformationen zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess die resultierenden Produktkosten hinreichend genau zu prognostizieren. Zudem sollen auf der Prognose erforderliche Maßnahmen abgeleitet und durchgeführt werden, die zur Erreichung des Kostenziels notwendig sind. Die Zielkostenverfolgung ist in den Prozess des Target Costing eingegliedert. Mit dem Modell soll zudem ein Werkzeug zur Verfügung

gestellt werden, welches alle an der Produktentwicklung beteiligten Unternehmensbereiche integriert und so eine durchgängige Zielkostenverfolgung gewährleistet [Niß06, S. 6f.]. Das Werkzeug besteht aus drei Modulen: Kosteninformationen, Werkzeuge und Kostenentwicklung. Diese sind in Bild 3-7 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.



Bild 3-7: Modularer Aufbau der Methode nach [Niß06, S. 112]

Im Modul **Kosteninformationen** sind die verfügbaren Kostendaten hinterlegt. Sie bilden die Basis zur Zielkostenverfolgung. Es sind grundlegende Daten und Informationen wie Datenblätter für die Prognosewerkzeuge und Daten aller bisher im Unternehmen durchgeföhrten Kostenprognosen zu finden. Zusätzlich sind Informationen für die Entwicklung kostengünstiger Produkte hinterlegt. Im zweiten Modul sind **Werkzeuge** zur Prognose der späteren Produktkosten zu finden. Zu ihnen zählen Werkzeuge zur Gewichtskostenkalkulation, Materialkostenkalkulation und zum Schätzen sowie Ähnlichkeitsbetrachtungen. Das dritte Modul befasst sich mit der **Kostenentwicklung**. Hier findet die eigentliche Zielkostenverfolgung statt. Hier werden die prognostizierten Kosten mit den Zielkosten begleitend zum Entwicklungsprozess abgeglichen. Die Resultate der Kostenprognosen werden in die Kostenentwicklungsdatei eingetragen und können in Verbindung mit den Zielkosten über den Entwicklungsverlauf visualisiert werden [Niß06, S. 113ff.].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Arbeit sich in den Kontext des Target Costings eingliedert. In der Praxis fehlen Vorgehensweisen und Werkzeuge zur Unterstützung der Zielkostenverfolgung um die Zielkostenerreichung sicher zu stellen. Diese Lücke wird durch das vorgestellte Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess geschlossen. Das Modell stützt sich auf das Vorhandensein von Kosteninformationen [Niß06, S. 153].

Bewertung: Das Modell zur Integration zur Zielkostenverfolgung findet im Rahmen des Target Costings Anwendung. Es wurde ein Werkzeug entwickelt, welches den Anwender bei der Durchführung der Zielkostenverfolgung unterstützt. Dabei setzt sich das Werkzeug aus drei Modulen zusammen (vgl. Bild 3-7). Das Modell stellt Wissen in Form von bereits durchgeföhrten Kostenprognosen zur Verfügung, stellt aber kein explizites Wissen für die Kostenbewertung (A7) zur Verfügung sondern stützt sich auf vorliegenden Kosteninformationen. Ein Kostenmodell wird nicht vorgestellt, wenngleich Datenblätter für die Ergebung der relevanten Informationen vorhanden sind. Durch das Fehlen eines

expliziten Kostenmodells, eines Kostenmodells zur Erhebung der kalkulierten Kosten und einer Rechnerunterstützung, welche lediglich für die Kostennachverfolgung geeignet ist, werden Anforderungen A4 und A6 nur teilweise und Anforderung A7 gar nicht erfüllt. Ferner wird der Entwicklungsprozess des Systems nicht betrachtet. Daher können die Anforderungen A1-A3 und A9 nicht erfüllt werden. Da die prognostizierten Kosten mit den Zielkosten verglichen werden, findet ein Soll-Ist-Vergleich der Kosten statt. Anforderung A5 wird voll erfüllt. Das Modell wird durch das Münchener Vorgehensmodell unterstützt, stellt aber kein eigenes Vorgehensmodell zur Verfügung. Auf dieser Basis kann Anforderung A8 nur teilweise erfüllt werden.

3.2.8 Transdisziplinäres Zielkostenmanagement nach ZIRKLER

Die Arbeit von ZIRKLER stellt einen Leitfaden für transdisziplinäres Zielkostenmanagement in den Fokus, welcher sich auf einen vierzehn schrittigen Zielkostenmanagement-Referenzprozess stützt. Dem Leitfaden sind Methoden und Werkzeuge hinterlegt, die bei der Anwendung unterstützen. Sie gliedern sich in Informationsmodell, Kostenanalyse und Kostenoptimierung [Zir10, S. 148].

Ausgehend von den Anforderungen – diese enthalten u.a. die Zielkosten – und der Funktionsstruktur, setzt der Leitfaden an. Auf dieser Basis können Funktions- und Komponenteneinzelkosten bestimmt werden. Den Komponenteneinzelkosten werden Komponentenschätzkosten gegenüber gestellt. Sie werden entweder direkt abgeschätzt oder können aus Funktions- bzw. Prozessschätzkosten berechnet werden. Aus dem Vergleich lassen sich Optimierungsansätze ableiten. Die Strukturinformationen werden mit Hilfe einer Multiple-Domain-Matrix abgebildet. Sie umfasst die Funktions-, Komponenten-, Prozess-, und Ressourcenebene. Die Matrix wurde dahingehend erweitert, dass neben Strukturinformationen auch Kosteninformationen abgebildet und bearbeitet werden können. Die erweiterte Matrix wird als **Informationsmodell** bezeichnet. In dem Modell sind die in den einzelnen Schritten des Referenzprozesses zu erarbeitenden Teilmatrizen untereinander verknüpft. Sie können durch Transformationen ineinander überführt werden. So lässt sich z.B. eine Umrechnung von Funktions- in Komponenteneinzelkosten vornehmen. Die **Kostenanalyse** umfasst fünf sog. Basismethoden, die zur transdisziplinären Kurzkalkulation entwickelt wurden. Sie ermöglichen eine Kostenschätzung auf allen drei Ebenen (Funktions-, Komponenten- und Prozesskosten) des Informationsmodells. Für die **Kostenoptimierung** wurden im Rahmen der Arbeit zwei Herangehensweisen entwickelt. Zum einen können aus der gezielten Analyse der funktionalen und der prozessualen Komponentenstruktur Informationen abgeleitet werden, die Hinweise darauf geben, ob eine Kostenoptimierung eher durch konzeptionelle Alternativen, durch z.B. Überarbeitung von Elementen, Überarbeitung von Prozessen oder den Einsatz alternativer Ressourcen erreicht werden kann. Zum anderen können Kostentreiber der funktionalen und physikalischen Komponentenstruktur ermittelt werden und somit konkrete Punkte für kostensenkende Maßnahmen identifiziert werden [Zir10, S. 149].

Bewertung: Der Leitfaden für ein transdisziplinäres Zielkostenmanagement betrachtet Produktkosten auf Funktions-, Komponenten und Prozessebene. Diese Kriterien werden für eine Kostenbewertung herangezogen. Das Produkt und Produktionssystem werden nicht explizit betrachtet. Die Anforderungen A1-A3 werden daher nicht erfüllt. Mit Hilfe des Informationsmodells können Aussagen über die Kostenoptimierung getroffen werden. Anforderung A4 wird daher teilweise erfüllt. Es findet ein Vergleich von kalkulierten Kosten und Zielkosten statt (A5). Aufbereitetes Wissen wird dem Anwender nicht zur Verfügung gestellt (A7), wenn gleich er durch Methoden und Werkzeuge bei der Durchführung unterstützt wird. Der Leitfaden orientiert sich an einem Referenzprozess für das Zielkostenmanagement (A8). Zudem fehlt es an einer Rechnerunterstützung (A6) sowie an der Orientierung am Systementwurf (A9).

3.3 MID-Hilfsmittel

Für die Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID existieren dedizierte Hilfsmittel. Diese werden im Folgenden näher vorgestellt und bewertet.

3.3.1 Methodik zur Produktoptimierung nach PEITZ

Die Methodik nach PEITZ fokussiert die Optimierung herkömmlicher elektronisch-mechanischer Baugruppen mit Hilfe der Technologie MID. Den Kern der Methodik bildet das Vorgehensmodell. Es dient als Leitfaden für die systematische Optimierung herkömmlicher Baugruppen. Den einzelnen Phasen sind Tätigkeiten und Methoden zugewiesen sowie das erwartete Resultat. Es kommen sowohl etablierte Methoden zum Einsatz als auch im Rahmen der Methodik neu entwickelte Methoden: Suchfelder für die Schwachstellenanalyse, MID-Konstruktionskatalog, Vorgehen zum Gestalten von MID-Teilen und Eigenschaftskarten der MID-Herstellverfahren [Pei07, S. 87]. Bild 3-8 zeigt das Vorgehensmodell, welches sich in fünf Phasen gliedert.

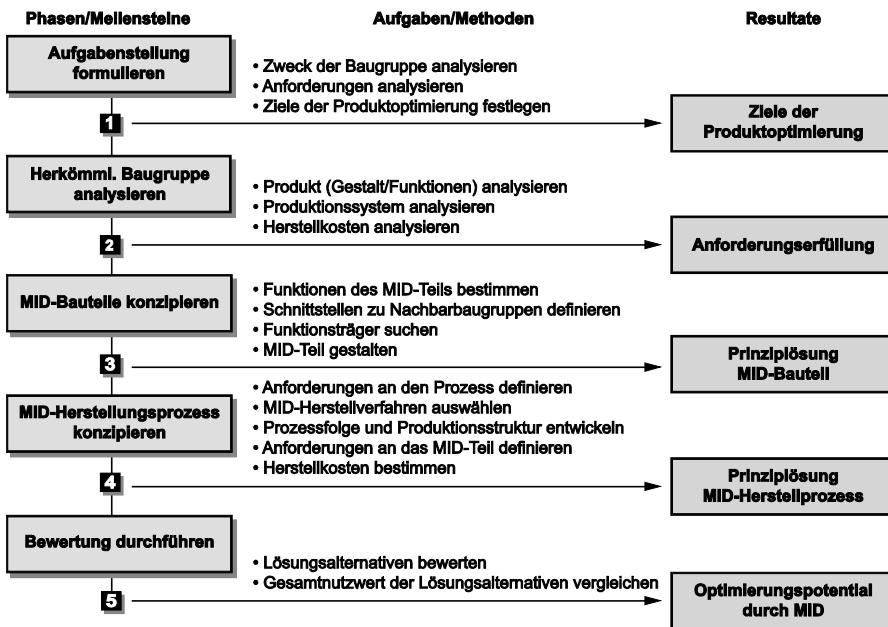


Bild 3-8: Vorgehensmodell zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID nach Peitz [Pei07, S. 86]

- 1) **Aufgabenstellung formulieren:** In dieser Phase wird die Entwicklungsaufgabe definiert. Hierzu werden die Anforderungen sowie der Zweck der Baugruppe analysiert. Das Resultat bilden die Ziele der Produktoptimierung [Pei07, S. 88ff.].
- 2) **Herkömmliche Baugruppe analysieren:** Gegenstand dieser Phase ist Analyse der bestehenden Baugruppe vor dem Hintergrund der zuvor definierten Ziele (Phase 1) sowie der Technologie MID. Es werden verschiedene Suchfelder definiert wie z.B. Funktionen, Prozess oder Kosten. Dabei gilt es die Stärken und Schwächen der Baugruppe zu analysieren. Resultat ist die Anforderungserfüllung [Pei07, S. 92ff.].
- 3) **MID-Baugruppe konzipieren:** In dieser Phase soll die MID-Baugruppe konzipiert werden. Dabei gilt es die Funktionen, Schnittstellen und die Gestalt der Baugruppe zu beschreiben. Ferner werden mögliche MID-Lösungen für die Funktionen untersucht. Resultat dieser Phase ist die Prinziplösung des Produkts [Pei07, S. 100ff.].
- 4) **MID-Herstellprozess konzipieren:** Die Phasen drei und vier werden im Wechselspiel bearbeitet, da es zahlreiche Abhängigkeiten gibt. Zunächst gilt es die Anforderungen an den Herstellprozess zu definieren auf deren Basis das MID-Her-

stellverfahren ausgewählt wird. Anschließend wird der MID-Herstellprozess definiert. Abschließend findet eine Betrachtung der Herstellkosten statt. Das Resultat dieser Phase ist die Prinziplösung des Produktionssystems [Pei07, S. 114ff.].

- 5) Bewertung durchführen:** In dieser Phase wird die neu konzipierte MID-Lösung der herkömmlichen mechanisch elektronischen Lösung gegenübergestellt. Diese werden anhand der Stärken-Schwächen-Analyse bewertet. Die Variante mit dem höheren kumulierten Nutzwert stellt die bessere Variante dar [Pei07, S. 127ff.].

Bewertung: Die Methodik fokussiert die Optimierung einer herkömmlichen Baugruppe mit der Technologie MID. Zu diesem Zweck stellt sie ein Vorgehensmodell und Methoden bereit. Die integrative Betrachtung von Produkt und zugehörigem Produktionssystem ist Gegenstand der Methode genauso wie der Vergleich zweier Baugruppen in herkömmlicher Bauart und in der Technologie MID. Ferner finden die Herstellkosten ebenfalls Betrachtung. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese bekannt sind. Eine Betrachtung der gesamten Prozesskette bleibt unberücksichtigt. Die Methodik erfüllt die gestellten Anforderungen nur unzureichend, denn es fehlt an einer Bewertung hinsichtlich der Kosten. Anforderungen A1-A5 und A6 können somit nicht erfüllt werden. Die Anforderungen A7-A9 werden hingegen volumnfähig erfüllt.

3.3.2 Erweiterter MID-Konstruktionskatalog

Konstruktionskataloge beinhalten bekannte und bewährte Lösungen für konstruktive Fragestellungen. Die Kataloge können Inhalt auf verschiedenen Konkretisierungsstufen bereitstellen. Ein Beispiel aus dem Bereich Maschinenbau sind die Konstruktionskataloge von ROTH [Rot01]. Für MID sind klassische Kataloge unzureichend geeignet. PEITZ entwickelte daher einen MID-Konstruktionskatalog [Pei07, S. 109], welcher sukzessive gewachsen ist. Er definiert Lösungen für elektrische und mechanische MID-Funktionen sowie eine erste Grobgestalt. Bild 3-9 zeigt den erweiterten MID-Konstruktionskatalog.

Lösungen		Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7
Funktionen								
Elektrische MID-Funktionen	Ei. Energie transportieren	Leiterbahn	Antenne					
	Mit Nachbarbaugruppe kontaktieren	Stecker	Kontaktfeder	Direktsteck-prinzip	Kontaktfläche	Einpressstift	SMD-Stecker	Kontakthügel
	Ei. Bauteile kontaktieren (AVT)	Lötverbindung	Klebverb.	Bondverb.			Flip-Chip Lötv.	Flip-Chip Klebv.
	Elektromagn. Felder schirmen	Schild	Gitter					
	Vor hohen Strömen sichern	Sicherung						
	Stromkreis schließen / öffnen	Schnappschalter	Silikonschalter					
Mechanische MID-Funktionen	Bauteile tragen	2 ½ D	n x 2D	Schalenstruktur	3D			
	Kraft übertragen	Schnappverb.	Sägezähne	Zahnrad	Klemmverb.	Steckverb.	Schiebverb.	
	Vor Umwelt-einflüssen schützen	Gehäuse	Vergießen	Lackierung	Umspritzen			
	Thermische Energie leiten	Metall. Fläche	Kühlrippen	Heizstruktur				
	Bauteile stabilisieren	Versteifungen	Abstandhalter	Vergießen				
	Bauteile markieren	Barcode	Referenzpunkt	Farben	Beschriftung			
	Baugruppe kontaktieren	Zylinder	Bohrung					

Bild 3-9: Erweiterter MID-Konstruktionskatalog, basierend auf PEITZ nach [Fra13, S. 260]

In den Zeilen sind die Funktionen aufgeführt. Diese gliedern sich in elektrische und mechanische MID-Funktionen. Jeder Funktion ist je Spalte eine mögliche Lösung zugewiesen. Jede Lösung besitzt einen Titel und wird zusätzlich durch Piktogramme dargestellt. Zur Charakterisierung jeder Lösung stellt PEITZ eine Kurzbeschreibung zur Verfügung. Bild 3-10 zeigt die Beschreibung der Lösung Leiterbahn.

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

Bild 3-10: Kurzbeschreibung der Lösung Leiterbahn [Pei07, S. 110]

Bewertung: Der erweiterte Konstruktionskatalog unterstützt unerfahrene Entwickler bei der Auswahl geeigneter Lösungen für mechanische und elektrische MID-Funktionen. Anhand der Kurzbeschreibungen erhält der Entwickler Informationen über die Lösungsalternative. Der Konstruktionskatalog ist ein etabliertes Mittel aus der Konstruktionsmethodik und fügt sich in den bestehenden Entwurfsprozess ein. Ferner wird technologierelevantes Wissen anhand der Kurzbeschreibung zur Verfügung gestellt. Dem Entwickler werden unterschiedliche Lösungsalternativen je Teilfunktion angeboten. Der MID-Konstruktionskatalog findet seinen Einsatz im Systementwurf. Anforderung A9 wird voll erfüllt. Alle weiteren Anforderungen (A1-A8) können aufgrund der fehlenden Betrachtung von Produkt und Produktionssystem, fehlender Kostenbetrachtung und fehlendem Vorgehensmodell nicht erfüllt werden.

3.3.3 Eigenschaftskarten der MID-Verfahren

Jedes MID-Verfahren besitzt unterschiedliche Eigenschaften. Ein Beispiel: Das Heißprägen besitzt eine sehr kurze Prozesskette, wohingegen die Laserstrukturierung und das Zweikomponentenspritzgießen eine sehr hohe dreidimensionale Gestaltungsfreiheit aufweisen. Mit Hilfe der Eigenschaftskarten nach PEITZ werden diese Charakteristika beschrieben. Die Karten beinhalten den Namen des beschriebenen Verfahrens, eine Bewertung anhand von acht Eigenschaften, z.B. 3D-Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen, Vielfalt an einsetzbaren Kunststoffen und Änderungsaufwand, sowie eine Visualisierung der Prozesskette. Zusätzlich enthält jede Eigenschaftskarte eine Erläuterung der Ausprägung jedes der genannten Merkmale. Insgesamt erstellte PEITZ vier Eigenschaftskarten für die Herstellprozesse: Heißprägen, Laserstrukturierung, Zweikomponentenspritzguss und Folienspritzgießen. Bild 3-11 zeigt die MID-Eigenschaftskarte des Laserstrukturierens.

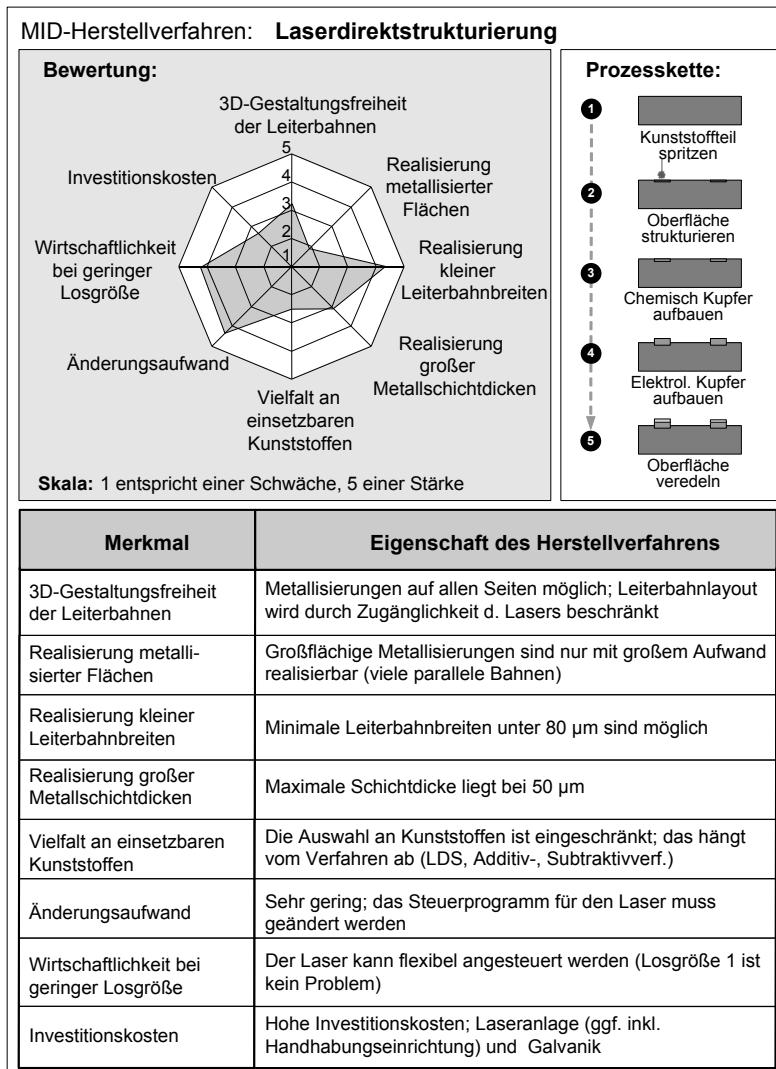


Bild 3-11: MID-Eigenschaftskarte des Verfahrens Laserstrukturierung nach PEITZ [Pei07, S. 117]

Die MID-Eigenschaftskarten helfen dem Entwickler das für die Entwicklungsaufgabe passende Herstellverfahren anhand von acht Eigenschaften auszuwählen. Hierfür wird das Merkmalsprofil in Form eines Spinnendiagramms für das Produkt ausgeprägt und anschließend mit den Profilen der Verfahren abgeglichen. Der Grad der Eigenschaftserfüllung lässt sich so überprüfen. Besitzt das Produkt eine hohe Dreidimensionalität der Leiterbahnstrukturen kann diese mit der Verfahrenseigenschaft 3D-Gestaltungsfreiheit der Leiterbahnen verglichen werden. Das Verfahren mit der größten Überdeckung der

Eigenschaften ist das vorteilhafteste. Ggf. müssen Änderungen am Produkt vorgenommen werden, wenn keines der Verfahren eine zufriedenstellende Überdeckung mit den Produkteigenschaften aufweist [Pei07, S. 116ff.].

Bewertung: Die MID-Eigenschaftskarten helfen dem Entwickler das Herstellverfahren mit der größten Überdeckung zu bestimmen. Die Merkmale des Produkts können mittels Spinnendiagramm mit den Eigenschaften der MID-Verfahren verglichen werden. Auf Basis der Überdeckung der Profile kann auf einfache Weise ein geeignetes Verfahren ausgewählt werden. Die Methode ist leicht verständlich. Die Eigenschaftskarten beschreiben die MID-Prozesskette, jedoch keine weiteren Prozesse, die für die Fertigung der gesamten Baugruppe notwendig sind (A1). Der Kostenaspekt findet anhand von entstehenden Investitionen Beachtung. Weitere Kosten werden nicht betrachtet. Da anhand der Eigenschaftskarten zwar auf Basis der Produktbeschreibung eine vielversprechende Technologie ausgewählt werden kann, der Prozess der Produktkonzipierung aber nicht Teil der MID-Eigenschaftskarten sind können Anforderungen A1-A3 nicht erfüllt werden. Ferner bleibt eine Bewertung der Kosten aus. Die Anforderungen A4-A6 werden ebenfalls nicht erfüllt. Durch die MID-Eigenschaftskarten wird MID-relevantes Wissen zur Verfügung gestellt, jedoch keines für eine Kostenbewertung. Anforderung A7 wird teilweise erfüllt. Der Einsatz der MID-Eigenschaftskarten orientiert sich am Systementwurf (A9) jedoch wird kein explizites Vorgehensmodell (A8) für die Anwendung der Karten beschrieben. Daher wird Anforderung A8 nicht, Anforderung A9 jedoch voll erfüllt.

3.3.4 Prozessübergangskosten nach FRANKE

FRANKE entwickelte ein prozessorientiertes Bewertungsverfahren. Kern des Verfahrens ist die Methode der Prozessübergangskosten. Es wird ermittelt, wann ein Übergang von konventionellen Technologien zu MID wirtschaftlich sinnvoll ist. Hierbei werden die Elementarkosten für die Fertigungsprozesse der konventionellen Fertigungstechnologie, sowie der neuen Fertigungstechnologie ermittelt und anschließend für jeden Prozessschritt gegenübergestellt. Die Summenbildung der Prozessübergangskosten über jeden Prozessschritt gibt Aufschluss über positive oder negative Kostenveränderungen zwischen der konventionellen und neuen Fertigungstechnologie. Konkreten Bezug auf Fertigungstechnologien erarbeitete FRANKE indem er Kostenstrukturen für MID-Herstellverfahren definiert. Hierbei steht die strategische Entscheidung im Vordergrund [Fra95, S. 139ff.]. Zunächst erfolgt die Bewertung über Wirkungsketten. Sie dienen dazu, die grundsätzlichen Technologiemarkale den entsprechenden Fertigungsprozessen zuzuordnen. Darauf aufbauend werden dann die Prozessübergangskosten bestimmt. Ein Vergleich von neuer Technologie und etablierten Verfahren wird so möglich. Die wesentlichen Eigenschaften und Merkmale zur Bewertung der Technologie MID gliedern sich in die vier Bereiche: Strategische Attraktivität, Funktionsintegration, Kosten-/Nutzenveränderung aufgrund neuer Fertigungsprozesse und Kosten-/Nutzenveränderungen durch attraktivere Produkte [Fra95, S. 142f.]. Für die Kalkulation der Herstellkosten

wurde das (Vor-)Kalkulationssystem MIDIS-C⁶ entwickelt [Fra95, S. 12ff.]. Es ermöglicht eine Kostenabschätzung von MID-Produkten bereits in einer frühen Phase mit Hilfe von quantifizierten Kalkulationsformeln. Die Kalkulationsformeln betrachten Material-, Fertigungs- und Sondereinzelkosten. Aufsummiert bilden sie die Herstellkosten [Fra95, S. 147].

Bewertung: Die Prozessübergangskosten und das dazugehörige Kalkulationssystem MIDIS-C ermöglichen eine frühzeitige Kalkulation der Kosten für ausgewählte MID-Verfahren. Die Methode der Prozessübergangskosten bildet jedoch nur einen Ausschnitt der Prozesskette ab. Eine Betrachtung der gesamten Prozesskette, wie es bspw. in [FGG+11] gefordert ist, bleibt aus. Ferner werden nur ähnliche Fertigungsprozesse gegenübergestellt. Zudem wird die Kalkulation nicht für die gesamte Baugruppe durchgeführt, sondern beschränkt sich auf die Betrachtung des MID-Bauteils und dessen Fertigung. Eine Modellierung von Produkt und Produktionssystem bleibt bei der Betrachtung der Prozessübergangskosten aus. Die Anforderungen A1-A3 werden daher nicht erfüllt. Weiter stellt FRANKE ein Kostenmodell zur Verfügung, welches Kostenstrukturen ausgewählter MID-Herstellverfahren darstellt. Anforderung A4 wird voll erfüllt. Ein Vergleich zwischen zwei Technologien wird zwar durchgeführt, ob ein Herstellverfahren ein vorgegebenes Kostenziel erreicht wird nicht überprüft. Anforderung A5 wird daher nur teilweise erfüllt. FRANKE präsentiert in seiner Dissertation mit MIDIS-C eine Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung (A6). Die Anwendung erfolgt strukturiert auch wenn kein explizites Vorgehensmodell beschrieben wird. Ferner lassen sich die Prozessübergangskosten während des Systementwurfs ermitteln. Ein konkreter Zeitpunkt wird nicht vorgeschlagen. Die Anforderungen A7-A9 werden teilweise erfüllt.

3.4 Spezifikationstechniken

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, sind elektronisch-mechanische Baugruppen fachdisziplinübergreifend zu entwickeln. Einhergehend mit der Entwicklung ist die frühzeitige Betrachtung der Fertigung der Baugruppe essentiell. Die Produkte und deren Produktionssysteme müssen daher fachdisziplinübergreifend und verständlich beschrieben werden. Hierfür bieten sich Spezifikationstechniken an [GLL12, S. 17f.]. Nachfolgend werden drei von ihnen ausführlich betrachtet.

⁶ MIDIS-C: Molded Interconnect Device Information Service-Calculation

3.4.1 CONSENS

Die Spezifikationstechnik CONSENS⁷ wurde am Heinz Nixdorf Institut im Sonderforschungsbereich 614 entwickelt [ADG+09]. Sie basiert auf den Arbeiten von KALLMEYER, FRANK und GAUSEMEIER ET AL. [Fra06], [GEK01], [Kal98] und umfasst eine Modellierungssprache sowie eine Vorgehensweise zur Erstellung der Prinziplösung des Produkts. In späteren Arbeiten wurde diese um die Beschreibung des Produktionssystems erweitert [GLL12, S. 89ff.]. Ziel von CONSENS ist die ganzheitliche und disziplinübergreifende Beschreibung des Produkts und Produktionssystems im Rahmen der Konzipierung. Das Produkt wird dabei durch sieben Aspekte beschrieben: Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten und Gestalt. Im Rahmen des Forschungsprojekts VireS (Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung Produktionsystementwicklung) wurde CONSENS um die Partialmodelle zur Produktionssystembeschreibung erweitert: Ressourcen, Prozesse, Anforderungen an das Produktionssystem und Gestalt des Produktionssystems [GLL12, S. 89f.].

⁷ CONSENS: CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

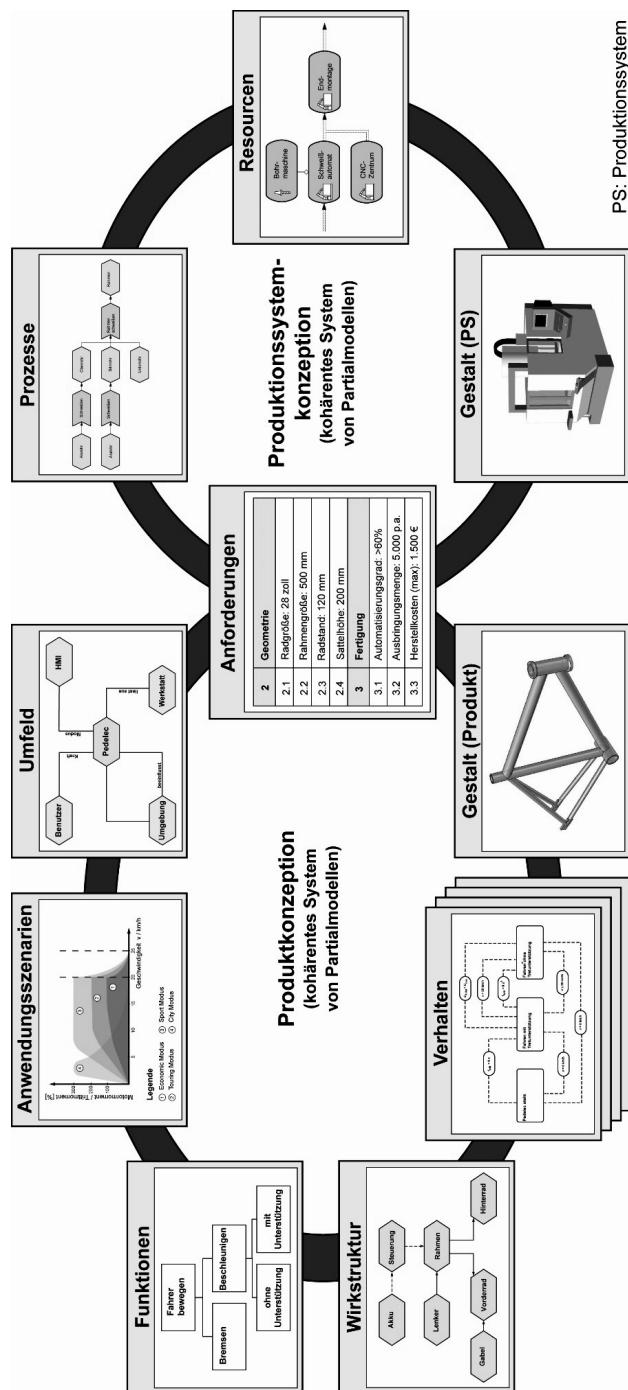


Bild 3-12: Partialmodelle für das Produkt und Produktionssystem [GLL12, S. 90]

Die Vorgehensweise zur Erstellung der Prinziplösung ist Teil der Spezifikationstechnik. Die Aspekte – und damit einhergehend die Partialmodelle – sind im Wechselspiel zu erstellen, wenngleich eine gewisse Reihenfolge vorgegeben ist.

Beschreibung des Produkts: Zu Beginn wird das **Umfeldmodell** erstellt. Dabei wird das Produkt als Black Box betrachtet. Es werden die Schnittstellen des zu betrachtenden Systems mit den Elementen aus dessen Umfeld beschrieben. Zusätzlich werden **Anwendungsszenarien** erstellt, die das prinzipielle Verhalten des Systems in vorher definierten Betriebssituationen beschreiben. Anschließend werden die **Anforderungen** definiert und in einer Anforderungsliste dokumentiert. Die Anforderungen bilden die „Messlatte“ für das zu entwickelnde Produkt und dem zugehörigem Produktionssystem. Auf Basis der Anforderungen lassen sich spätere Kriterien für die Bewertung der Produktkonzepte ableiten. Mit der **Wirkstruktur** erfährt das System eine White Box Betrachtung: Sie beschreibt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems. Es werden die funktionserfüllenden Elemente und deren Beziehungen zu einander mit Hilfe von Systemelementen und Flussbeziehungen (Energie-, Stoff- und Informationsfluss) modelliert. Die **Funktionen** wurden zuvor mit Hilfe einer Funktionshierarchie abgebildet. Zur Spezifikation des **Verhaltens** stehen zwei Partialmodelle zur Verfügung: Die Zustände und Zustandsübergänge, sowie die Ereignisse, die diese auslösen, werden im Partialmodell Verhalten-Zustände beschrieben. Ablaufprozesse innerhalb eines Zustandes werden im Partialmodell Verhalten-Aktivitäten abgebildet. Zusätzlich können weitere Aspekte wie z.B. Dynamik mit entsprechenden Verhaltensdiagrammen beschrieben werden. Eine erste Beschreibung der **Gestalt** des Produkts in Form von Hüllflächen, Bauräumen sowie Wirkflächen und -orten wird mit dem Partialmodell Gestalt vorgenommen. Dabei kommen gängige 3D-CAD-Systeme zum Einsatz. [GFD+09], [GLL12], [FG13].

Beschreibung des Produktionssystems: Im Partialmodell **Prozesse** wird der Produktionsablauf betriebsmittelunabhängig als eine Kette von Arbeitsschritten beschrieben. Im Partialmodell **Ressourcen** werden eben jene beschrieben, die die Prozesse realisieren. Demnach werden die Ressourcen den Arbeitsschritten zugeordnet. Dabei ist keine Eins-zu-eins-Beziehung vorgeschrieben. Eine Ressource kann mehrere Arbeitsschritte ausführen (z.B. bohren und senken). Für die Beschreibung der **Anforderungen** an das Produktionssystem wird die Anforderungsliste der Produktbeschreibung genutzt. Analog zum Partialmodell **Gestalt** für das Produkt, ist ein Gestaltmodell für das Produktionssystem vorgesehen. Hier werden Arbeitsräume und Platzbedarfe der Ressourcen sowie das grobe Layout des Produktionssystems spezifiziert [GBR10], [GLL12].

Bewertung: CONSENS beschreibt das Produkt und Produktionssystem anhand von Partialmodellen. Sie bilden ein kohärentes System. Die Sprache wurde zur Beschreibung von mechatronischen Systemen entwickelt. Die Modelle sind leicht verständlich und bilden eine einheitliche Basis zur Bewertung einer Lösungsvariante. Für die Modellierung von Systemen in der Technologie MID sind in der Sprache noch keine Konstrukte vorhanden, sie bildet jedoch eine sehr gute Ausgangsbasis und ist geringfügig zu erweitern (z.B. elektro-mechanische Flussbeziehung). Die Partialmodelle bilden eine Ausgangsbasis zur

Definition der Bewertungsgrundlage (A3). Die Anforderung wird daher teilweise erfüllt. Die Betrachtung der gesamten Prozesskette sowie die Definition des Betrachtungsgegenstandes bleiben aus. Die Anforderungen A1 und A2 werden nicht erfüllt. Ebenso werden kein Kostenmodell (A4), keine Bewertungssystematik (A5) sowie keinerlei technologie-relevantes Wissen (A7) oder Methoden zur Kostenbewertung (A6) bereitgestellt. Die äquivalenten Anforderungen werden nicht erfüllt. Neben der Modellierungssprache umfasst CONSENS ein Vorgehensmodell (A8), welches sich am Systementwurf orientiert (A9). Die Anforderungen können voll erfüllt werden.

3.4.2 SysML

Die SysML⁸ ist eine von der OMG⁹ und INCOSE¹⁰ auf Basis der UML¹¹ entwickelte Modellierungssprache. Mit ihr lassen sich Struktur, Verhalten und Anforderungen eines Systems beschreiben und in Beziehung setzen. Sie ist eine grafische, objektorientierte Modellierungssprache. Die SysML ist auf die Ansätze des Systems Engineering (Spezifikation, Analyse, Entwurf, Verifikation und Validierung) ausgerichtet. Die Konzepte der Sprache sind so aufgebaut, dass diese methodenspezifisch für unterschiedliche Modellierungszwecke angepasst werden können [INC10]. Die SysML gliedert sich in neun Aspekte (vgl. Bild 3-13): Das Zusicherungsdiagramm, das interne Blockdefinitionsdiagramm, das Blockdefinitionsdiagramm und das Paketdiagramm gehören zu den Strukturdiagrammen. Die Diagrammtypen: Zustand, Use-Case, Sequenz und Aktivität zählen zu den Verhaltensdiagrammen. Zudem gibt es in der SysML noch das Anforderungsdiagramm [Alt12].

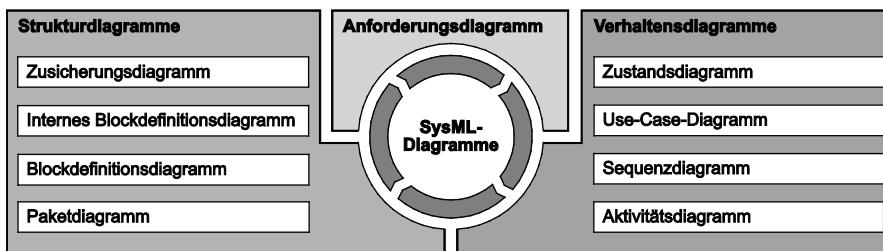


Bild 3-13: Übersicht der Diagrammtypen in SysML [GTSI4, S. 37]

⁸ SysML: Systems Modeling Language

⁹ OMG: Object Management Group

¹⁰ INCOSE: International Council of Systems Engineering

¹¹ UML: Unified Modeling Language

Die Systemstruktur wird im Blockdefinitionsdiagramm und im internen Blockdefinitionsdiagramm beschrieben. Das Verhalten des Systems kann über die verschiedenen Verhaltensdiagramme beschrieben werden: Zustands-, Use-Case-, Sequenz- und Aktivitätsdiagramm. Mit der SysML lässt sich das Produkt beschreiben. Aspekte des Produktionsystems werden nicht abgebildet.

Bewertung: SysML sieht eine strukturelle Beschreibung des Systems sowie eine verhaltensorientierte Beschreibung anhand unterschiedlicher Diagrammtypen vor. Anforderungen an das System lassen sich ebenfalls mit Hilfe des Anforderungsdiagramms beschreiben. Die Modellkonstrukte sind dabei nicht speziell auf mechatronische Systeme ausgelegt, da die Modellierungssprache den Anspruch hat, allgemeingültig einsetzbar zu sein. Das Erlernen der Sprache fällt den Anwendern häufig schwer, da hierzu die Konzepte der Objektorientierung bekannt und verstanden sein müssen [Fri11]. Die graphischen Darstellungen hingegen können leichter nachvollzogen werden, sodass das Lesen der Modelle leichter fällt. Intuitiv können die Modelle zumeist jedoch nicht verstanden und interpretiert werden. Der Anwender muss sich im Vorfeld intensiv mit der Sprache auseinander setzen [BC10], [FMS12], [SMM+12]. Aufgrund des Anspruchs der allgemeingültigen Anwendbarkeit fehlen viele Aspekte welche für die Kostenbewertung in Kapitel 2.8 gefordert werden (A1-A7). Die SysML selber stellt kein Vorgehensmodell (A8) zur Verfügung, wenn gleich in der Literatur einige vorgeschlagen werden, welche sich am Systementwurf orientieren (A9). Anforderung A8 wird teilweise erfüllt. Anforderung A9 kann voll erfüllt werden.

3.4.3 METUS

Die ID-Consult und die Daimler AG entwickelten die Methode METUS¹² und das dazugehörige Softwaretool. Bild 3-14 stellt die Funktions- und Produktstruktur dar. Wesentliche Aspekte der Methode sind Anforderungen, Funktionen, Komponenten, Module sowie Produkt. Anforderungen werden mit Hilfe einer Liste verwaltet und können in funktionale Anforderungen, Umgebungsbedingungen und Anforderungen an die Produkteigenschaften differenziert werden. Die Funktionen werden mittels Funktionshierarchie dargestellt. Komponenten erfüllen Funktionen und werden mit diesen verknüpft. Den Komponenten können die Attribute Standard-, Varianten- oder optionales Element zugewiesen werden. Ferner können zusätzliche Parameter wie Gewicht, Kosten oder Lieferanten definiert werden. Die Komponenten lassen sich in Module bündeln, die sich wiederum zum Produkt bündeln lassen [FG13, S. 267f.].

¹² METUS – METHodische Unterstützung zur Systembildung

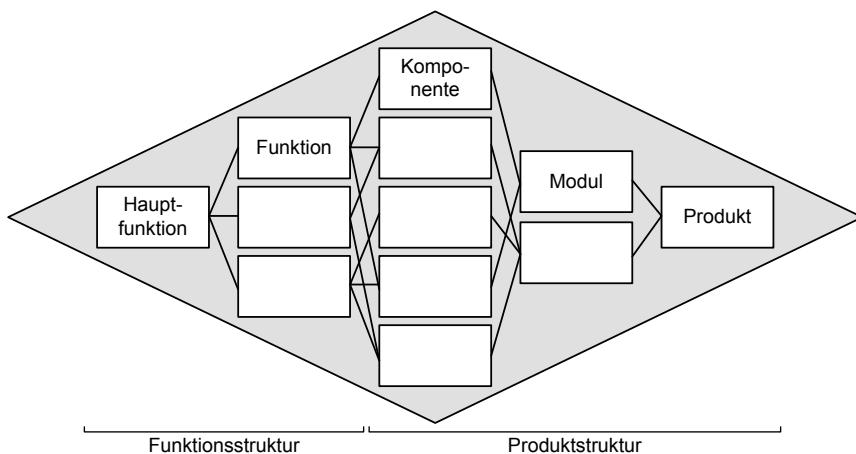


Bild 3-14: Darstellung der Funktionsstruktur und der Produktstruktur [FG13, S. 257]

Bewertung: Die Methode bietet eine durchgängige Entwicklungsunterstützung, welche es vor allem erlaubt, die funktionale Sicht mit der physischen Sicht auf das System zu verknüpfen. Den Komponenten können Kosten zugewiesen werden. Durch Addition werden daraus Modulkosten und Funktionskosten abgeleitet. Kosten für Montageschritte von Komponenten zu Modulen bleiben unberücksichtigt. Wirkbeziehungen zwischen den Komponenten werden nicht modelliert. Ebenso werden die Einbettung in das Systemumfeld sowie die Aspekte der Produktion nicht betrachtet. Die Anforderungen A3, A6 und A8 können teilweise erfüllt werden. Alle weiteren Anforderungen werden nicht erfüllt.

3.5 Handlungsbedarf

Im Rahmen des Standes der Technik wurden die betrachteten Ansätze bewertet. Einen Überblick liefert Bild 3-15. Zusammenfassend werden die Anforderungen wie folgt bewertet:

A1) Betrachtung der gesamten Prozesskette: Fast keine der betrachteten Methoden adressiert den Fertigungsaspekt und lässt demnach auch die Betrachtung der Prozesskette außer Acht. Eine Ausnahme stellt die Methode zur Bewertung der Herstellkosten nach VireS dar.

A2) Definition eines gemeinsamen Betrachtungsgegenstandes: Keiner der betrachteten Methoden erfüllt die Anforderung. Die Ansätze gehen von einem vorgegebenen Betrachtungsgegenstand aus und analysieren und bewerten diesen. In keinem der Methoden wird dezidiert ein Betrachtungsgegenstand definiert.

A3) Bereitstellen einer einheitlichen Bewertungsgrundlage: Die betrachteten Methoden setzen alle auf einer Basis auf, stellen jedoch nicht sicher, dass diese alle relevanten

Informationen bereitstellt. Die Methoden geben keine Hilfestellung, um alle Kostenaspekte zu definieren und darzustellen.

A4) Bereitstellen eines Kostenmodells: Diese Anforderung wird von keinem Ansatz in Gänze erfüllt. Zwar werden in einigen Ansätzen die Kosten bewertet, werden aber oftmals als gegebene Größe aufgefasst oder die Ergebung wird nicht näher erläutert. Die Methode der Prozessübergangskosten nach FRANKE stellt die Ergebung von Kosten stärker in den Vordergrund. So existieren Formeln, die die Kosten näher beschreiben.

A5) Bewerten der absoluten Vorteilhaftigkeit: Diese Anforderungen wird lediglich von zwei Ansätzen erfüllt. Das Modell nach NiBL sowie das transdisziplinäre Kostenmanagement nach ZIRKLER vergleichen Zielkosten und die kalkulierten Kosten des Lösungskonzepts. Alle anderen Ansätze erfassen lediglich die kalkulierten Kosten und bewerten die relative Vorteilhaftigkeit zwischen den Varianten. Dieses Vorgehen stellt nicht sicher, dass die vorgegebenen Kostenziele auch wirklich erreicht werden.

A6) Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung: Die Anforderung wird von den betrachteten Methoden nur unzureichend erfüllt. Das Modell nach NiBL stellt zwar ein Werkzeug zur Kostenbewertung bereit, dieses beinhaltet jedoch keine Informationen über relevantes Wissen oder Methoden. Die Methode zur Prozessübergangskostenrechnung nach FRANKE stellt ein Softwaretool bereit und erfüllt diese Anforderung als einziges voll. Das Softwaretool der Methode METUS unterstützt bei der Berechnung der Kosten, stellt aber keinerlei weitere Hilfsmittel zur Verfügung. Es erfüllt diese Anforderung daher nur teilweise.

A7) Bereitstellen von technologierelevantem Wissen und Methoden: Lediglich die MID-spezifischen Hilfsmittel stellen relevantes Wissen zur Verfügung. Dieses fokussiert sich zumeist auf einen Aspekt. Der MID-Konstruktionskatalog bspw. stellt Wissen in Form einer konstruktiven Lösung bezogen auf eine Funktion bereit. Die Eigenschaftskarten für MID-Verfahren stellen umfassendes Wissen in Bezug auf die einzelnen Herstellverfahren bereit und liefern mit der Bewertung von acht Charakteristika eine Unterstützung für die Auswahl eines geeigneten Herstellverfahrens. Der Kostenaspekt bleibt jedoch unberücksichtigt. Bei der Methode nach FRANKE hingegen steht der Kostenaspekt im Vordergrund, technologierelevantes Wissen wird jedoch nicht voll umfassend vermittelt. Lediglich die Methode nach PEITZ erfüllt diese Anforderung voll.

A8) Systematische Vorgehensweise: Diese Anforderung wird von einem Großteil der Ansätze zumindest zum Teil erfüllt. Die Anwendung der Methode wird mitunter mit Hilfe eines Vorgehensmodells unterstützt und liefert einen Leitfaden für das systematische Durchlaufen der einzelnen Phasen.

A9) Orientierung am Systementwurf: Die betrachteten Methoden erfüllen diese Anforderung zumeist nicht. Dennoch gibt es Methoden, die sich am Systementwurf orientieren und speziell für die Anwendung in der Konzipierung entwickelt wurden. Zu ihnen zählen z.B. der erweiterte MID-Konstruktionskatalog, CONSENS und SysML.

Bewertung der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.		Anforderungen								
		Betrachtung der gesamten Prozesskette	Definition eines gemeinsamen Betrachtungsgegenstands	Bereitstellen einer einheitlichen Bewertungsgrundlage	Bereitstellen eines Kostenmodell	Bewerten der absoluten Vorteilhaftigkeit	Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung	Bereitstellen von technologierelevantem Wissen und Methoden	Systematische Vorgehensweise	Orientierung am Systemsentwurf
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
Bewertungsmethoden	Paarweiser Vergleich	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Nutzwertanalyse	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Analytic Hierarchy Process	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Wertanalyse nach VDI 2800	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
Methoden zur Kostenbewertung	Kostenermittlung nach VDI 2225	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Target Costing	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Kostenvergleichsrechnung	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Kosten-Nutzen-Analyse	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Herstellkosten nach VireS	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Funktionskostenmatrix	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Modell nach Ni&L	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Transdisziplinäres Kostenmanagement	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
MID spezif. Methoden	Methode nach PEITZ	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Erw. MID-Konstruktionskatalog	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Eigenschaftskarten für MID-Verfahren	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	Prozessübergangskosten nach FRANKE	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
Spezifika- tionstechn.	CONSENS	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	SysML	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>
	METUS	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>	<input type="circle"/>

Bild 3-15: Bewertung des untersuchten Stands der Technik anhand der Anforderungen

4 Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf

Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Hier werden die Bestandteile der *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID* beschrieben. Die Systematik hat den Anspruch, den aufgezeigten Handlungsbedarf aus der Problemanalyse sowie dem Stand der Technik zu erfüllen. In Kapitel 4.1 wird ein Überblick über die Bestandteile der Systematik gegeben, welche in den darauf folgenden Kapiteln 4.2 bis 4.5 näher erläutert werden.

4.1 Bestandteile der Systematik

Die Systematik soll Entwicklern und Entscheidern als Rahmenwerk dienen und sie zur Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID befähigen. Dabei kann es sich sowohl um eine komplette Neuentwicklung des mechatronischen Systems handeln als auch auf eine Entwicklung, welche auf einem bereits existieren System aufsetzt. Sie umfasst vier Elemente (vgl. Bild 4-1):

- Ein **Vorgehensmodell**, welches die Tätigkeiten zur Kostenbewertung strukturiert und deren Ergebnisse sowie benötigte Hilfsmittel einordnet.
- Ein **Kostenmodell**, welches alle relevanten Aspekte integriert und den Rahmen für die Kostenbewertung darstellt. Es untergliedert sich in zwei Bereiche: Ermittlung der kalkulierten Kosten und der Zielkosten. Zudem ist im Kostenmodell Entwicklungswissen repräsentiert, welches den Anwender bei der Entwicklung und Entscheidungsfindung unterstützt.
- Eine **Modellierungssprache**, die dezidiert die Besonderheiten der Technologie MID abbilden kann.
- Sowie ein **Konzept für die Werkzeugunterstützung** mit dem die Systematik rechnerunterstützt angewandt werden kann.

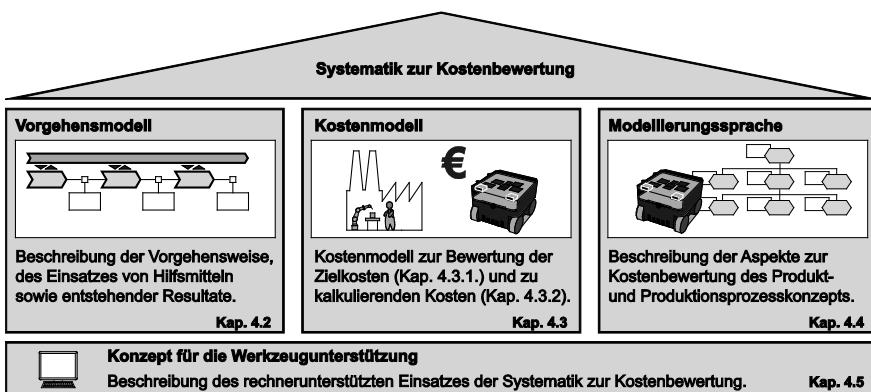


Bild 4-1: Bestandteile der Systematik

4.2 Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell bildet die methodische Grundlage der Systematik. Das Vorgehensmodell strukturiert den Ablauf und wird in einzelne Phasen und Meilensteine unterteilt. Jeder Phase sind die durchzuführenden Tätigkeiten zugewiesen. So wird die systematische und korrekte Kostenbewertung sichergestellt. Im folgenden Kapitel 4.2.1 werden die Phasen, Tätigkeiten und die zu erarbeitenden Resultate näher erläutert. In Kapitel 4.2.2 wird anschließend das Vorgehensmodell in den Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme eingeordnet.

4.2.1 Aufbau des Vorgehensmodells

Die Systematik findet im Systementwurf im Sinne der VDI-Richtlinie 2206 ihre Anwendung. Der Systementwurf ist Kern der Konzipierung und findet in den frühen Phasen der Entwicklung statt (vgl. Kap. 2.4.2). Konkretbettet sich das Vorgehen in die Entwicklungssystematik mechatronischer Systeme in der Technologie MID nach KAISER [Kai09] ein (vgl. Kap. 4.2.2). Nachfolgend wird das Vorgehen losgelöst von der eigentlichen Konzipierung vorgestellt. Das Vorgehen enthält die Schritte, welche für die Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID relevant sind. Bild 4-2 zeigt das Vorgehen und die korrespondierenden Schritte anhand eines Phasen-Meilenstein-Diagramms. Die Darstellung ist idealtypisch in sequentieller Reihenfolge, wenngleich Iterationen und Rücksprünge möglich und durchaus gewollt sind.

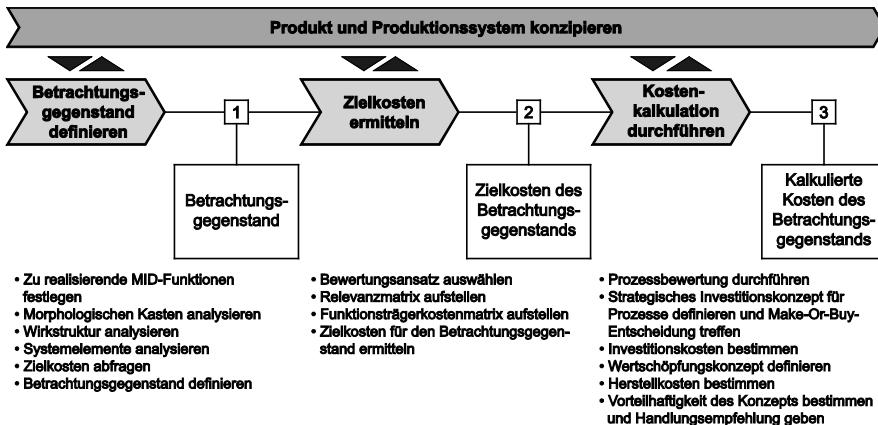


Bild 4-2: Vorgehensmodell der Systematik

Ausgangspunkt der Systematik ist der vorliegende Stand der Entwicklung des mechatronischen Systems, der noch keine Ausarbeitung der Wirkungsweise des Systems enthält. Es sollte bereits ein Entwicklungsauftrag vorliegen und eine Anforderungs-, Umfeld- sowie Funktionsbeschreibung erfolgt sein. Die Bewertung der Kosten erfolgt anschließend parallel zur Konzipierung von Produkt und Produktionssystem in drei Phasen.

Die **erste Phase** umfasst die Definition des Betrachtungsgegenstandes auf Basis der vorliegenden Informationen aus der Konzipierung. Der Betrachtungsgegenstand stellt gleichzeitig das Resultat der ersten Phase dar. In der **zweiten Phase** werden, basierend auf einer Relevanzmatrix und mit Hilfe einer Funktionskostenmatrix, die Zielkosten für den Betrachtungsgegenstand ermittelt. Das Resultat dieser Phase bilden die Zielkosten. In der **dritten Phase** werden die kalkulierten Kosten für den zuvor definierten Betrachtungsgegenstand ermittelt. Dazu zählen die Herstellkosten inkl. möglicher Investitionen z.B. für neue Maschinen. Dazu wird zunächst eine Prozessbewertung vorgenommen und das strategische Investitionskonzept definiert. Zudem werden die Investitionen sowie die Herstellkosten basierend auf dem Wertschöpfungskonzept ermittelt. Anschließend wird eine Kostenbewertung durchgeführt und die absolute Vorteilhaftigkeit ermittelt. Das Resultat in dieser Phase ist der bewertete Betrachtungsgegenstand hinsichtlich seiner Kosten. Für alle noch nicht vorliegenden Informationen können zunächst Annahmen getroffen werden, die im Rahmen der weiteren Entwicklung konkretisiert werden. Zudem können so frühzeitig konkurrierende Produktkonzepte auf einer einheitlichen Bewertungsgrundlage im Hinblick auf ihre Kosten bewertet werden.

In den einzelnen Phasen werden Hilfsmittel zur Durchführung der Tätigkeiten angewandt. Dabei werden sowohl bestehende Hilfsmittel verwendet, als auch Hilfsmittel, die im Rahmen dieser Arbeit erweitert oder neu entwickelt wurden. Bild 4-3 zeigt die entwickelten Hilfsmittel. Zudem ist visualisiert, in welcher Phase sie im Rahmen der Systematik Anwendung finden.

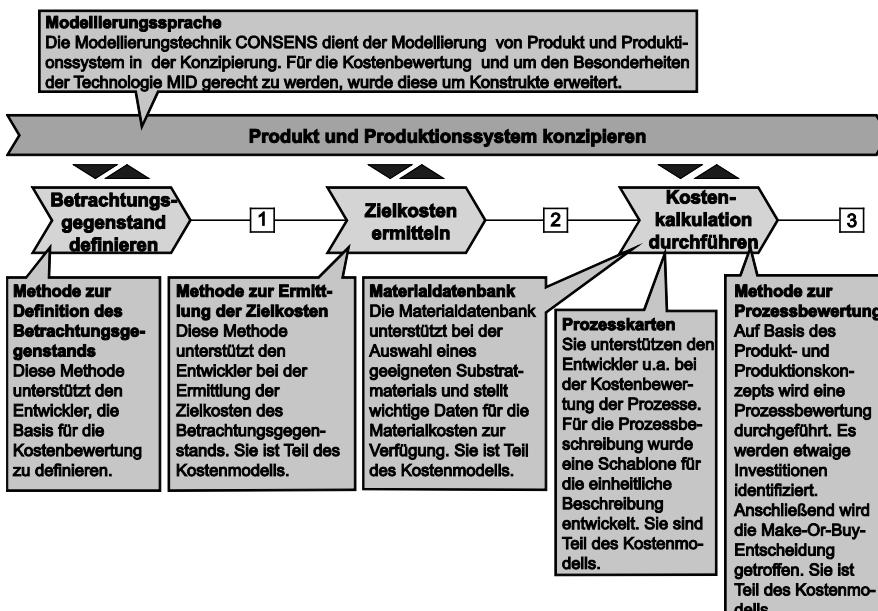


Bild 4-3: Neu entwickelte sowie erweiterte Hilfsmittel und deren Einordnung in das Vorgehensmodell

In den folgenden Abschnitten werden die Phasen *Produkt und Produktionssystem konzipieren, Betrachtungsgegenstand definieren, Zielkosten ermitteln* und die *kalkulierten Kosten ermitteln* sowie die auszuführenden Tätigkeiten und Resultate erläutert. Empfohlene Hilfsmittel werden in der jeweiligen Phase kurz erläutert. Die neu entwickelten bzw. erweiterten Hilfsmittel sind den anderen Bestandteilen der Systematik zugeordnet. Sie werden daher an geeigneter Stelle referenziert. Gleiches gilt für die im Stand der Technik vorgestellten Methoden und Werkzeuge. Zunächst wird die zur Kostenbewertung parallel stattfindende Konzipierung des Produkts und Produktionssystems beschrieben.

In der Konzipierung wird ausgehend vom Entwicklungsauftrag zunächst das Umfeldmodell aufgestellt. Es beschreibt, wie sich das zu entwickelnde System in sein Umfeld einbettet und welche Beziehungen zwischen ihnen bestehen. Darauf aufbauend werden Anwendungsszenarien definiert und eine Anforderungsliste aufgestellt. Anschließend wird das zu entwickelnde System lösungsneutral anhand von Funktionen beschrieben. Sie werden in einer Funktionshierarchie dargestellt. Mittels morphologischem Kasten werden Lösungen für die Funktionen ermittelt und zu einer Wirkstruktur synthetisiert. Die initiale Wirkstruktur wird im Zuge der Konzipierung weiter ausgearbeitet. Auf Basis der Beschreibung wird ein erstes Gestaltmodell der MID-Baugruppe erstellt. Hier werden frühzeitige Variablen in Bezug auf die Kosten und den Fertigungsprozess definiert. Zudem entstehen durch die Gestalt der MID-Baugruppe zahlreiche Anforderungen und Restriktionen im Hinblick auf das Fertigungsverfahren für die Baugruppe, die für die Konzipierung des Produktionssystems eine wesentliche Rolle spielen.

Neben der Gestalt des Schaltungsträgers wird, bereits in der Konzipierung, ein erstes Leiterbahnlayout entworfen. Dabei entstehen weitere Anforderungen und Restriktionen an das Fertigungsverfahren (z.B. Leiterbahnbreite). Zugleich werden die benötigten elektronischen Bauelemente für die Realisierung der Schaltung bestimmt. Die elektronischen Bauelemente können in der Wirkstruktur an die MID-Baugruppe annotiert werden. Hierfür wurde die Modellierungstechnik CONSENS entsprechend erweitert (vgl. Kap. 4.4).

Im Hinblick auf die Kostenbewertung, sind die Informationen über die elektronischen Bauelemente, das Volumen des Grundkörpers sowie die Fläche des Leiterbahnlayouts relevant. Die Berechnung von Volumina und Flächen beliebiger Körper ist in gängigen 3D-CAD Tools integriert. Die in der Wirkstruktur und dem Gestaltmodell hinterlegten Informationen können in Phase 2 zur Bestimmung der zu kalkulierenden Kosten verwendet werden.

Ausgehend von dem Produktkonzept und den damit einhergehenden Produktrestriktionen wird zunächst das MID-Herstellverfahren ausgewählt. Für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens werden die MID-Eigenschaftskarten nach PEITZ genutzt (vgl. Kap. 3.3.3). Anschließend werden detaillierte Fertigungsrestriktionen ermittelt. Hierfür werden die Prozesskarten eingesetzt. Für jeden Prozessschritt der MID-Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit eigene Prozesskarten entwickelt (vgl. Kap. 4.3.2.2 und Anhang A2). Neben

den Fertigungsrestriktionen und weiterer Informationen enthalten sie die Möglichkeit auf weiterführende Dokumente oder Richtlinien zu verweisen.

Die durch die Prozesskarten ermittelten Fertigungsrestriktionen werden mit den Eigenschaften des Produktkonzeptes abgeglichen. Existieren Prozesse, mit denen das Bauteil-/gruppe gefertigt werden kann, werden diese ausgewählt. Lässt sich kein Prozess finden, ist das Produktkonzept anzupassen. Weist die Geometrie des Grundkörpers z.B. eine schöpfende Struktur auf, kann das Kondensationslötverfahren unter Umständen nicht eingesetzt werden, da es für diese Geometrie ungeeignet ist. Zwei Stoßrichtungen sind nun denkbar, entweder kann die Geometrie angepasst werden oder eine andere Verbindungs-technik ist auszuwählen. Mitunter entstehen hier andere bzw. weitere Restriktionen, wie z.B. erhöhte Temperaturniveaus. Diese beeinflussen die Materialauswahl. Sie wird mit Hilfe der Materialdatenbank durchgeführt (vgl. Kap. 4.3.2.2) und erfolgt eng verzahnt mit der Auswahl des MID-Herstellverfahrens. Die Auswahl des Fertigungsverfahrens hat somit nicht nur großen Einfluss auf die Produkteigenschaften, sondern gleichermaßen auf die zu erwartenden Kosten.

Darauf aufbauend, und mit Hilfe der Prozesskarten, kann der Produktionsprozess definiert werden. In den Eigenschaftskarten sind jeweils das Eingangselement, der Prozess und das Ausgangselement hinterlegt. Die Prozesskette lässt sich so einfach definieren. Für die Kostenbewertung müssen lediglich die Prozesse abgebildet werden, die sich auf die Systemelemente des Betrachtungsgegenstandes beziehen. Am Ende der Konzipierung liegt als **Resultat** das Produkt und Produktionskonzept für das zu entwickelnde System vor.

Die nachfolgende Aufzählung listet die benötigten **Hilfsmittel** im Rahmen der Produkt- und Produktionsprozesskonzipierung auf:

- Modellierungstechnik CONSENS (vgl. Kap. 3.4.1 und Kap. 4.4)
- MID-Eigenschaftskarten nach PEITZ (vgl. Kap. 3.3.3)
- Materialdatenbank (vgl. Kap. 4.3.2.2)
- Prozesskarten (vgl. Kap. 4.3.2.2 und Anhang A2)

4.2.1.1 Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren

Ausgehend vom Entwicklungsauftrag, in dem die Zielkosten für das zu entwickelnde Produkt enthalten sind und den vorliegenden Entwicklungsresultaten im Systementwurf erfolgt eine systematische Analyse mit dem Ziel den Betrachtungsgegenstand für die Kostenbewertung zu definieren. Ausgangspunkt bilden die Funktionshierarchie, der morphologische Kasten sowie die Wirkstruktur. Die relevanten Aspekte des Systems werden in dieser Phase identifiziert. Zu ihnen zählen Funktionen sowie die funktionsumsetzenden Elemente (Systemelemente). Das Produkt- und Produktionssystemkonzept werden mit Hilfe von Partialmodellen beschrieben (vgl. Kap. 3.4.1).

Zur Definition des Betrachtungsgegenstandes, wird die gleichnamige Methode eingesetzt. Sie wurde im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt und basiert auf einem funktionsorientierten Ansatz. Die Definition des Betrachtungsgegenstandes wird anhand von fünf Phasen durchgeführt, deren schematischer Ablauf in Bild 4-4 dargestellt ist. Im Folgenden werden die Phasen näher erläutert:

- 1) **Ermittlung relevanter MID-Funktionen:** In der ersten Phase sind, falls noch nicht geschehen, diejenigen Funktionen zu identifizieren, welche mit Hilfe der Technologie MID realisiert werden können (z.B. elektrische Energie transportieren oder mit Nachbarbaugruppe kontaktieren). Hier wird auf die MID-Funktionen nach PEITZ [Pei07] zurückgegriffen (vgl. Kap. 2.3.1). Sie geben eine gute Hilfestellung für die Identifikation von relevanten Funktionen.
- 2) **Zuordnung geeigneter Lösungen zu MID-Funktionen:** In diesem Schritt werden den MID-Funktionen aus Phase 1 geeignete Lösungen zugeordnet. Als Ordnungsrahmen bietet sich der morphologische Kasten nach ZWICKY [Zwi71] an. Er spannt in einer Matrix alle relevanten Funktionen (Zeilen) auf. Den Funktionen werden mögliche Lösungsalternativen zugeordnet (Spalten). Eine gute Unterstützung bei der Lösungssuche bietet der erweiterte MID-Konstruktionskatalog (vgl. Kap. 3.3.2). Abschließend werden konsistente Pfade durch den morphologischen Kasten gebildet. Jeder Pfad steht für ein mögliches Lösungskonzept, welches im späteren Verlauf ausgearbeitet wird [Ehr09, S. 421f.], [FG13, S. 373].
- 3) **Ermittlung weiterer relevanter Funktionen:** Es werden alle weiteren Funktionen identifiziert, die von der MID-Baugruppe realisiert werden, die keine MID-Funktionen darstellen, wie z.B. informationsverarbeitende Funktionen. Aufgrund der Möglichkeit, auch informationsverarbeitende Bauelemente auf dem MID-Baugruppe applizieren zu können, werden mitunter weitere Funktionen realisiert. Zu ihnen zählen z.B. das Auswerten von Sensordaten, das Umsetzen von Regelstrategien oder das Senden und Empfangen von IR-Signalen. Sie sind ebenfalls Teil des Betrachtungsgegenstandes. Zur Identifikation der Funktionen bietet sich die Analyse des morphologischen Kastens und der Funktionshierarchie an.
- 4) **Analyse der Wirkstruktur:** Nach dem Aufstellen der Wirkstruktur (vgl. Kap. 3.4.1) werden die Flussbeziehungen von der MID-Baugruppe zu weiteren angrenzenden Bauteilen/-gruppen untersucht. Die Baugruppen, die eine elektromechanische Verbindung zum MID-Baugruppe aufweisen, sind näher zu betrachten. Mechanische Verbindungen lassen sich häufig genauso auch mit konventionellen Technologien realisieren. Da dies im Einzelfall abweichen kann, müssen entsprechend bei der Definition des Betrachtungsgegenstandes auch mechanische Verbindungen berücksichtigt werden. Die

betroffenen Bauteile sind dann ebenfalls Teil des Betrachtungsgegenstandes. Die elektromechanischen Verbindungen werden mitunter während der Fertigung (z.B. löten) des MID-Baugruppe realisiert. Die Bauteile sind dann ebenfalls Teil des Betrachtungsgegenstandes.

- 5) **Analyse der weiteren Bauteile:** Die Bauteile, die neben dem eigentlichen MID-Bauteil Teil des Betrachtungsgegenstandes sind, gilt es in der letzten Phase zu analysieren. Es sind die Funktionen zu identifizieren, die sie zusätzlich realisieren. Sie gehören gleichermaßen zum Betrachtungsgegenstand.

Für den Vergleich unterschiedlicher Varianten werden die definierten Funktionen des Betrachtungsgegenstandes herangezogen. Deren Realisierung durch Systemelemente ist variantenspezifisch. Da die Funktionen des Betrachtungsgegenstandes über alle Varianten hinweg gleich sind, wird die Vergleichbarkeit gewährleistet. Für den Vergleich unterschiedlicher Varianten muss demnach jeweils der morphologische Kasten analysiert werden.

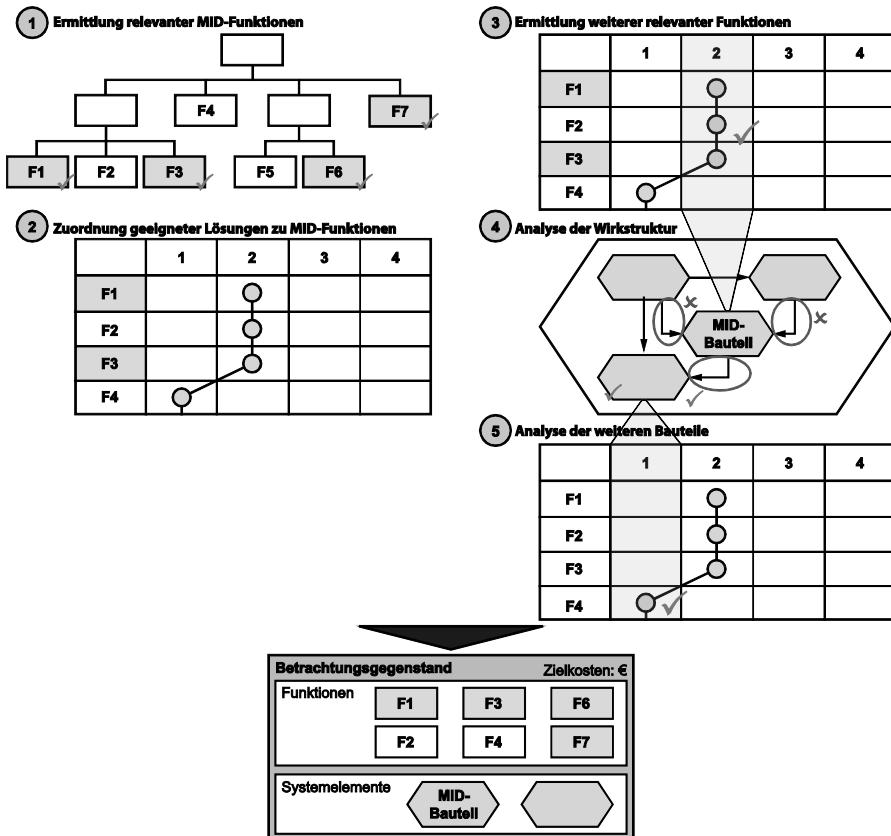


Bild 4-4: Schematischer Ablauf der Definition des Betrachtungsgegenstandes in fünf Schritten

Aus dem Entwicklungsauftrag bzw. der Anforderungsliste sind die Zielkosten zu entnehmen. Alle Elemente des Betrachtungsgegenstandes werden dokumentiert und wie in Bild 4-4 dargestellt. Der Betrachtungsgegenstand stellt die Grundlage für die weitere Kostenbewertung dar. Zur Definition des Betrachtungsgegenstandes werden in dieser Phase folgende **Hilfsmittel** eingesetzt:

- Modellierungstechnik CONSENS (vgl. Kap. 3.4.1 und Kap. 4.4)
- MID-Funktionen nach PEITZ (vgl. Kap. 2.3.1)
- Morphologischer Kasten nach ZWICKY [Zwi71]
- Erweiterter MID-Konstruktionskatalog (vgl. Kap. 3.3.2)

Das **Resultat** dieser Phase ist der Betrachtungsgegenstand. Dieser umfasst relevante Funktionen, Systemelemente sowie die Zielkosten des Produktes.

4.2.1.2 Phase 2: Zielkosten ermitteln

Die Basis für die Zielkostenermittlung bilden die Gesamt-Zielkosten für das zu entwickelnde Produkt. Sie sind Teil des Entwicklungsauftrages und können durch spezielle Methoden wie z.B. dem Target Costing (Kap. 3.2.2) ermittelt werden. Anschließend wird die Methode zur Ermittlung der Zielkosten angewandt. Diese wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und ist detailliert in Kapitel 4.3.1 erläutert. Zunächst wird der Hauptfunktionserfüllungsanteil des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstandes ermittelt. Die zentrale Fragestellung ist: Wie hoch ist der Anteil der Funktionen des Betrachtungsgegenstandes an der Erfüllung der Hauptfunktion? Denn: einzelne Funktionen tragen unterschiedlich stark dazu bei. Diese Anteile gilt es zu ermitteln. Dazu werden drei verschiedene Ansätze vorgeschlagen: Bottom-Up-Ansatz, Top-Down-Ansatz und der Überschlagsansatz. Diese werden in Kapitel 4.3.1 ebenfalls detailliert erläutert. Zudem wird eine Relevanzmatrix aufgestellt, um den Anteil an der Erfüllung der Hauptfunktion jeder Funktion des Funktionsbündels zu ermitteln. Die Bewertung muss für alle Varianten nur einmal durchgeführt werden. Abschließend wird die Funktionsträgerkostenmatrix über alle Funktionen und Systemelemente des Betrachtungsgegenstandes aufgespannt. Als **Resultat** dieser Phase liegen die Zielkosten für den Betrachtungsgegenstand vor.

Die nachfolgende Aufzählung listet die benötigten **Hilfsmittel** in dieser Phase auf:

- Modellierungstechnik CONSENS (vgl. Kap. 3.4.1 und Kap. 4.4)
- Methode zur Ermittlung der Zielkosten (vgl. Kap. 4.3.1)

4.2.1.3 Phase 3: Kostenkalkulation durchführen

Die zu kalkulierenden Kosten setzen sich aus Material- und Fertigungskosten zusammen. Zunächst wird analysiert, ob Investitionen entstehen und in welcher Höhe diese anzusetzen sind. Dies geschieht mittels strategischem Investitionskonzept. Anschließend wird das Wertschöpfungskonzept definiert und die Kostenkalkulation des Betrachtungsgegenstandes durchgeführt (vgl. Kap. 4.3.2). Die zu kalkulierenden Kosten können zu verschiedenen Zeitpunkten in der Entwicklung erhoben werden. Mit Voranschreiten der Entwicklung liegen detaillierte Informationen vor, diese ermöglichen eine genauere Vorhersage. Die zu Kostenkalkulation sollte so früh wie möglich durchgeführt werden, bereits im Systementwurf. Erste Gestaltinformationen sowie der Wirkzusammenhang der einzelnen Bauteile/Baugruppen kann eine gute erste Indikation geben. Es kann festgestellt werden, ob die Kostenziele überhaupt erreicht werden bzw. geeignete Maßnahmen zur Gegensteuerung definiert und durchgeführt werden. Je später diese im Entwicklungsprozess durchgeführt werden, desto teurer sind sie. Die Kostenentwicklung sollte während der Entwicklung immer wieder überprüft werden. Nachfolgend wird die initiale Erhebung der Kosten beschrieben.

Wertschöpfungskonzept definieren

In dieser Phase sind die Fertigungsalternativen zu bewerten. Im Kern gilt es eine Make-or-Buy-Entscheidung herbeizuführen, um auf ihrer Basis das finale Wertschöpfungskonzept festzulegen. Zur Entscheidungsfindung sind die Kosten je Zulieferteil zu bestimmen und gegenüberzustellen. Unter Umständen muss die Summe über mehrere Zulieferteile gebildet werden, um Angebote von einem Auftragsfertiger vergleichen zu können. Bemessungsgrundlage ist die kalkulierte Stückzahl. Zusätzlich sollte eine Kostenabschätzung bei abweichenden Verkaufszahlen durchgeführt werden, um die absolute Vorteilhaftigkeit auch bei anderen Stückzahlen sicherstellen zu können. Abschließend wird mit Hilfe der Methode OMEGA [Fah95], [GP14, S. 254ff.] das finale Wertschöpfungskonzept modelliert. Das Wertschöpfungskonzept gibt Aufschluss über Eigen- oder Fremdfertigung, die Reihenfolge der Prozesse sowie die beteiligten Abteilungen (Eigenfertigung) oder Zulieferer (Fremdfertigung) für jeden Prozessschritt.

OMEGA ist eine objektorientierte Methode zur Geschäftsmodellmodellierung und -analyse. Die Methode eignet sich sehr gut, um die Wertschöpfungskette mit allen relevanten Informationen abzubilden.

Herstellkosten bestimmen

Im letzten Schritt werden abschließend die Herstellkosten bestimmt. Für die Bewertung der Prozesse der Eigenfertigung ist die Kostenformel in der jeweiligen Prozesskarte dargestellt (vgl. Kap. 4.3.2). Die Zusammensetzung der Kostenvariablen ist in dem Kostenplan des Kostenmodells dargestellt. Bild 4-5 zeigt beispielhaft die Prozesskarte für den Einkomponentenspritzguss und den zugehörigen Ausschnitt aus dem Kostenplan. Die Prozesszeit hängt von verschiedenen Variablen ab. Für den Spritzguss sind dies z.B. die Anzahl der Nester oder die Größe des Bauteils. Die farbliche Kennzeichnung gibt an, wie sich die Prozesszeit bei einer Erhöhung der Variablenausprägung verhält. Wird z.B. die Anzahl der Nester erhöht, sinkt die Prozesszeit. Größere Bauteile haben eine längere Prozesszeit als kleinere. Die Prozesszeit muss individuell bestimmt werden. Hierfür muss auf Expertenwissen innerhalb des Unternehmens zurückgegriffen werden.

Der Maschinenstundensatz setzt sich aus der Sollmaschinenlaufzeit und den maschinen-abhängigen Fertigungsgemeinkosten zusammen. Diese gliedern sich wiederum in kalkulatorische Abschreibungen, Instandhaltungs-, Raum- und Energiekosten. Die Werkstoffkosten berechnen sich aus dem Volumen des Bauteils, dem Angussvolumen, Materialkoeffizient, Referenzmaterialkosten sowie der Dichte des Werkstoffs. Die benötigten Werte für die Kalkulation sind in der Regel im Unternehmen bekannt. Die Daten für die Werkstoffkosten können für ausgewählte Materialien aus der Materialdatenbank (vgl. Kap. 4.3.2.2) entnommen werden. Weiterführende Materialien finden sich in den gängigen Datenbanken (z.B. campusplastics¹³). Die Werkstoffkosten und die Bauteilkosten werden zu

¹³ Zu erreichen unter: <http://www.campusplastics.com>

den Materialeinzelkostenkosten synthetisiert und abschließend die Materialgemeinkosten aufgeschlagen. Die Herstellkosten ergeben sich aus der Summe von Materialkosten und Fertigungskosten.

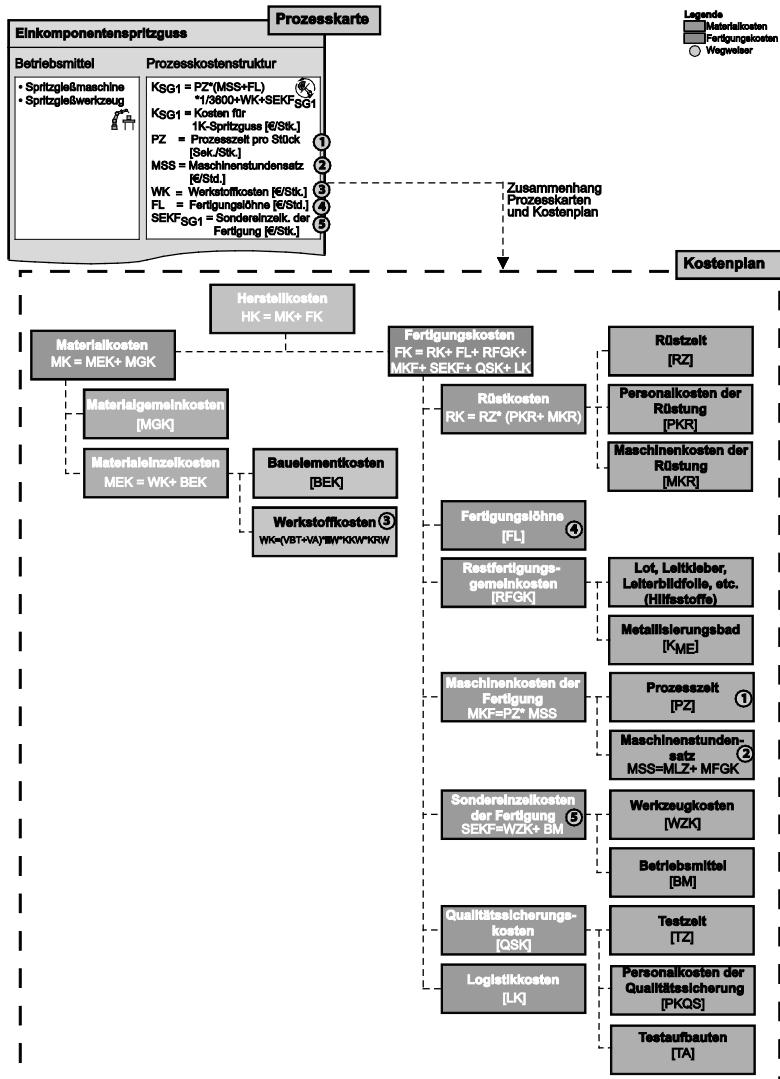


Bild 4-5: Zusammenhang Prozesskarten und Kostenplan für Einkomponentenspritzguss

Abschließend werden die kalkulierten Kosten den Zielkosten gegenübergestellt, um die absolute Vorteilhaftigkeit zu identifizieren. Als Maß für die absolute Vorteilhaftigkeit wird der Kostenvergleichsquotient (K_v) eingeführt. Er ergibt sich aus:

$$K_v = \frac{\text{Zielkosten}}{\text{Kalkulierte Kosten}}$$

Auf Basis des Kostenvergleichsquotienten werden Handlungsempfehlungen abgeleitet. Es können drei Fälle unterschieden werden: $K_v < 1$, $K_v > 1$ und $K_v = 1$.

- 1) Für $K_v < 1$ gilt, dass die kalkulierten Kosten größer sind als die Zielkosten. D.h. das Kostenziel kann nicht erreicht werden. Das Lösungskonzept ist zu überprüfen und hinsichtlich einer Kostenreduktion zu überarbeiten. Können die Zielkosten immer noch nicht erreicht werden, sollte das Konzept verworfen werden und eine andere Variante den Vorzug erhalten.
- 2) Für $K_v > 1$ gilt, dass die kalkulierten Kosten kleiner sind als die Zielkosten. Daraus resultiert, dass das Kostenziel erreicht worden ist, je größer der Quotient, desto geringer sind die kalkulierten Kosten im Verhältnis zu den Zielkosten. Das Lösungskonzept kann in der bestehenden Form beibehalten werden.
- 3) Für $K_v = 1$ gilt, dass die kalkulierten Kosten den Zielkosten entsprechen. D.h. die Zielkosten können genau eingehalten werden. Dabei entsteht das Risiko, dass bei kleinen Änderungen der Ausgangsbasis, das Lösungskonzept höhere Kosten verursacht. Die Zielkosten können dann nicht mehr eingehalten werden. Es ist kritisch zu prüfen, ob das Lösungskonzept in der bestehenden Form weiter verfolgt oder verworfen werden sollte. Es wird empfohlen, das Lösungskonzept hinsichtlich einer Kostenreduktion zu überarbeiten.

Das **Resultat** in dieser Phase bilden die bewerteten kalkulierten Kosten gegenüber den Zielkosten sowie eine daraus resultierende Handlungsempfehlung für die weiteren Entwicklungstätigkeiten hinsichtlich der Kostenvorgaben.

Die nachfolgende Aufzählung listet die benötigten **Hilfsmittel** in dieser Phase auf:

- Modellierungstechnik CONSENS (vgl. Kap. 3.4.1 und Kap. 4.4)
- Methode zur Bestimmung der Investitionen (vgl. Kap. 4.3.2.1)
- Prozesskarten (vgl. Kap. 4.3.2.2)
- Materialdatenbank (vgl. Kap. 4.3.2.2)
- Kostenplan (vgl. Kap. 4.3.2.2)
- Methode OMEGA [Fah95], [GP14, S. 254ff.]

4.2.2 Einordnung in den Entwicklungsprozess

Die *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID* wird in der Praxis nicht losgelöst von der eigentlichen Entwicklung eingesetzt werden. Vielmehr ist sie begleitend anzuwenden. Sie gliedert sich in den Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme in der Technologie MID ein. Eine entsprechende Entwicklungssystematik wurde in Kap. 2.4.3 beschrieben. Bild 4-6 zeigt die Einordnung des Vorgehens zur Kostenbewertung im Systementwurf in den entsprechenden Entwicklungsprozess für MID.

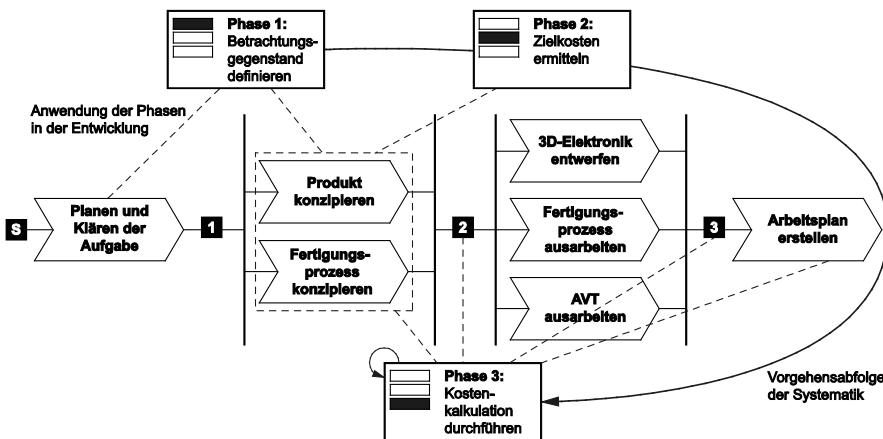


Bild 4-6: Einordnung der Phasen der Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID in die Entwicklungs- systematik nach KAISER [Kai09, S. 78]

Betrachtungsgegenstand definieren: Auf Basis der vorliegenden Entwicklungsartefakte kann der Betrachtungsgegenstand bereits während der Phasen *Planen und Klären der Aufgabe* und der *Produkt- bzw. Fertigungsprozesskonzipierung* stattfinden. Der Ablauf ist in Kap. 4.2.1.1 beschrieben.

Zielkosten ermitteln: Zur Bestimmung der Zielkosten werden die Funktionen des Betrachtungsgegenstandes sowie die funktionsumsetzenden Systemelemente benötigt. Die Ermittlung erfolgt während der Konzipierung von Produkt und Fertigungssystem. Die Zielkostenermittlung ist in Kap. 4.3.1 beschrieben.

Kostenkalkulation durchführen: Die vorliegende Spezifikation des Produkts und Produktionssystems, mit Fokus auf den Betrachtungsgegenstand, bildet die Basis für die Ermittlung der zu kalkulierenden Kosten.

Das Ermitteln der Zielkosten kann zu späteren Zeitpunkten in der Entwicklung wiederholt werden um ein Kostenmonitoring über den Entwicklungsverlauf zu erhalten. Mit Voran-

schreiten der Entwicklung wird das Produkt- und Produktionssystemkonzept weiter detailliert. Es steigt die Informationsgüte und damit einhergehend steigt auch die Genauigkeit der Kostenbewertung des Produkts. Das Vorgehen wird in Kap. 4.3.2 näher erläutert.

4.3 Kostenmodell

Das Kostenmodell beinhaltet alle Hilfsmittel die für die Kostenbewertung notwendig sind. Die Bewertung geschieht vor dem Hintergrund der kalkulierten Kosten und Zielkosten. Zu deren Ermittlung stehen dedizierte Hilfsmittel zur Verfügung. Diese werden in den folgenden Abschnitten gemäß ihres Ermittlungszwecks näher erläutert.

4.3.1 Zielkosten

Zur Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit sind zunächst die Zielkosten zu ermitteln. Dazu werden die Funktionsträgerkosten ermittelt. Sie beschreiben jene Kosten, die anfallen, um einen Funktionsträger zu realisieren. Sie leiten sich von den Funktionskosten ab. Funktionskosten sind die gesamten Herstellkosten, die zur Ermöglichung einer Funktion anfallen [EKL07, S. 264]. Die Funktionsträgerkosten werden mittels gleichnamiger Matrix erhoben. Sie wurde in Anlehnung an die Funktionskostenmatrix entwickelt [Joo06, S. 306f.]. In der Funktionsträgerkostenmatrix werden die Funktionen, Bauteile/-gruppe sowie der Funktionserfüllungsgrad des jeweiligen Bauteils/-gruppe bewertet. Zunächst muss ein geeigneter Bewertungsansatz ausgewählt werden um anschließend die Funktionskosten bestimmen zu können.

Bewertungsansatz auswählen

Dazu muss zunächst der Kostenanteil des Betrachtungsgegenstandes an den Gesamtkosten ermittelt werden. Dazu wird häufig die Conjoint Analyse empfohlen. Die Ermittlung des Produktnutzens für den Kunden mit Hilfe der Conjoint Analyse ist mitunter sehr aufwändig und kann in frühen Entwicklungsstadien nicht immer adäquat durchgeführt werden. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit die Gewichtung der Einzelfunktionen mittels Relevanzanalyse empfohlen und durchgeführt. Für die zuvor notwendige Ermittlung des Hauptfunktionserfüllungsanteils (HEA) – Anteil von Funktionen an der Erfüllung der Hauptfunktion – des Betrachtungsgegenstandes wurden drei Ansätze definiert:

- 1) **Bottom-Up-Ansatz:** Es wird die Funktionshierarchie für das gesamte Produkt betrachtet. Alle Funktionen auf unterster Ebene werden gegeneinander mittels Relevanzanalyse bewertet. Dies führt mitunter zu einem erheblichen Aufwand für die Gewichtung der Einzelfunktionen. Der Genauigkeitsgrad ist hier am höchsten.
- 2) **Top-Down-Ansatz:** Auch hier wird die Funktionshierarchie des gesamten Produkts betrachtet. Jedoch wird hier von der Hauptfunktion ausgehend jede Ebene mit der Relevanzanalyse bewertet. Dies kann dazu führen, dass manche Funktionen mit null Prozent bewertet werden, da sie eine Subfunktion darstellen, die nicht

weiter untergliedert wird. Im direkten Vergleich scheinen diese Funktionen dann weniger relevant. Bei diesem Ansatz werden Äste, die keine Funktion des Betrachtungsgegenstandes beinhalten, nicht weiter betrachtet. Anschließend wird die Summe über die Funktionen des Betrachtungsgegenstandes gebildet. Dieser ist der Grundwert für die Relevanzanalyse des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstandes. Dies verringert den Aufwand der Bewertung. Die Genauigkeit des Ansatzes ist gut.

- 3) **Überschlagsansatz:** Bei diesem Ansatz liegt die Hypothese zu Grunde, dass bei den betrachteten Systemen keine wesentlichen Unterschiede bei der Wichtigkeit der Funktionen vorliegen. D.h. jede Funktion trägt im Durchschnitt gleichermaßen zur Erfüllung der Hauptfunktion bei. Für den Hauptfunktionserfüllungsanteil wird dann die Anzahl der Funktionen des Betrachtungsgegenstandes durch die Summe der Subfunktionen geteilt. Das Ergebnis ist der Grundwert für die Relevanzanalyse des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstandes:

$$HEA = \frac{\text{Anzahl Funktionen des Betrachtungsgegenstands}}{\text{Anzahl Subfunktionen des Systems}}$$

Der Aufwand für die Bewertung sowie die Genauigkeit sind hier am geringsten. Für eine überschlägige Kalkulation in der Konzipierung mit Fokus auf die MID-Baugruppe reicht diese mitunter aus.

Der Ansatz ist individuell für das zu entwickelnde System auszuwählen. Dabei spielen unterschiedliche Kriterien wie z.B. Anzahl der Funktionen, Anzahl der Funktionen des Betrachtungsgegenstandes oder Anzahl der Systemelemente eine Rolle.

Das weitere Vorgehen wird im Folgenden anhand eines abstrakten Beispiels dargelegt. Der Betrachtungsgegenstand umfasst vier Funktionen (*eigene Position bestimmen, Distanz zu Objekten messen, elektronische Bauteile kontaktieren und Bauteile tragen*) und besteht aus zwei Systemelementen (*Abstandssensor und MID-Schaltungsträger*). Zur Bestimmung des Hauptfunktionserfüllungsanteils wird der Überschlagsansatz ausgewählt. Es wird beispielhaft ein HEA von 30% zugrunde gelegt. Die Zielkosten werden mit 5€ kalkuliert.

Relevanzmatrix aufstellen und Funktionsgewichtung durchführen

Im nächsten Schritt gilt es die Funktionen zu gewichten. Dies geschieht mittels Relevanzanalyse, indem die Funktionen gegeneinander bewertet werden. Nachfolgend wird die Funktionsträgerkostenmatrix aufgestellt und die zulässigen Zielkosten identifiziert.

Bild 4-7 zeigt die Relevanzmatrix für die vier Funktionen *eigene Position bestimmen, Distanz zu Objekten messen, elektronische Bauteile kontaktieren und Bauteile tragen*.

Die Relevanzanalyse beruht auf dem paarweisen Vergleich der Funktionen in einer Relevanzmatrix. Der Relevanzanalyse liegt die Fragestellung zu Grunde: Ist die Funktion i in der Zeile wichtiger zur Erfüllung der Hauptfunktion als die Funktion j in der Spalte?

Ist dies der Fall, wird eine 1 in die betreffende Zelle gesetzt, andernfalls eine 0. Anschließend ist die Zeilensumme zu bilden. Die Relevanzmatrix ist eine obere Dreiecksmatrix. D.h. es müssen nur die Zellen oberhalb der Diagonalen ausgefüllt werden, die Zellenwerte unterhalb der Diagonalen ergeben sich.

Die Zeilensumme jeder Funktion wird normiert und anschließend auf den HEA des Betrachtungsgegenstandes umgelegt. Für Funktion 1 und Funktion 2 ergibt sich jeweils ein Anteil von 10%, für Funktion 3 und Funktion 4 ergeben sich jeweils 5%.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	Summe	Anteil auf 100%	Anteil auf 30%
1)	-	1	1	0	2	33,33	10
2)	0	-	1	1	2	33,33	10
3)	0	0	-	1	1	16,67	5
4)	1	0	0	-	1	16,67	5
					6	100	

Bewertungsmaßstab:

0 = Zeile ist unwichtiger als Spalte

1 = Zeile ist wichtiger als Spalte

Bild 4-7: Relevanzmatrix zur Funktionsgewichtung

Im darauf folgenden Schritt wird die Funktionsträgerkostenmatrix erstellt. Spaltenweise werden die Funktionen eingetragen. In der ersten Zeile wird die Gewichtung der Funktionen eingetragen, die sich aus der Relevanzanalyse ergeben haben. In den nachfolgenden Zeilen werden die Systemelemente (SE) des Betrachtungsgegenstandes eingetragen.

Bild 4-8 zeigt eine ungewichtete Funktionsträgerkostenmatrix. In den Zellen wird der Erfüllungsanteil für das betrachtete Bauteil/-gruppe an der Funktion bewertet. Also: Wie groß ist der Anteil von SE 1 an der Erfüllung von Funktion 1? Die Bewertung wird von dem Projektteam vorgenommen. An der Funktion *eigene Position bestimmen* hat der *Abstandssensor* einen Anteil von 10% (0,1), der *MID-Schaltungsträger* hingegen hat einen Anteil von 2,5% (0,025) an der Erfüllung der Funktion.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	Summe der Bewertung
Gewichtung der Funktion	0,1	0,1	0,05	0,05	0,3
Abstandssensor	0,1	0,3	0,05	0	
MID-Schaltungsträger	0,025	0,04	0,2	0,2	

Bild 4-8: Ungewichtete Funktionsträgerkostenmatrix

Im letzten Schritt wird die gewichtete Funktionsträgerkostenmatrix aufgestellt. Dazu werden die Bewertungen mit der Funktionsgewichtung multipliziert: z.B. Die Gewichtung der Funktion *Distanz zu Objekten messen* (0,1) mit dem Erfüllungsanteil des *Abstandssensors* (0,3). Für die gewichtete Funktionsträgerkostenmatrix ergibt sich für diese Zelle ein Wert von 0,03 (vgl. Bild 4-9). Diese Operation wird für alle Zellen durchgeführt. In der vorletzten Zeile werden die Zeilensummen gebildet. Sie spiegelt den Anteil des Bau- teils an der Erfüllung der Hauptfunktion wieder. Die Summe wird mit den Zielkosten multipliziert. Die Zielkosten sind im Betrachtungsgegenstand dokumentiert.

Der *Abstandssensor* weist eine Summe von 0,0425 auf. Für den *MID-Schaltungsträger* ergibt sich eine Summe von 0,0265. Diese werden mit den Zielkosten multipliziert. In der letzten Spalte werden die zulässigen Zielbauteilkosten angegeben. Für den *Abstandssensor* belaufen sich diese auf 0,21€, für den *MID-Schaltungsträger* sind es 0,13€ (vgl. Bild 4-9). Für den gesamten Betrachtungsgegenstand ergeben sich somit Zielkosten in Höhe von 0,34€.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	Summe der Bewertung	Zielbauteilkosten
Gewichtung der Funktion	0,1	0,1	0,05	0,05		
Abstandssensor	0,01	0,03	0,0025	0	0,0425	0,21 €
MID-Schaltungsträger	0,0025	0,004	0,01	0,01	0,0265	0,13 €
Kostensumme						0,34 €

Bild 4-9: Gewichtete Funktionsträgerkostenmatrix

4.3.2 Kostenkalkulationsmodell

Das Modell bildet den Rahmen für die Durchführung der Kostenkalkulation. Es nutzt Informationen aus der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Im Kern besteht es aus zwei Bausteinen: Wertschöpfungskonzept und Kostenermittlung. Der Baustein Kostenermittlung ist wiederum in die Prozessebene (Hilfsmittel zur Kalkulation der Prozesskosten) und die Elementebene (Kostenplan) unterteilt. Der Kostenplan enthält alle relevanten Aspekte für die Kostenbewertung. Das Kostenmodell ist in Bild 4-10 dargestellt. Die Bausteine werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

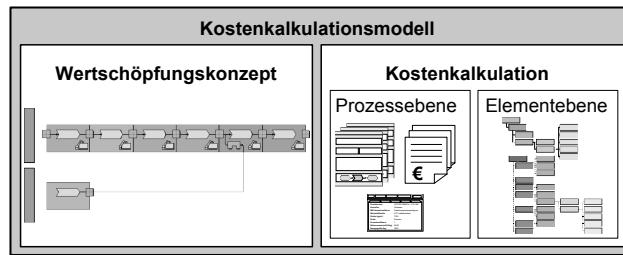


Bild 4-10: Kostenmodell mit Kostenstrukturausteinen und zugewiesenen Hilfsmitteln

4.3.2.1 Wertschöpfungskonzept

Der Baustein beschreibt Wertschöpfungskonzept (vgl. Kap. 4.2.1.3). Es zeigt die Prozessschritte und wer diese durchführt. Innerhalb des Wertschöpfungskonzeptes wird zwischen Eigen- und Fremdfertigung differenziert. Dies ist die Schnittstelle zur nächsten Ebene. Zunächst wird das Investitionskonzept bestimmt. Es gibt Aufschluss über vorhandene Kapazitäten und Kompetenzen in Bezug auf die benötigten Prozessschritte.

Investitionen bestimmen

Zur Definition des strategischen Investitionskonzepts wurde in Anlehnung an das Technologieportfolio nach GAUSEMEIER et al. [GP14, S. 130f.] und das modifizierte Technologieportfolio nach NORDSIEK [Nor12, S. 116ff.] das Prozessportfolio entwickelt. Im Prozessportfolio werden die relativen Kompetenzen und die relativen Kapazitäten, bezogen auf den jeweiligen Prozess, visualisiert. Die relativen Kompetenzen setzen sich aus dem vorhandenen Kompetenzlevel und dem benötigten Kompetenzlevel zusammen. Die relativen Kapazitäten werden analog dazu aus den vorhandenen Kapazitäten und den benötigten Kapazitäten berechnet. Zur einfacheren Einstufung der Kompetenzen stehen Kompetenzkarten zur Verfügung. Bild 4-11 zeigt die Kompetenzkarte für das Bestücken. In ihr wird das vorhandene Kompetenzlevel dokumentiert. Die Skala reicht von 0 bis 5 (vgl. Bild 4-11, rechts). Die möglichen Ausprägungen sind für alle Prozesse gleich. Für die Einstufung des benötigten Kompetenzlevels sind zur besseren Orientierung Vorschläge möglicher Ausprägungen definiert worden. Diese sind spezifisch für jeden Prozess. Weitere Kompetenzkarten sind in Anhang A1 zu finden.



Bild 4-11: Kompetenzkarte für das Bestücken (links) und Ausprägungen für vorhandene Kompetenzen (rechts)

Die benötigten Stückzahlen können der Anforderungsliste entnommen werden. Die vorhandenen Kapazitäten sind kurzfristig zu beschaffen. Alle bewerteten Prozesse werden in das Prozessportfolio eingetragen. Bild 4-12 zeigt das Prozessportfolio mit den Verweisen auf die zugehörigen Normstrategien im Hinblick auf das strategische Investitionskonzept.

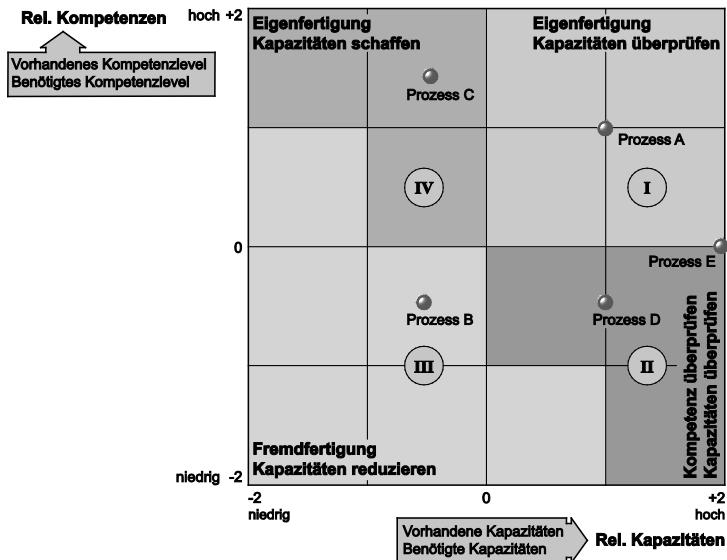


Bild 4-12: Prozessportfolio

Die Achsen geben eine Relativität an. Die Nulllinien beschreiben ein ausgeglichenes Verhältnis. Eine positive Abweichung besagt, dass ein höheres Kompetenzlevel im Unternehmen vorhanden ist, als benötigt wird. Analog dazu bestehen bei einer positiven Abweichung Überkapazitäten in Bezug auf die zu erwartende Stückzahl des Produkts. Die Bewertung erfolgt für jeden zuvor definierten Prozessschritt des Fertigungsprozesses. Dieser wird entsprechend seiner Bewertung in das Portfolio eingeordnet. Das Portfolio ist in vier Bereiche eingeteilt, welche jeweils eine Normstrategie vorgeben. Die Normstrategien sind zusätzlich zu dem betrachteten Produkt auch zusätzlich im Unternehmenskontext zu bewerten. Die Normstrategien sind folgende:

- I. Für Prozesse in diesem Bereich weist das Unternehmen eine höhere Kompetenz auf, als das Produkt benötigt. Das Produkt kann dementsprechend gefertigt werden. Zudem bestehen Überkapazitäten in Bezug auf die zu erwartende Stückzahl im Unternehmen. Es ist daher zu überprüfen, ob die Kapazitäten langfristig benötigt werden, oder ob diese reduziert werden können. Prozesse in diesem Bereich sollten grundsätzlich eigengefertigt werden. Entstehende Kosten müssen auf das Produkt umgelegt werden.

- II.** Prozesse in diesem Bereich sind kritisch zu betrachten. Das Kompetenzlevel reicht nicht für die Produktion aus. Es stehen jedoch genug Kapazitäten für die Fertigung zur Verfügung. Es ist zu überprüfen, ob ein Kompetenzaufbau strategisch sinnvoll ist. Ist dies nicht sinnvoll sollten Kapazitäten abgebaut und der Prozess an einen Auftragsfertiger ausgelagert werden. Wird der Kompetenzaufbau befürwortet, ist der Prozess unternehmensintern durchzuführen.
- III.** Für Prozesse in diesem Bereich gilt, dass das Unternehmen ein zu geringes Kompetenzlevel aufweist, zudem bestehen zu geringe Kapazitäten für die Fertigung. Vorhandene Kapazitäten sollten abgebaut werden. Für die Durchführung des Prozessschritts sollte ein geeigneter Auftragsfertiger gefunden werden.
- IV.** Prozesse in diesem Bereich zeichnen sich durch ein höheres Kompetenzlevel aus, als benötigt wird. Es besteht allerdings Handlungsbedarf in Bezug auf die benötigten Kapazitäten. Es wird eine Hybridstrategie empfohlen. Die vorhandenen Kapazitäten sollten ausgeschöpft werden. Weitere Kapazitäten sind durch einen Auftragsfertiger zu beschaffen.

Wertschöpfungskonzept definieren

Anhand der Normstrategien sollte entschieden werden, ob neue Investitionen getätigt werden oder die Fertigung an Dritte fremdvergeben wird. Für Prozesse bei denen beide Varianten in Betracht gezogen werden, müssen die Kosten einer Fremdfertigung mit denen der Eigenfertigung verglichen werden. Dazu wird wie in Kap. 4.2.1.3 beschrieben vorgegangen. Neben den Kosten spielen noch weitere Aspekte wie z.B. Know-how-Schutz oder langfristige Fertigungstiefe eine Rolle. Sie erfahren hier jedoch keinerlei tiefergehende Betrachtung. Die entstehenden Investitionen für die Eigenfertigung sind anteilig auf die MID-Baugruppe umzulegen. Für die fremdgefertigten Prozesse müssen Angebote eingeholt werden. Auf Basis der vorliegenden Informationen wird das Wertschöpfungskonzept definiert. Im Kern gilt es eine Make-or-Buy-Entscheidung herbeizuführen. Im Wertschöpfungskonzept wird die Wertschöpfungskette dokumentiert.

Abschließend wird mit Hilfe der Methode OMEGA [Fah95], [GP14, S. 254ff.] das finale Wertschöpfungskonzept modelliert.

4.3.2.2 Kostenermittlung

Für alle Prozesse der Eigenfertigung, sind nach der Bewertung mittels Prozesskarten, die Materialgemeinkosten bzw. Fertigungs- zu erheben, sofern diese noch nicht berücksichtigt wurden. Sie fließen in die Ermittlung der Herstellkosten mit ein. Ferner sind sie Teil der Bewertungsgrundlage für die Make-Or-Buy-Entscheidung. Für die fremdgefertigten Prozesse sind Angebote von einem Auftragsfertiger als Informationsbasis einzuholen. Die Hilfsmittel der Prozessebene und der Elementebene werden nachfolgend näher erläutert. Die Materialdatenbank und die Prozesskarten sind Teil der Prozessebene. Der Kostenplan ist der Elementebene zugeordnet.

Materialdatenbank

Zur Unterstützung der Berechnung der Materialkosten wurde eine Datenbank in MS Excel aufgebaut. Sie ist in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2225 Blatt 2 „technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Tabellenwerk“ [VDI2225-2] entstanden. Die Datenbank erhält wesentliche Materialparameter, die für die Auswahl eines geeigneten Werkstoffs relevant sind, z.B. Schmelztemperatur, E-Modul, Bruchspannung. Zur Ermittlung der Werkstoffkosten können die relevanten Parameter aus der Materialdatenbank abgerufen werden.

Es existieren bereits weitverbreitete Datenbanken für die Suche nach geeigneten Kunststoffen, auch für die Technologie MID, wie z.B. *campusplastics*¹⁴. Die entwickelte Datenbank enthält einige für MID relevante Werkstoffe und ergänzt die Angaben um den Kostenaspekt. Mit der entwickelten Datenbank wird vor allem ein Schema für die Materialkostenbewertung vorgestellt.

Bild 4-13 zeigt die Registerkarte Produktmerkmale für den Werkstoff Vectra E820iPD in der Materialdatenbank. Die gezeigte Registerkarte ist ein Mock-Up: Es kann nach Werkstoffen gesucht werden, sowie neue Werkstoffe in die Datenbank eingepflegt werden. Die Preise der Referenzwerkstoffe lassen sich über die entsprechende Schaltfläche aktualisieren. Die Werkstoffdaten gliedern sich in fünf Bereiche: Produktmerkmale, Verarbeitung, mechanische Eigenschaften, elektronische Eigenschaften und thermische Eigenschaften. Zu den **Produktmerkmalen** gehören allgemeine Angaben wie der Name, Hersteller und die Werkstofffamilie. Des Weiteren ist in dieser Ansicht der Kostenkoeffizient ersichtlich und der Preis für den Referenzwerkstoff. In diesem Fall entspricht der gezeigte Werkstoff dem Referenzwerkstoff. Der Kostenkoeffizient ist dann mit 1 angegeben. Kennzahlen für die **Verarbeitung** sind z.B. die Schmelztemperatur, die Temperatur für den Spritzguss und die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Zu den **mechanischen Eigenschaften** gehören z.B. die Bruchspannung und -dehnung. Zu den **elektronischen Eigenschaften** zählt bspw. der spezifische Durchgangswiderstand. Auf der letzten Registerkarte finden sich die **thermischen Eigenschaften**. Hier sind z.B. der thermische Längenausdehnungskoeffizient in Längsrichtung und Querrichtung zu finden.

¹⁴ zu erreichen unter: <http://www.campusplastics.com>

Suche				
Drucken	Bearbeiten	Neuer Werkstoff	Referenzwerkstoff	
Produktmerkmale				
Produktname	VECTRA E820iPd - LCP-X40	Mechanische Eig.	Elektronische Eig.	Thermische Eig.
Hersteller	Celanese			
MID-Herstellerverfahren	Zweikomponentenspritzguss			
Werkstofffamilie	LCP (metallisierbar)			
Dichte (kg/m ³)	1790			
Farbe	schwarz			
Kostenkoeffizient	1			
Referenzwerkstoff (€/kg)	30,00			
Bezugsgröße (kg)	1000			

Bild 4-13: Mock-Up der Materialdatenbank für den Werkstoff Vectra E820iPd

Prozesskarten

Die Prozesskarten wurden entwickelt, um den Anwendern eine Orientierungshilfe zu bieten. Speziell mit der Technologie MID wenig vertraute Anwender werden unterstützt. Ferner stiften die Karten Nutzen indem Kontakt Personen, mögliche Lieferanten und weitere Normen, Vorschriften und Richtlinien direkt mit dem jeweiligen Prozessschritt verknüpft werden können. Bild 4-14 zeigt die Schablone für die Prozesskarten.

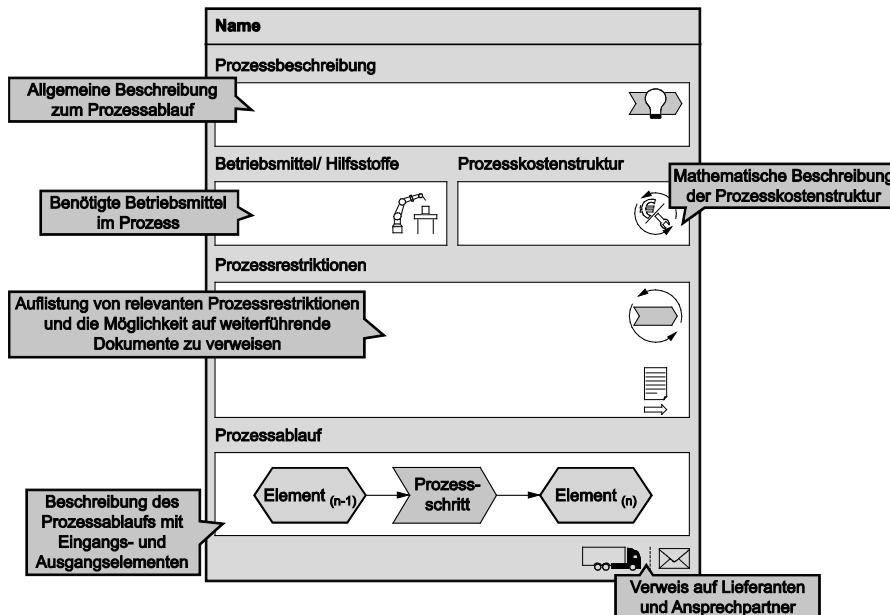


Bild 4-14: Schablone für Prozesskarten

Der Aufbau der Prozesskarten gliedert sich wie folgt: Im Feld **Name** wird der Prozessname vermerkt. Eine **Prozessbeschreibung** gibt eine kurze Erläuterung über den Prozess selbst und dessen Ablauf. Auf den Karten ist zudem vermerkt, welche **Betriebsmittel** und **Hilfsstoffe** zur Durchführung benötigt werden. Die **Prozesskostenstruktur** wird mittels einer Kostenfunktion beschrieben. Die Kostenfunktion beschreibt die Variablen, die für die Kostenbewertung des Prozessschrittes auszuprägen sind und in welcher Form sie zusammenhängen. Die Kostenfunktion kann durch den Anwender angepasst werden. Wesentliche **Prozessrestriktionen** werden direkt auf der Karte vermerkt. Das Piktogramm unten rechts im Prozessrestriktionen-Feld stellt einen Verweis auf weiterführende Dokumente dar. So lassen sich alle relevanten weiterführenden Informationen direkt dem jeweiligen Prozess zu ordnen. Zudem wird der prinzipielle **Prozessablauf** dargestellt. Es werden das jeweilige Eingangselement, der Prozessschritt und das resultierende Ausgangselement beschrieben. Dies hilft dem Anwender die Prozesskette zu definieren und unterstützt zugleich bei der Definition der Baustuktur. Unten rechts auf der Prozesskarte können Lieferanten verknüpft werden, sowie Ansprechpersonen innerhalb oder außerhalb der Organisation die als Kow-how-Träger dienen oder für den entsprechenden Prozess verantwortlich sind.

Kostenplan

Der Kostenplan enthält alle für die Kostenbewertung relevanten Kostenaspekte. Die Berechnung lehnt sich an die Kalkulation der Herstellkosten der Kosten- und Leistungsrechnung (KLR) aus der Betriebswirtschaftslehre an. Bild 4-15 zeigt die hierarchische Gliederung des Kostenplans. Innerhalb des Plans werden Material- und Fertigungskosten differenziert. Die Materialkosten setzen sich aus Materialeinzel- und Materialgemeinkosten zusammen. Die Materialeinzelkosten werden aus der Summe der Werkstoffkosten und Bauelementkosten gebildet. Ferner sind sie Bezugsgrundlage für den Materialgemeinkostenaufschlag. Zur einfachen Berechnung der Materialkosten wurde, bezogen auf den Referenzwerkstoff, für jeden Werkstoff ein relativer Umrechnungsfaktor (Kostenkoeffizient) ermittelt. Mit Hilfe des Gestaltmodells (grobe Abschätzung des Volumens) lässt sich so der Werkstoffverbrauch monetär bewertbar machen. Als Berechnungsgrundlage wird folgende Formel vorgeschlagen:

$$WK = (V_{BT} + V_A) * \rho_w * KK_W * K_{RW}$$

WK = Werkstoffkosten

V_{BT} = Volumen Bauteil

V_A = Volumen Anguss

ρ_w = Dichte Werkstoff

KK_W = Kostenkoeffizient Werkstoff

K_{RW} = Kosten Referenzwerkstoff

Die Fertigungskosten setzen sich aus Rüstkosten, Fertigungslöhnen, Restfertigungsgemeinkosten, Maschinenkosten der Fertigung, Sondereinzelkosten der Fertigung, Qualitätssicherungskosten (QS-Kosten) sowie Logistikkosten zusammen. Die Aufteilung der genannten Kostenformen lehnt sich ebenfalls an die Vorgaben aus der KLR an. Weiter differenziert werden die Rüstkosten und Maschinenkosten der Fertigung. Die Rüstkosten setzen sich aus der Rüstzeit sowie Personal- und Maschinenkosten die für die Rüstung benötigt werden zusammen. Die Maschinenkosten werden aus der Prozesszeit sowie dem Maschinenstundensatz (MSS) gebildet. Zu den Fertigungskosten zählen weiter die Fertigungslöhne. Sie unterscheiden sich von den Personalkosten der Rüstung und Personalkosten der QS, da sie direkt während der Fertigung des Produktes entstehen. Zu den Restfertigungsgemeinkosten zählen allg. Hilfsstoffe wie z.B. Lot oder Leitkleber. Hilfsstoffe gehen direkt in das Produkt mit ein, im Gegensatz zu Betriebsstoffen, die z.B. für den Betrieb einer Maschine benötigt werden, aber nicht ins Produkt eingehen. Zu ihnen zählen Druckluft oder Schmierstoffe. Die Maschinenkosten der Fertigung setzen sich aus der benötigten Prozesszeit sowie dem Maschinenstundensatz (MSS) zusammen. Mögliche Investitionen werden durch den MSS berücksichtigt. Weitere Fertigungskosten sind die Sondereinzelkosten der Fertigung wie z.B. Werkzeugkosten und Betriebsmittel, Qualitätssicherungskosten sowie Logistikkosten.

Es müssen nicht alle Kostenarten bewertet werden, nur jene, die auch für das betrachtete Produkt im Unternehmen anfallen.

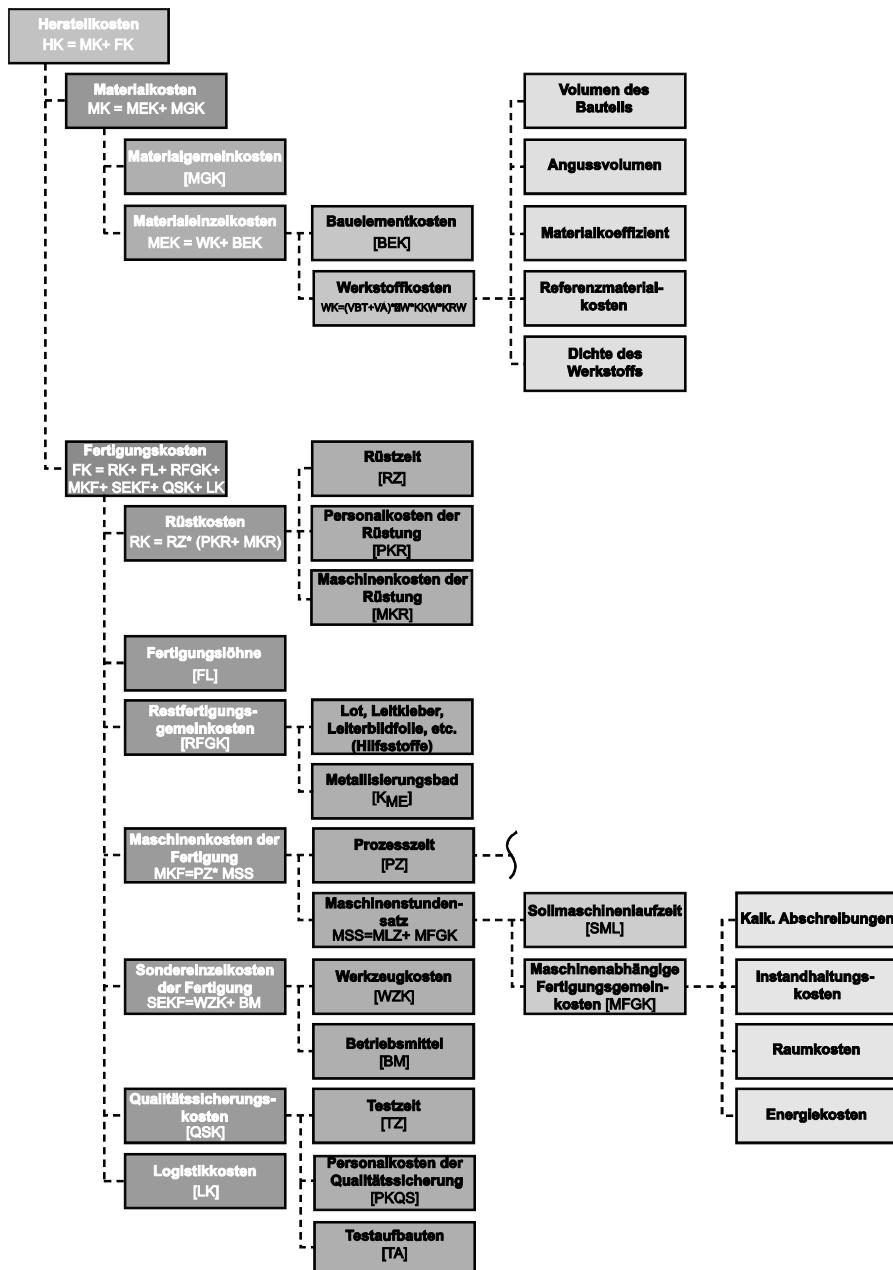


Bild 4-15: Hierarchische Struktur des Kostenplans in Anlehnung an [Mül06, S. 172], [FSS14, S. 877]

Zur Erhebung der Prozesszeit sind für die häufig bei der Fertigung von MID-Baugruppen verwendeten Prozessschritte Einflusskriterien definiert worden. Die grün hinterlegten Kriterien reduzieren die Prozesszeit je Bauteil, wenn ihre Ausprägung ansteigt. Die rot hinterlegten Kriterien erhöhen die Prozesszeit. Ein Beispiel: Wird beim Spritzgießen die Anzahl der Nester erhöht, reduziert dies die Prozesszeit. Wird hingegen der Schließweg des Werkzeugs verlängert, erhöht sich auch die Prozesszeit. Die Kriterien dienen als Orientierung für eine optimale Auslegung des Prozesses im Hinblick auf die Prozesszeit. Sie muss individuell für jedes Bauteil bestimmt werden.

	Prozesszeit □	Einflussgrößen auf den jeweiligen Prozess*				Prozesszeit □
		Anzahl der Nester		Größe des Bauteils	Schließweg	
Spritzgießen						
Strukturieren		Anzahl Laserquellen	Anzahl Bauteile im Bauraum	Zu strukturierende Fläche	Anzahl Umpositionierungen	
Metallisieren		Trommel-metallisierung	Anzahl Bauteile im Bad	Gestellmetallisierung	Schichtdicke	
Bestücken				Anzahl Bauelemente	Anzahl Bestückpositionen	Anzahl Bestückflächen
Verbinden				Größe des Bauteils		
Montage				Anzahl der Bauteile		

*Der Einfluss auf die Prozesszeit wird aufgrund eines Ansteigens der Ausprägung je Kriterium angenommen

Bild 4-16: Übersicht der Kriterien auf die Prozesszeit

4.3.2.3 Informationsfluss des Kostenkalkulationsmodells

Die zwei Bausteine des Kostenkalkulationsmodells stehen eng in Relation zu einander. Auf den Ebenen werden verschiedene Kostenaspekte beschrieben. Bild 4-17 zeigt den Informationsfluss zwischen den Ebenen. Im Baustein Wertschöpfungskonzept werden die Informationen zur Bestimmung der Einflussgrößen festgelegt. Es wird definiert, welche Prozesse eigen- und fremdvergeben werden. Die Prozesse der Eigenfertigung werden im Baustein Kostenermittlung durch die Kostenstrukturformeln der Prozesskarten weiter mit Informationen angereichert. Diese liefern wiederum Informationen über die zu bestimmenden Einflussgrößen in den Kostenformeln. Auf Elementebene können diese mit Hilfe des Kostenplans bestimmt werden. Die Informationen über die Prozesskosten werden in der Prozessebene abgebildet. Weitere Informationen über die Prozesskosten werden durch die Angebote der Auftragsfertiger bereitgestellt. Die Informationen werden zu den Produktkosten synthetisiert, welche wiederum im Wertschöpfungskonzept dargestellt werden.

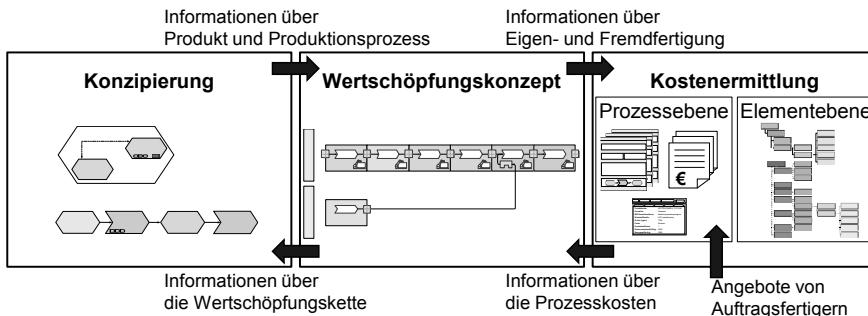


Bild 4-17: *Informationsfluss zur Kostenbestimmung*

4.4 Modellierungssprache

Die Beschreibung der Prinziplösung eines mechatronischen Systems, welche im Systementwurf entsteht, bildet den Ausgangspunkt für die anschließende Konkretisierung und stellt eine einheitliche Basis für Analysen des Systems bereit. GAUSEMEIER ET AL. haben für die Beschreibung der Prinziplösung des Produkts und Produktionssystems die Modellierungstechnik CONSENS entwickelt [GLL+12]. Produkt und Produktionssystem werden anhand eines kohärenten Systems aus Partialmodellen beschrieben (vgl. Kap. 3.4.1).

Die wesentlichen Aspekte zur Kostenbewertung sind die Produkt- und Produktionssystemanforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt, Prozesse sowie Ressourcen, die sie ausführen. Sie enthalten wichtige Informationen für die Bewertung des Systems sowie für die Festlegung des Wertschöpfungskonzepts. Die Partialmodelle Produktanforderungen, Funktionen, Wirkstruktur und Gestalt werden im Rahmen der Konzipierung des Produktes erarbeitet. Die Partialmodelle Produktionssystemanforderungen, Prozesse und Ressourcen werden bei der Konzipierung des Produktionssystems erarbeitet. Die Modellierungstechnik wird durchgängig angewandt. Vereinzelt wurden die Partialmodelle im Rahmen dieser Arbeit erweitert, um den Anforderungen zur Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID gerecht zu werden. Bild 4-18 zeigt die zusätzlichen Konstrukte und wo sie innerhalb der Modelle Verwendung finden.

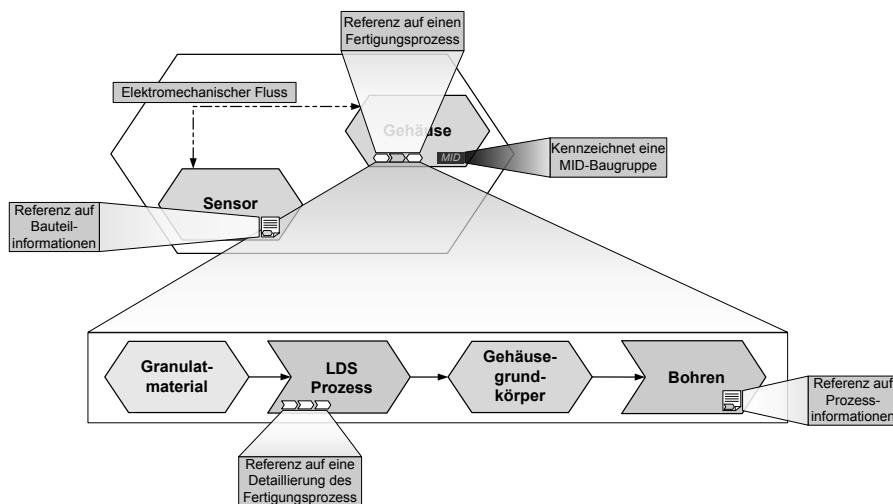
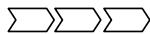


Bild 4-18: Neu entwickelte Konstrukte für die Modellierung von mechatronischen Systemen in der Technologie MID



Dieses Piktogramm wird Systemelementen der Wirkstruktur zugewiesen. Es verweist auf die Prozessschritte, die für die Produktion benötigt werden.



Dieses Piktogramm wird Prozessen zugewiesen. Es verweist auf eine detaillierte Beschreibung des Prozesses. Es lassen sich so mehrere Prozessschritte zu einem übergeordneten zusammenfassen. Eine unveränderte Folge von Prozessen kann so durch einen Prozessschritt immer wieder verwendet werden.



Mit Hilfe dieses Piktogramms wird auf weiterführende Bauteilinformationen referenziert. Dies können Datenblätter, Kosteninformationen oder auf dem Bauteil befindliche elektronische Bauteile (Widerstände, Mikrocontroller) sein. Ein Verweis auf weitere entwicklungsrelevante Informationen ist ebenfalls denkbar, wie z.B. Grad der Konkretisierung, Verantwortlicher, benötigte Freigabe.



Dieses Piktogramm verweist auf weiterführende Prozessinformationen. Dies können Prozesskarten, Kompetenzkarten oder realisierbare Bauräume sein. Ein Verweis auf weitere Informationen ist denkbar, z.B. für diesen Prozessschritt verfügbare Ressourcen.

- ←→ Mit dem elektromechanischen Fluss werden Beziehungen beschrieben, die eine integrierte elektronische und mechanische Verbindung aufweisen. Dazu zählen Lötverbindungen oder auch lösbarer Verbindungen wie Stecker.
- MID** Mit diesem Piktogramm wird darauf verwiesen, dass es sich um ein Bauteil oder eine Baugruppe in der Technologie MID handelt.

4.5 Konzept für die Werkzeugunterstützung

Wie die vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, spielen vielfältige Aspekte bei der Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID eine entscheidende Rolle. Um den Anwender im Umgang mit der Systematik zu unterstützen, bedarf es eines geeigneten IT-Konzepts. Dieses ist so zu konzipieren, dass sowohl die Pflege der Inhalte als auch das Abrufen und Nutzen der Hilfsmittel sichergestellt ist. Es gibt zurzeit keine durchgängige Werkzeugunterstützung. Vorhandene IT-Werkzeuge betrachten zumeist lediglich einen der genannten Aspekte. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept für eine Werkzeugunterstützung vorgestellt, das die durchgängige Anwendung der vorgestellten Systematik ermöglichen soll. Die zentrale Anforderung an ein IT-Werkzeug ist, dass es die Anwender bei der Nutzung unterstützt. Bild 4-19 zeigt die prinzipielle Nutzung.

Dabei sind zwei Nutzungsgruppen zu differenzieren. Auf der einen Seite steht der Know-how-Träger, welcher gezielt Informationen und Wissen dokumentieren möchte. Dazu zählen z.B. Stammdaten über Lieferanten, Material, Prozesskompetenzen oder Kostensätze. Durch die Möglichkeit Informationen und Wissen dokumentieren zu können, steigt das abrufbare Know-how mit der Anzahl der Produktentwicklungen an und bietet wertvolle Hinweise für zukünftige Entwicklungen.

Auf der anderen Seite steht der Anwender des IT-Werkzeugs. Er nutzt die enthaltenen Daten zur Kostenbewertung für aktuelle MID-Projekte. Die enthaltenen Inhalte sollen über eine Suchfunktion z.B. nach Lieferanten, Materialien oder Prozessen zugänglich gemacht werden. Darüber hinaus werden die benötigten Hilfsmittel zur Durchführung der Kostenbewertung implementiert. Dazu zählen z.B. das Prozessportfolio oder die Prozesskarten.

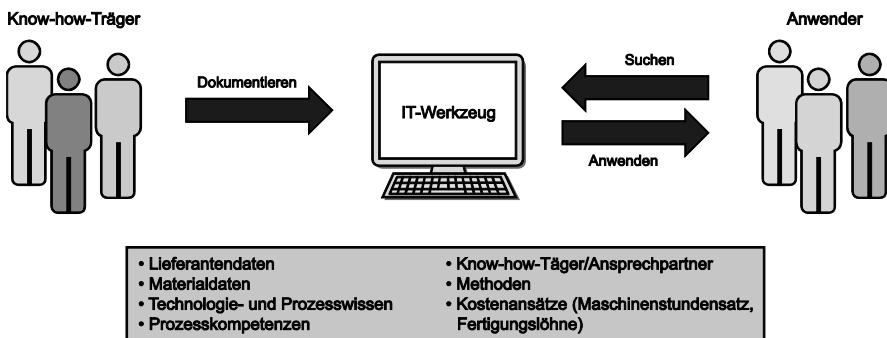


Bild 4-19: Prinzipielle Nutzung des IT-Werkzeugs für die Kostenbewertung

IT-Konzept

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Konzept für die Softwareumsetzung erarbeitet. Im Folgenden soll dieses näher erläutert werden. Bild 4-20 zeigt einen Mock-Up der grafischen Benutzungsoberfläche des IT-Werkzeugs.

Die Oberfläche ist wie folgt strukturiert. In dem linken Bildbereich befindet sich der Navigationsbereich. Hier kann der Anwender zwischen den verschiedenen Modellen auswählen. Darunter fallen z.B. die Funktionshierarchie, die Wirkstruktur und der Fertigungsprozess. Ferner kann der Anwender auch unter der Schaltfläche Kostenbewertung weiterführende Diagramme finden. Zu ihnen zählen das Prozessdiagramm, die Relevanzmatrix sowie die Funktionsträgerkostenmatrizen.

Im mittleren Bildbereich des IT-Werkzeugs werden die einzelnen Modelle des aktuellen Projektes angezeigt wie bspw. die Wirkstruktur, der Fertigungsprozess oder das Wertschöpfungskonzept. Für die Erstellung und Bearbeitung der Modelle sollte eine Schnittstelle zu weiteren Tools vorgesehen werden. Eine Importfunktion von MS Visio Dateien sowie Dateien aus dem Mechatronic Modeller sollte realisiert werden.

Auf der rechten Seite der Oberfläche können Hilfsmittel angezeigt werden. In Bild 4-20 ist die Prozesskarte des Laserstrukturierens dargestellt. Über eine Filterfunktion kann nach Prozesskarten gesucht werden. Mit Fertigungsschritten verknüpfte Prozesskarten können ebenfalls in diesem Bereich angezeigt werden. Weitere Hilfsmittel sind die Kriterienkarten sowie der Kostenplan des Kostenmodells. Die in Kapitel 4.3.2.2 vorgestellte Materialdatenbank sollte ebenfalls angebunden werden. Weiter ist eine Importfunktion für weitere etablierte Datenbanken vorzusehen. So kann sichergestellt werden, dass die Inhalte und Daten zu verfügbaren Materialien aktuell gehalten sind.

Im oberen Bildbereich befinden sich verschiedene Schaltflächen mit denen sich neue Inhalte in das IT-Werkzeug aufnehmen lassen. Hier können z.B. die vorhandenen Kompetenzen für die Prozesse neu definiert oder geändert werden. Weiter lassen sich neue Pro-

zesskarten erstellen und existierende Prozesskarten können aktualisiert werden. Des Weiteren kann über eine Schaltfläche das Vorgehensmodell der Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf geöffnet werden. Der Anwender kann sich so am Prozess orientieren und kann nachvollziehen, welche Schritte als nächstes durchzuführen sind.

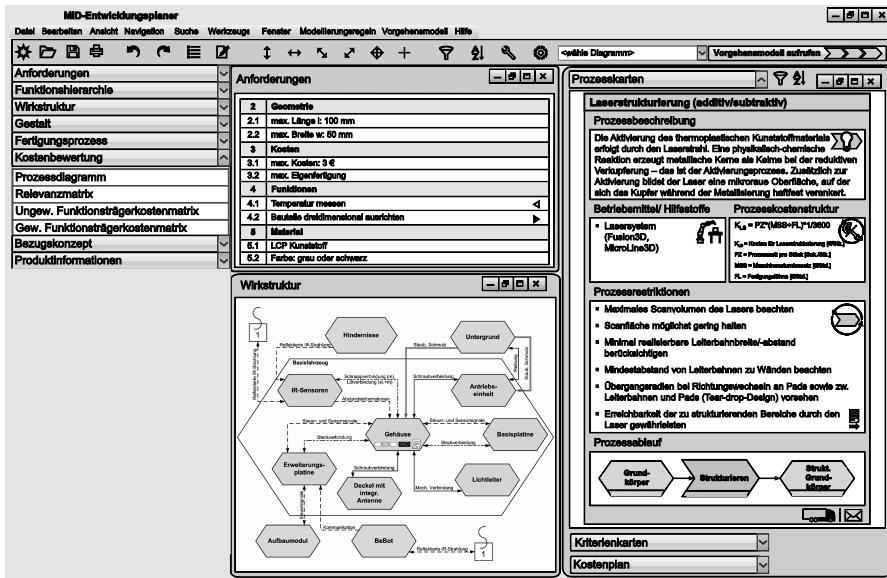


Bild 4-20: Mock-Up des Werkzeugs zur Kostenbewertung

5 Anwendung der Systematik zur Kostenbewertung

In diesem Kapitel wird die *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID* angewandt. Dies geschieht mittels zwei Anwendungsbeispielen. Anhand des am Heinz Nixdorf Instituts entwickelten Miniaturroboters BeBot soll dargelegt werden, wie die Systematik in der Anwendung funktioniert und welche die wesentlichen Resultate sind. Die Entwicklung des BeBot wird in Kapitel 5.1 retrospektiv betrachtet. Das zweite Anwendungsbeispiel, ein Innenraumbeleuchtungsmodul, ist ein Hybridbauteil, welches aus einer MID-Baugruppe sowie einer FR4-Leiterplatte besteht (vgl. Kap. 5.2). In Kapitel 5.3 wird, auf Basis der Anwendungsbeispiele, die erarbeitete Systematik den Anforderungen aus der Problemanalyse gegenübergestellt und bewertet.

5.1 Anwendungsbeispiel Miniaturroboter BeBot

Ein wichtiger Demonstrator des Sonderforschungsbereichs 614 – Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – stellt der Miniaturroboter BeBot dar. Er ist eine Forschungsplattform für Algorithmen der Schwarmintelligenz und Multi-Agentensysteme. Ferner ist er ein Technologiedemonstrator für MID. Sein Gehäuse ist eine 2,5D MID-Baugruppe, welche mittels Laserdirektstrukturierung hergestellt wurde. Das MID-Gehäuse sowie das Basisfahrzeug des BeBot sind in Bild 5-1 abgebildet.

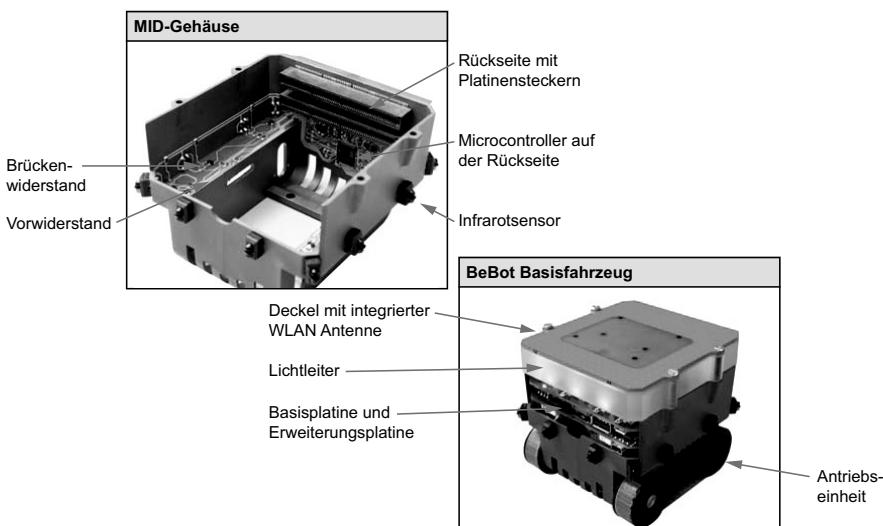


Bild 5-1: MID-Gehäuse (oben) und der Miniaturroboter BeBot (unten)

Das MID-Gehäuse (oben) verfügt über zwölf Infrarotsensoren, welche einen 360° Blick ermöglichen. Der BeBot ist so in der Lage Gegenstände und Hindernisse zu detektieren.

Zusätzlich, zu weiteren elektronischen Bauteilen, ist ein Mikrocontroller auf der rückwärtigen Gehäuseinnenseite montiert. Der Mikrocontroller ist für die Sensorauswertung zuständig. Zudem können zwei Leiterplatten in das Gehäuse gesteckt werden. Unten ist das Basisfahrzeug des BeBot mit Antrieben, Basis- und Erweiterungsplatine, Lichtleiter sowie Deckel mit integrierter WLAN-Antenne zu sehen.

Andere Roboter dieser Klasse sind ähnlich ausgestattet, weisen aber Schwachstellen auf, wie z.B. die Positionierung der Sensoren [Pei07, S. 99]. Die Positionierung der Sensoren ist für den späteren fehlerfreien Betrieb wesentlich. Sie detektieren mögliche Hindernisse und liefern wichtige Umgebungsinformationen für den Miniaturroboter. Nicht korrekt positionierte Sensoren führen zu fehlerhaften Messungen und können dazu beitragen, dass der Roboter nicht korrekt funktioniert. Eine Korrektur ist sehr zeitaufwändig und führt nicht immer zu einer kompletten Behebung des Fehlers. Eine einwandfreie Positionierung der Sensoren bereits in der Produktion, die den Anforderungen gerecht wird, ist daher unerlässlich. Daher wurde der BeBot auf Basis der Technologie MID entwickelt. Die beiden wesentlichen Anforderungen an den BeBot sind:

- **Hohe Qualität und Leistung:** Das System muss robust gegen Umwelteinflüsse sein und fehlerfrei funktionieren. Zudem muss die verbaute Informationstechnik den Anforderungen der präferierten Forschungsgebiete der Schwarmintelligenz und Multi-Agentensystemen genügen. Sie sollte modular gestaltet sein, um diese durch andere Platinen variieren zu können.
- **Kostenziel:** Es muss sichergestellt sein, dass das System die Zielkosten in Höhe von 1.400,00 € einhält.

Hinzu kommen weitere Anforderungen. So sollte das System möglichst klein und leicht sein. Zudem soll es eine sehr gute Manövrierfähigkeit aufweisen und eine sehr präzise Steuerung ermöglichen. Eine Drehung sollte auf kleinstem Raum möglich sein. Auch kleinere Hindernisse müssen überwunden werden können. Zudem muss der Miniaturroboter in der Lage sein, mit anderen Agenten zu kommunizieren. Eine lange Einsatzzeit rundet die Anforderungsspezifikation ab [GRS14, S. 50ff.].

5.1.1 Produkt und Produktionssystem konzipieren

In der Konzipierung wird ausgehend von der Anforderungsliste, dem Umfeldmodell, den Anwendungsszenarien sowie der Funktionshierarchie die Wirkstruktur des BeBot entwickelt. Parallel dazu wird die erste Phase 1 *Betrachtungsgegenstand definieren* der Systematik zur Kostenbewertung durchgeführt (vgl. Kap. 5.1.2). Sie setzt auf der Funktionshierarchie und der Wirkstruktur auf. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines ersten Gestaltmodells. Es umfasst sowohl die Mechanik als auch Elektronik. Gängige Softwaretools für den Schaltungsentwurf sind mit detaillierten Bibliotheken ausgestattet (z.B. Eagle und Altium Designer). Mit ihrer Hilfe können geeignete elektronische Bauelemente ausgewählt werden. Ihnen sind zumeist Datenblätter hinterlegt, in denen der Footprint

des Bauteils sowie benötigte weitere Bauelemente (Kondensatoren, Widerstände) angegeben sind. Auf dieser Basis kann bestimmt werden, welche und wie viele Bauelemente benötigt werden. Aufbauend auf der Schaltung wird ein erstes Leiterbahnlayout entworfen. Durch die Erweiterung der Modellierungstechnik CONSENS können nun ergänzende Informationen, wie benötigte elektronische Bauelemente, an die MID-Baugruppe annotiert werden. Die vorliegenden Informationen lassen sich zu den Produktrestriktionen verdichten und bilden die Basis für die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens. Das Fertigungsverfahren und damit einhergehend die MID-Prozesskette (vgl. Kap. 2.3.3) können mit Hilfe der MID-Eigenschaftskarten nach PEITZ (vgl. Kap. 3.3.3) ausgewählt werden. Aus der Gegenüberstellung der Eigenschaften der MID-Herstellverfahren und dem Anforderungsprofil des MID-Gehäuses des BeBot geht hervor, dass das LDS-Verfahren am geeignetesten ist [Pei07, S. 118].

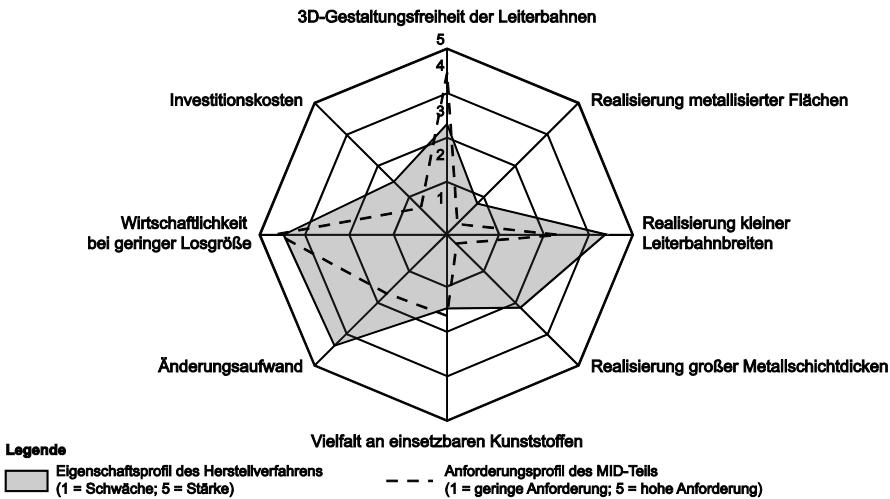


Bild 5-2: Gegenüberstellung des Eigenschaftsprofils des LDS-Verfahrens mit dem Anforderungsprofil des MID-Gehäuses nach PEITZ [Pei07, S. 118]

Darauf aufbauend, werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prozesskarten, eingesetzt. Sie beschreiben detailliert die Einzelprozesse der MID-Verfahren sowie weitere nicht-MID-Prozesse (vgl. Anhang A2). Die Prozesskarten enthalten weiterhin Prozessfolgen mit Eingangs-, Zwischen- und Endelementen. Sie unterstützen die effiziente Modellierung der Prozessketten und helfen bei der Definition der Baustuktur. In Bild 5-3 ist ein Ausschnitt der Prozesskette des Gehäuses zu sehen sowie die für den Einkomponentenspritzguss erarbeitete Eigenschaftskarte. Sie enthält neben den Prozessrestriktionen und dem -ablauf auch Informationen über die Prozesskosten und deren Struktur. Weiter ist ein Ausschnitt der Wirkstruktur mit annotierten Bauteilinformationen, wie der verwendete Werkstoff und die sich auf dem Gehäuse befindenden elektronischen Bauteile zu sehen. Unter Berücksichtigung der Anforderungen und mit Hilfe der Materialdatenbank (vgl. Kap. 4.3.2.2) wurde ein geeigneter Werkstoff (LCP Vectra 840i) ausgewählt.

Rechts im Bild ist das Gestaltmodell des BeBot zu sehen. Aus dem 3D-CAD Gestaltmodell kann das Volumen ($37,445\text{cm}^3$) der MID-Baugruppe errechnet werden. Dieses ist für die spätere Kostenbetrachtung relevant. Weiter kann die Fläche der Leiterbahnen, die auf dem Bauteil entstehen sollen, berechnet werden. Das Volumen des MID-Baugruppe ist ausschlaggebend für die Materialkosten. Die Fläche der Leiterbahnen ist ein wesentlicher Faktor für die Kosten der Metallisierung.

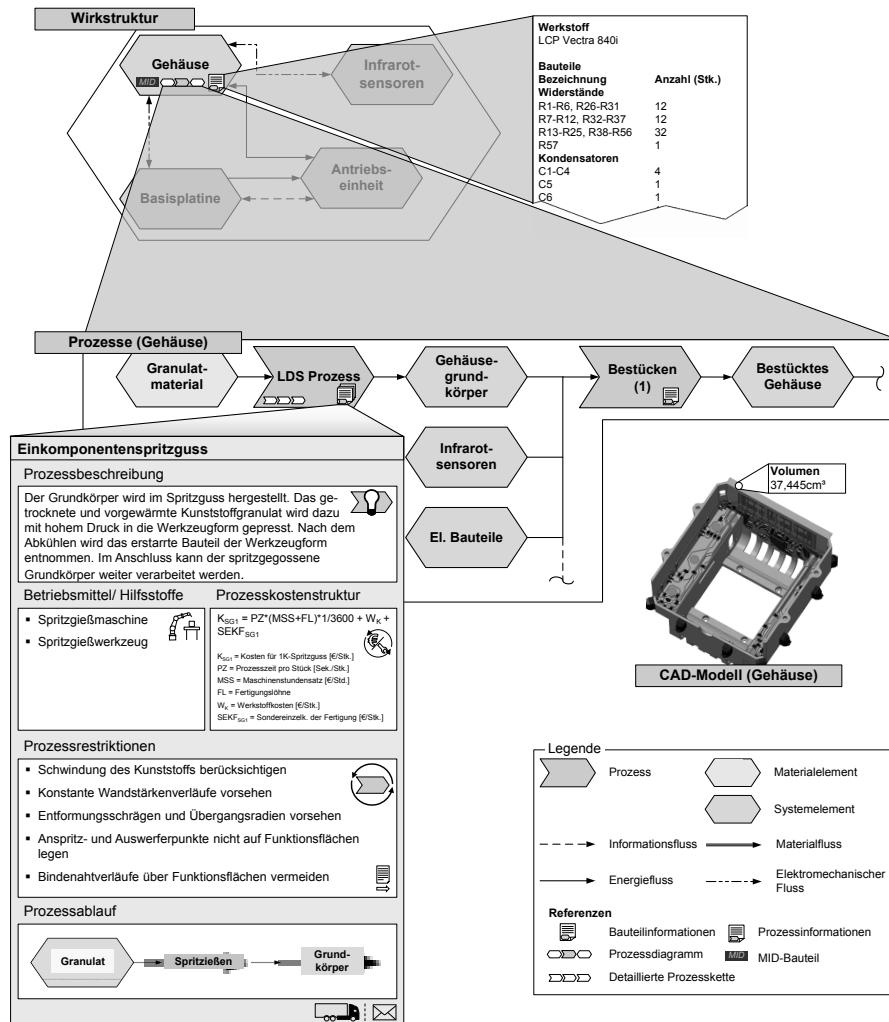


Bild 5-3: Ausschnitt aus den Partialmodellen des BeBot mit Prozesskarte „Einkomponentenspritzguss“ und Bauteilinformationen des Gehäuses

5.1.2 Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren

Der Entwicklungsauftrag, die Funktionshierarchie und die Wirkstruktur, der parallel ablaufenden Konzipierung, bilden den Ausgangspunkt für die Definition des Betrachtungsgegenstandes. Dieser wird in fünf Schritten definiert (vgl. Kap. 4.2.1.1). Zur Identifikation relevanter Funktionen wird auf die MID-Funktionen nach PEITZ zurückgegriffen (vgl. Kap 2.3.1). Bild 5-4 zeigt die Funktionshierarchie des BeBot mit den identifizierten MID-Funktionen – grau dargestellt (Schritt 1).

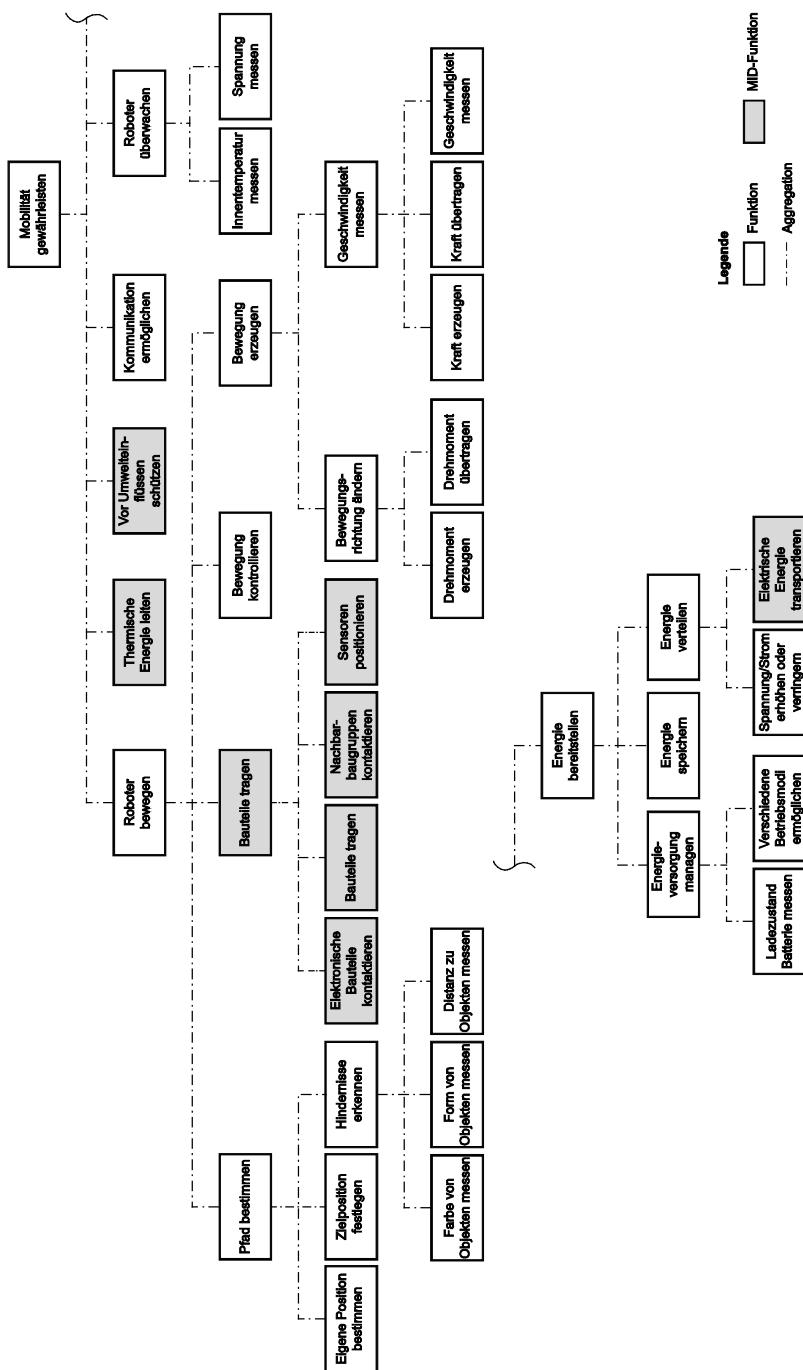


Bild 5-4: Funktionshierarchie des Miniaturroboters BeBot

Sieben der insgesamt 25 Funktionen auf der untersten Hierarchieebene entsprechen MID-Funktionen und können direkt mittels der Technologie realisiert werden: *Thermische Energie leiten, vor Umwelteinflüssen schützen, elektronische Bauteile kontaktieren, mechanische Bauteile tragen, Nachbarbaugruppe kontaktieren, Sensoren positionieren und elektrische Energie transportieren*. Die MID-Funktionen nach PEITZ geben einen guten Rahmen. Zusätzlich können jedoch weitere Funktionen von einem MID-Bauteil realisiert werden. Es bedarf hier allerdings einer näheren Betrachtung. Sie erfolgt im Anschluss an die Lösungssuche. Zur Lösungssuche wird der morphologische Kasten nach ZWICKY [Zwi71] eingesetzt. Als weiteres Hilfsmittel zur Lösungsfindung kommt der erweiterte Konstruktionskatalog (vgl. Kap. 3.3.2) zum Einsatz (Schritt 2). Anschließend werden die Lösungen zu einem Lösungskonzept synthetisiert und in der Wirkstruktur (vgl. Bild 5-5) dargestellt. Aufgrund der für die Technologie MID typischen Integralbauweise werden im Anwendungsbeispiel alle MID-Funktionen von einem Bauteil (Gehäuse) realisiert. Zusätzlich werden aufgrund der Applikation von elektronischen Bauelementen auf das Gehäuse drei zusätzliche Funktionen vom Gehäuse realisiert: *Bewegung kontrollieren, eigene Position bestimmen und Distanz zu Objekten messen* (Schritt 3).

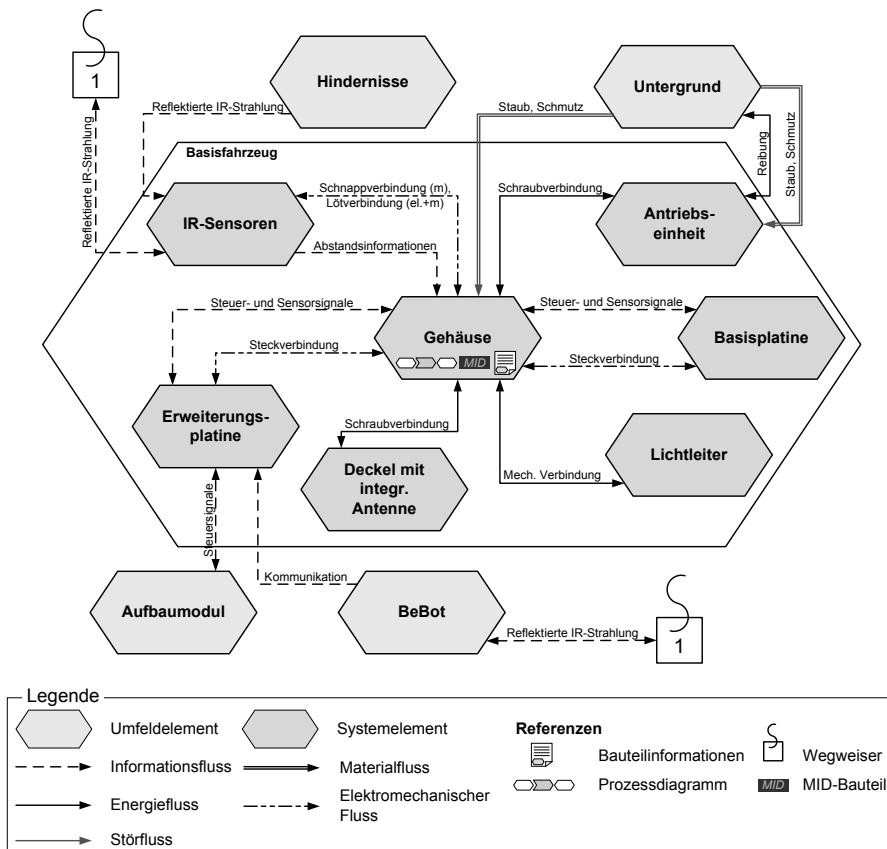


Bild 5-5: Wirkstruktur und zu realisierende MID-Funktionen des BeBot

Aus der Wirkstruktur wird deutlich welche Systemelemente über elektromechanische Flüsse mit dem Gehäuse verbunden sind. Die elektromechanische Verbindung lässt i.d.R. darauf schließen, dass diese aufgrund der Nutzung der Technologie MID realisiert wird, da sich mechanische und elektronische Flussbeziehungen vereinen. Bei der Nutzung von konventionellen Technologien muss hier häufig eine andere Lösung gefunden werden. Die Flussbeziehungen müssen näher analysiert und bewertet werden. Beim BeBot sind die Relationen vom Gehäuse ausgehend zu den Infrarotsensoren (IR-Sensoren), der Basisplatine sowie der Erweiterungsplatine zu betrachten (vgl. Bild 5-5). Die Analyse ergab, dass die beiden Platinen über eine konventionelle Steckerleiste mit dem Gehäuse verbunden werden, dies kann auch mit anderen Technologien in ähnlicher Form umgesetzt werden. Die Montage der Platinen kann in einem separaten Montageschritt erfolgen. Die Ausführung der Platinenmontage weicht nicht von der Form ab, wie sie bei der Montage der Platinen es Systems in konventioneller Technologie erfolgen würde. Daher ist dieser für die weitere Betrachtung vernachlässigbar.

Der elektromechanische Fluss zwischen Gehäuse und IR-Sensoren hingegen wird durch eine mechanische Verbindung und zusätzlich durch eine Lötstelle hergestellt. Das Verbinden der IR-Sensoren mit dem Gehäuse erfolgt während der Herstellung des MID-Gehäuses. Der Prozess würde in seiner Form stark von dem Prozess abweichen, der bei der Fertigung eines Systems mit konventionellen Technologien eingesetzt würde. Die IR-Sensoren sind daher zwingend Teil des Betrachtungsgegenstandes (Schritt 4).

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass Montageschritte mitunter großen Einfluss auf die Kosten haben. Wenn dies der Fall ist, sind die Bauteile, deren Funktionen sowie Fertigungs- und Montageprozesse zwingend in der Kostenbewertung mit zu betrachten.

Abschließend wird die Funktionalität der zusätzlichen Systemelemente analysiert. Die Analyse ergab, dass die IR-Sensoren keine zusätzliche Funktion erfüllen, die nicht zum Teil von dem Gehäuse mit erfüllt wird. Dadurch ergeben sich keine weiteren Funktionen, die in den Betrachtungsgegenstand mit aufgenommen werden müssen (Schritt 5).

Bild 5-6 zeigt die Elemente des Betrachtungsgegenstandes für die Kostenbewertung der MID-Baugruppe des BeBot. Sie sind die Basis für die weiteren Phasen der Systematik.

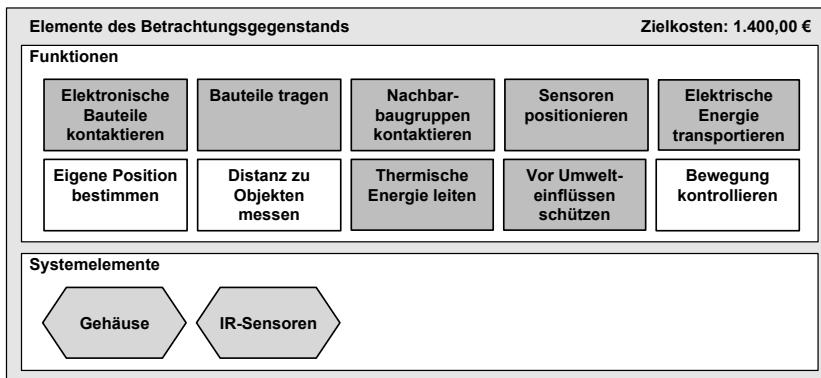


Bild 5-6: Elemente des Betrachtungsgegenstandes für den BeBot

5.1.3 Phase 2: Zielkosten ermitteln

Für die Kostenbetrachtung sind nicht nur die zu kalkulierenden Kosten zu ermitteln. Den kalkulierten Kosten sind die Zielkosten gegenüber zu stellen, um feststellen zu können, in wie weit das betrachtete Konzept vorteilhaft ist. Sie werden in dieser Phase ermittelt. Zu Beginn ist der Anteil des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstandes an der Erfüllung der Hauptfunktion zu identifizieren. Dazu wurden in Kap. 4.2.1.1 drei Ansätze vorgestellt. In diesem Anwendungsbeispiel wurde der Überschlagsansatz ausgewählt: Der BeBot hat 25 Subfunktionen. Der Betrachtungsgegenstand weist zehn Funktionen auf. Daraus ergibt sich für ein Anteil des Funktionsbündels an der Erfüllung der Hauptfunktion von 40%, denn:

$$HEA = \frac{10}{25} = 0,4$$

Aufgrund des gewählten Ansatzes reduziert sich der Bewertungsaufwand erheblich. Für den Bottom-Up-Ansatz müssen 300 Zellen der Relevanzmatrix ausgefüllt werden. Mit dem hier gewählten Überschlagsansatz müssen lediglich 45 Zellen gefüllt werden. Bild 5-7 zeigt die Relevanzmatrix für das Funktionsbündel des Betrachtungsgegenstandes. Die Funktion *eigene Position bestimmen* ist die wichtigste Funktion innerhalb des Bündels. Normiert auf einen Anteil von 40% entfallen ca. 7% auf diese Funktion. Die Funktionen *Distanz zu Objekten messen* und *elektronische Bauteile kontaktieren* sind mit jeweils ca. 4% als gleichwertig eingestuft worden.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	5) Nachbarbaugruppe kontaktieren	6) Sensoren positionieren	7) Bewegung kontrollieren	8) Thermische Energie leiten	9) Vor Umwelteinflüssen schützen	10) Elekt. Energie transportieren	Summe	Anteilig auf 100%	Anteilig auf 40%
1)	-	1	1	1	1	1	0	1	1	1	8	17,78	7,11
2)	0	-	1	1	1	1	0	1	0	0	5	11,11	4,44
3)	0	0	-	1	1	0	1	1	0	1	5	11,11	4,44
4)	0	0	0	-	1	1	0	0	0	0	2	4,44	1,78
5)	0	0	0	0	-	0	0	1	0	0	1	2,22	0,89
6)	0	0	1	0	1	-	0	1	0	0	3	6,87	2,67
7)	1	1	0	1	1	1	-	1	1	0	7	15,56	6,22
8)	0	0	0	1	0	0	0	-	0	0	1	2,22	0,89
9)	0	1	1	1	1	1	0	1	-	0	6	13,33	5,33
10)	0	1	0	1	1	1	1	1	1	-	7	15,56	6,22
											45	100	

Bewertungsmaßstab:
 0 = Zelle ist unwichtiger als Spalte
 1 = Zelle ist wichtiger als Spalte

Bild 5-7: Relevanzmatrix der Funktionen des Betrachtungsgegenstandes

Anschließend werden die Bauteile hinsichtlich ihrer Funktionserfüllung bewertet. Bild 5-8 zeigt die ungewichtete Bewertung der Bauteile. Die Infrarotsensoren sind an der Funktionserfüllung von insgesamt fünf Funktionen beteiligt. Den größten Beitrag liefern die Sensoren bei der Funktion *Distanz zu Objekten messen*. Diese wird zu 30% von den Sensoren erfüllt. Das Gehäuse wird zur Funktionserfüllung von zehn Funktionen benötigt. Dabei werden die Funktionen *Bauteile tragen*, *thermische Energie leiten* und *vor Umwelteinflüssen schützen* zu 100% von dem Gehäuse erfüllt.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	5) Nachbarbaugruppe kontaktieren	6) Sensoren positionieren	7) Bewegung kontrollieren	8) Thermische Energie leiten	9) Vor Umweltinflüssen schützen	10) Elekt. Energie transportieren	Summe der Bewertung
Gewichtung der Funktion	0,071	0,044	0,044	0,018	0,009	0,0027	0,062	0,009	0,053	0,062	0,4
IR-Senoren	0,1	0,3	0	0	0,05	0,2	0,1	0	0	0	
Gehäuse	0,1	0,1	0,5	1	0,25	0,8	0,2	1	1	0,3	

Bild 5-8: Ungewichtete Funktionsträgerkostenmatrix des Betrachtungsgegenstandes

In Bild 5-9 ist die gewichtete Funktionsträgerkostenmatrix des Betrachtungsgegenstandes dargestellt. Die ungewichteten Werte wurden mit der Gewichtung der Funktionen aus der Relevanzmatrix multipliziert. In der vorletzten Spalte der Matrix sind die einzelnen Werte aufsummiert. Für die IR-Sensoren ergibt sich ein Anteil von 3,35% (0,0335) und für das Gehäuse ergibt sich ein Anteil von 17,55% (0,1755) an den Zielkosten für das Gesamtsystem. Die Werte werden nun mit den festgesetzten Kosten für das Gesamtprodukt multipliziert. Für den BeBot belaufen sich diese auf 1.400€. Für die IR-Sensoren ergeben sich Zielkosten in Höhe von 46,20 €. Für das Gehäuse belaufen sich diese auf 245,70€. Für die MID-Baugruppe steht ein Kostenrahmen in Höhe von 291,90€ bereit. Sie stellen die Obergrenze für die kalkulierten Kosten dar. Die Bauteilzielkosten können nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sie im Fertigungsprozess auch gemeinsam verursacht werden, z.B. beim Verbinden von IR-Sensoren mit Gehäuse.

	1) Eigene Position bestimmen	2) Distanz zu Objekten messen	3) Elektrische Bauteile kontaktieren	4) Bauteile tragen	5) Nachbarbaugruppe kontaktieren	6) Sensoren positionieren	7) Bewegung kontrollieren	8) Thermische Energie leiten	9) Vor Umweltinflüssen schützen	10) Elekt. Energie transportieren	Zielbauteilkosten
Gewichtung der Funktion	0,07	0,045	0,045	0,02	0,01	0,03	0,06	0,01	0,055	0,06	0,41
IR-Senoren	0,007	0,0135	0	0	0,0005	0,006	0,006	0	0	0	0,0335 46,20 €
Gehäuse	0,007	0,0045	0,0225	0,02	0,0025	0,024	0,012	0,01	0,055	0,015	0,1755 245,70 €
Kostensumme											291,90 €

Bild 5-9: Gewichtete Funktionsträgerkostenmatrix des Betrachtungsgegenstandes

5.1.4 Phase 3: Kostenkalkulation durchführen

In der dritten Phase wird die Kostenkalkulation durchgeführt ermittelt. Zu ihnen zählen auch etwaige Investitionen, die zu tätigen sind. Für die Identifikation der Investitionen und für die Definition des Wertschöpfungskonzepts wird zunächst eine Prozessbewertung durchgeführt. Sie gibt Aufschluss über die Kompetenzen und die Kapazitäten, die im spezifischen Anwendungsfall vorhanden sind. Des Weiteren wird untersucht, welche Kompetenzen und Kapazitäten für das zu bewertende Produkt benötigt werden. Hier kommt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Prozessbewertung zum Einsatz.

Die Fertigungsprozesse werden anhand vordefinierter Kriterien bewertet. Im Anschluss kann eine Make-Or-Buy-Entscheidung auf Basis der Handlungsempfehlung getroffen werden. Die benötigten Kapazitäten ergeben sich aus den geplanten Stückzahlen und der Struktur des Systems. Sie können aus der Anforderungsliste und der Wirkstruktur ermittelt werden.

Bild 5-10 zeigt die Prozess- und Ressourcenbewertung für den BeBot. Im oberen Teil sind die Kriterienkarten abgebildet. Die benötigten Kompetenzen werden in fünf Stufen eingeteilt. Die Ausprägungen dienen als Orientierung und helfen dem Anwender bei der Bewertung. Die höchste Kompetenzstufe beim Spritzgießen ist z.B. durch ein komplexes dreidimensionales Bauteil gekennzeichnet, welches Hinterschneidungen aufweist und aufgrund der Geometrie ebenfalls ein beheiztes oder gekühltes Werkzeug benötigt. Für die Prozessführung ist großes Prozessverständnis nötig. Die geringste Kompetenzstufe ist durch ein einfaches zweidimensionales Bauteil mit einem Anguss gekennzeichnet. Die vorhandenen Kompetenzen werden in sechs Stufen (0-5) eingeteilt. Die unterste Stufe kennzeichnet, dass der benötigte Prozess nicht vorhanden ist. Im betrachteten Anwendungsfall ergibt sich für den Spritzguss ein vorhandenes Kompetenzlevel von 0, da der Prozess nicht verfügbar ist. Daher sollte der Fertigungsschritt zwangsläufig an einen Auftragsfertiger vergeben werden.

Im unteren Bildabschnitt sind die für den BeBot benötigten Kompetenzen und Kapazitäten dargestellt. Für die Produktion werden Kapazitäten von unter 5.000 Stück benötigt, dies entspricht einer Einstufung von 1. Für den Spritzguss des BeBot wird ein Kompetenzlevel von 1 benötigt: Der BeBot ist ein dreidimensionales Bauteil ohne Hinterschneidungen, mit einem Anguss. Das Ergebnis der Kompetenz- und Ressourcenbewertung wird im Prozessportfolio (vgl. Bild 5-11) dargestellt.

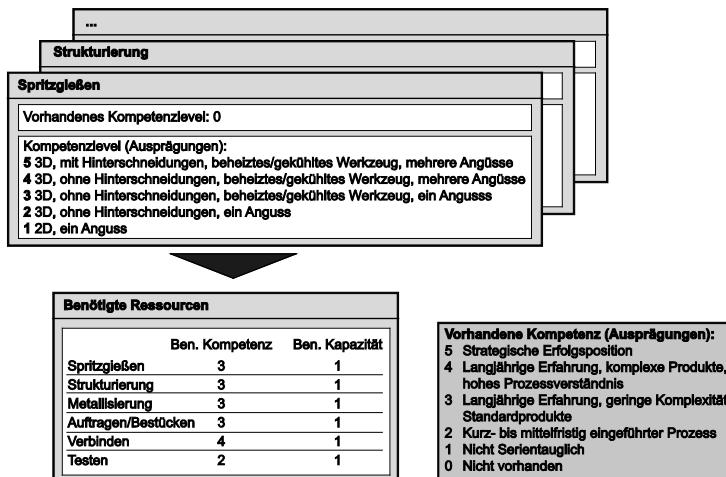


Bild 5-10: Prozess- und Ressourcenbewertung

Alle benötigten Prozesse sind im Prozessportfolio eingetragen. Für jeden Prozess gibt es eine empfohlene Normstrategie (vgl. Kap. 4.2.1.3). Sie basiert auf der Position des Prozesses im Portfolio. Im betrachteten Beispiel wird empfohlen, die Prozesse *Spritzgießen*, *Strukturieren*, *Metallisieren*, *Auftragen/Bestücken* und *Verbinden* von Dritten fertigen zu lassen, da die vorhandenen Kompetenzen nicht ausreichen. Zudem stehen zu wenige Ressourcen zur Verfügung. Für die Prozesse die von einem Dritten gefertigt werden, ergeben sich keine Investitionen. Der Prozess *Testen* weist ausreichende Kapazitäten auf. Die relative Kompetenz beträgt 1,5. Aus der Normstrategie ergibt sich, dass der Prozess unternehmensintern realisiert werden sollte. Investitionen müssen nicht getätigt werden. Entstehende Investitionen würden auf das zu fertigende Produkt umgelegt und gingen in die Kostenbewertung mit ein.

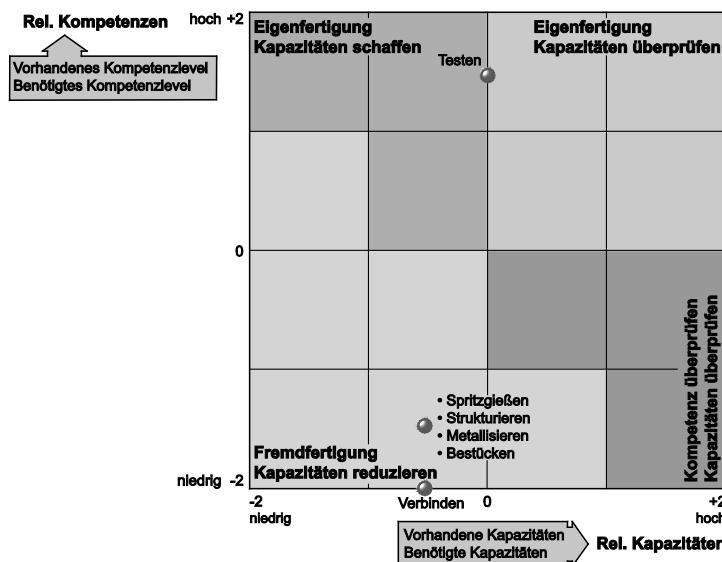


Bild 5-11: Prozessportfolio für die Fertigungsschritte des BeBot (Betrachtungsgegenstand)

Auf Basis der Normstrategien wurde die Make-Or-Buy-Entscheidung getroffen. Alle Prozessschritte, bis auf das *Testen*, wurden von Auftragsfertigern übernommen. Zur Kostenbewertung wurden Angebote der Auftragsfertiger eingeholt. Die Informationen aus der Konzipierung wurden für eine Kalkulation zugrunde gelegt. Für das unternehmensintern durchgeführte *Testen* wurden anschließend mit Hilfe der Prozesskarten und des Kostenplans die zu erfassenden Kostengrößen definiert. Bild 5-12 zeigt den Prozessschritt *Funktions test des Gehäuses*, die dazugehörige Prozesskarte sowie die relevanten Aspekte aus dem Kostenplan.

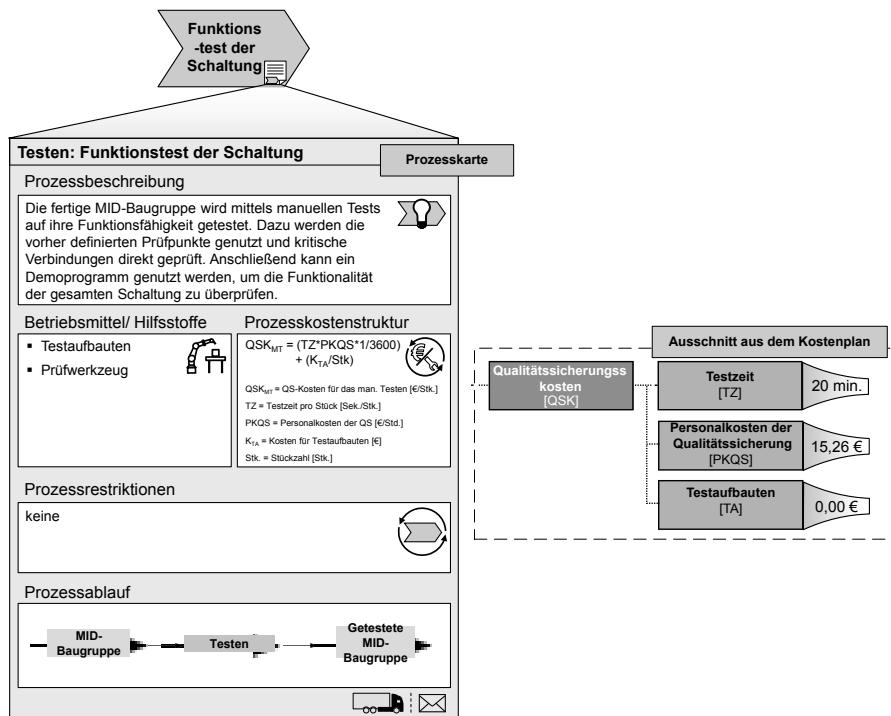


Bild 5-12: Kostenbestimmung für den Prozessschritt „Testen“

Die Prozesskosten für das *Testen* weisen folgende Struktur auf:

$$QS_{MT} = \left(TZ * PKQS * \frac{1}{3600} \right) + \left(\frac{K_{TA}}{Stk.} \right)$$

QS_{MT} = Qualitätssicherungskosten für das manuelle Testen

TZ = Testzeit

$PKQS$ = Personalkosten der Qualitätssicherung

K_{TA} = Testaufbauten

Für den BeBot ergeben sich Qualitätssicherungskosten für das manuelle Testen von ca. 5 € mit:

$$QS_{MT} = \left(1200 \frac{Sek.}{Stk.} * 15,26 \frac{\text{€}}{Std.} * \frac{1}{3600} \right) + \left(\frac{0}{100} \frac{\text{€}}{Stk.} \right) = 5,09 \frac{\text{€}}{Stk.}$$

Im anschließenden Schritt wird das Wertschöpfungskonzept definiert. Das Wertschöpfungskonzept enthält Informationen über eigengefertigte Bauteile und fremdbezogene Bauteile, in welcher Reihenfolge sie durchgeführt werden sowie von wem sie ausgeführt

werden. Im Anwendungsbeispiel entfallen die im Kostenmodell beschriebenen Gemeinkosten. Hierfür wird die Modellierungssprache OMEGA (Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse) verwendet und geringfügig erweitert [GP14, S. 254ff.]. Neben dem Prozessschritt werden die Zulieferunternehmen dokumentiert. Die annotierten Kosten beziehen sich immer auf die im betreffenden Unternehmen ausgeführten Prozessschritte. Bild 5-13 zeigt das Wertschöpfungskonzept des BeBot. Die Prozessschritte vom gebohrten Gehäuse bis zum metallisierten Gehäuse belaufen sich auf 116,00 €. Das fremdbezogene MID-Gehäuse kostet in Summe 282,00 €. Das getestete MID-Gehäuse kostet 287,00 €.

Die Zielkosten für das MID-Gehäuse wurden mit 291,90 € bewertet (vgl. Kap. 5.1.3). Daraus resultiert ein Kostenquotient von 1,02 für die absolute Vorteilhaftigkeit mit:

$$K_V = \frac{\text{Zielkosten}}{\text{Kalkulierte Kosten}} = \frac{291,90\text{€}}{287,00\text{€}} = 1,02$$

Das Kostenziel kann knapp eingehalten werden. **Handlungsempfehlung:** Das Kostenziel wird zwar knapp eingehalten, es sollte jedoch vermehrt auf die Kosten bei der Entwicklung geachtet werden. Steigen diese um einen kleinen Teil an, kann die Vorteilhaftigkeit nicht mehr gewährleistet werden. Das Produktkonzept sollte hinsichtlich Einsparpotentiale untersucht werden. Bei dem BeBot würde sich z.B. ein Schaltungsredesign anbieten, da dieses sehr komplex und aufwändig in der Fertigung ist. Die Funktionen des Mikrocontrollers ließen sich z.B. auf die Basisplatine auslagern. Sodass lediglich die IR-Sensoren mit dem Gehäuse verbunden sind.

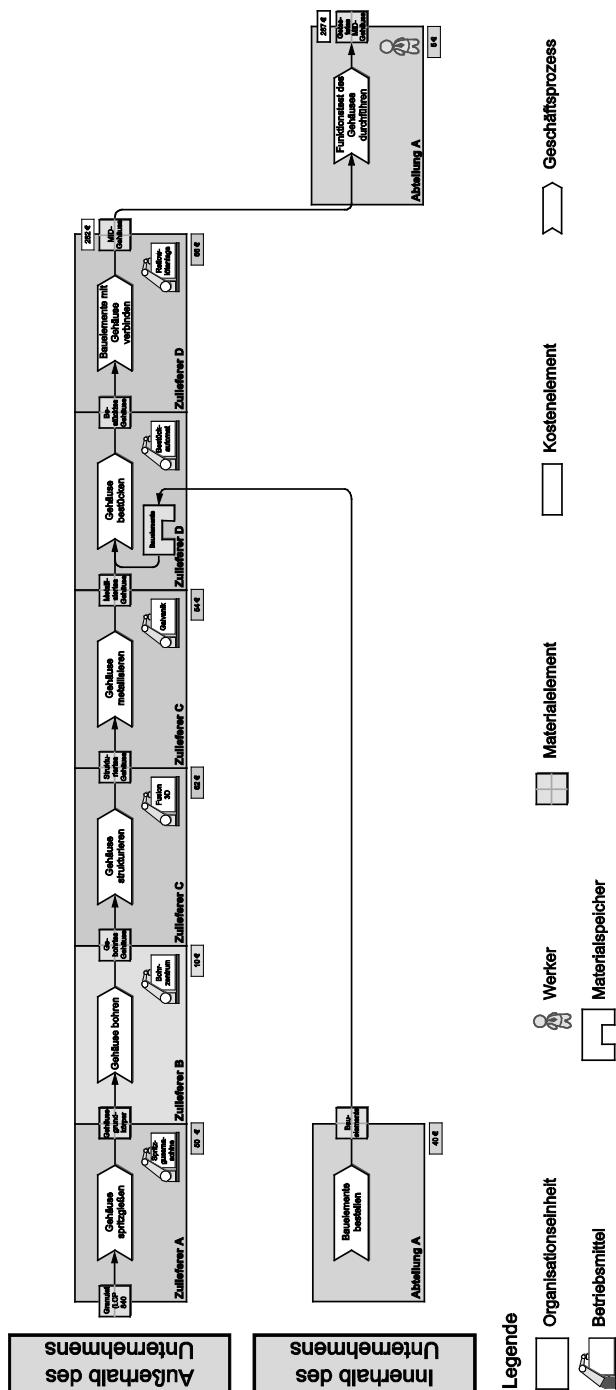


Bild 5-13: Wertschöpfungskonzept für den BeBot (Betrachtungsgegenstand)

5.2 Anwendungsbeispiel Innenraumbeleuchtungsmodul

Das Innenraumbeleuchtungsmodul ist für den Einsatz im Fahrgastraum im Automobil vorgesehen. Das LED-Beleuchtungsmodul ermöglicht eine frei steuerbare Ausleuchtung des Fahrzeuginnenraums bei extrem flacher Bauform.



Bild 5-14: MID-Beleuchtungsmodul [Har15-ol]

Die MID-Baugruppe implementiert warm-weiße LEDs mit hoher Leistung auf einer exakt ausgerichteten Oberfläche. Dadurch wird eine definierte Strahlenlenkung möglich. Das MID-Gehäuse selbst ist als Hybridbaugruppe ausgeführt. Es verfügt über eine Schaltung auf dem Gehäuse sowie über eine zusätzliche Platine, die mit dem Gehäuse verbunden wird. Auf der Gehäuseoberfläche sind Sensoren vorgesehen, mit dem die Beleuchtung gesteuert wird. Mittels Durchkontaktierungen ist die Sensorfläche mit der Schaltung verbunden. Auf der Platine befindet sich ein Mikrocontroller, der die Steuerung des Moduls übernimmt.

Bei der Entwicklung stand die geringe Einbauhöhe, diverse Komfortfunktionen (Dimmbarkeit des Lichtes, Integration von Innenbeleuchtung und Leselicht in einem Modul), Komponentenreduktion sowie die Kostenreduktion im Vordergrund. Die wesentlichen Anforderungen sind:

Miniaturisierung und Teilereduktion: Das Modul soll möglichst klein bauen. Zudem soll durch den Einsatz der Technologie MID die Teilezahl stark reduziert werden.

Kostenreduktion: Ziel ist eine erhebliche Kostenreduktion gegenüber der bestehenden Variante.

5.2.1 Produkt und Produktionssystem konzipieren

Analog zum Vorgehen in Kapitel 5.2.1 wird die Wirkstruktur des Beleuchtungsmoduls entwickelt. Parallel erfolgt die Definition des Betrachtungsgegenstands (Phase 1). Das weitere Vorgehen erfolgt wie oben bereits beschrieben. In Bild 5-15 sind die Entwicklungsartefakte dargestellt. Anschließend kann das Fertigungsverfahren ausgewählt werden. In diesem Anwendungsfall war das Fertigungsverfahren bereits vorgeben: Laserdirektstrukturierung [Har15-ol].

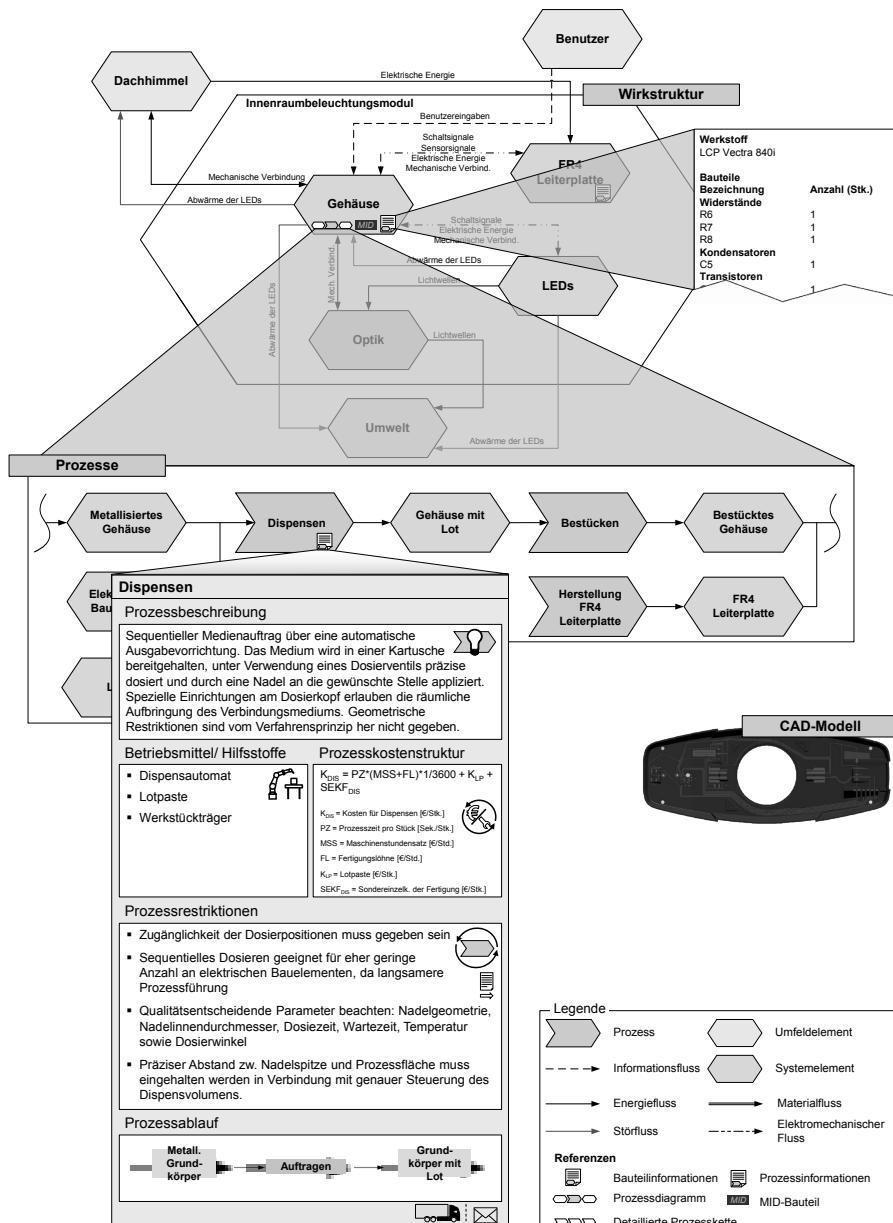


Bild 5-15: Ausschnitt aus den Partialmodellen des Innenraumbeleuchtungsmoduls mit Prozesskarte „Dispensen“

5.2.2 Phase 1: Betrachtungsgegenstand definieren

Analog zu Kapitel 5.1.2 erfolgt in diesem Abschnitt die Definition des Betrachtungsgegenstandes. Der Betrachtungsgegenstand wird in fünf Schritten definiert (vgl. Kap. 4.2.1.1). Zunächst werden die MID-Funktionen ermittelt. Dazu kann auf die von PEITZ definierten MID-Funktionen zurückgegriffen werden (vgl. Kap 2.3.1). Bild 5-16 zeigt die Funktionshierarchie des Innenraumbeleuchtungsmoduls. Die sechs grau hinterlegten Funktionen sind klassische MID-Funktionen: *Bauteile tragen*, *Nachbarbaugruppe kontaktieren*, *elektrische Bauelemente kontaktieren*, *elektrische Energie leiten*, *Vor Umwelteinflüssen schützen* und *thermische Energie leiten* (Schritt 1).

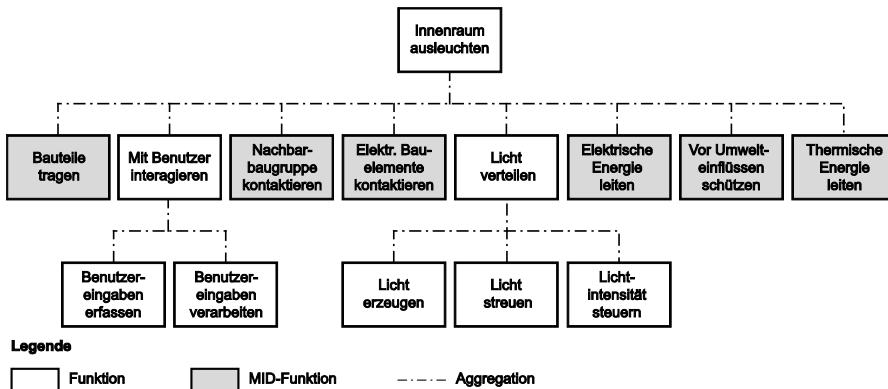


Bild 5-16: Funktionshierarchie des Innenraumbeleuchtungsmoduls

Zur Lösungssuche wird der morphologische Kasten nach ZWICKY [Zwi71] eingesetzt. Als weiteres Hilfsmittel zur Lösungsfindung kommt der erweiterte Konstruktionskatalog (vgl. Kap. 3.3.2) zum Einsatz (Schritt 2). Nachfolgend wird analysiert, welche weiteren Funktionen neben den MID-Funktionen erfüllt werden. Zusätzlich wird die Funktion *Benutzer-eingaben erfassen* von der MID-Baugruppe erfüllt (Schritt 3). Anschließend werden die Lösungen zu einem Lösungskonzept synthetisiert und in der Wirkstruktur (vgl. Bild 5-17) dargestellt.

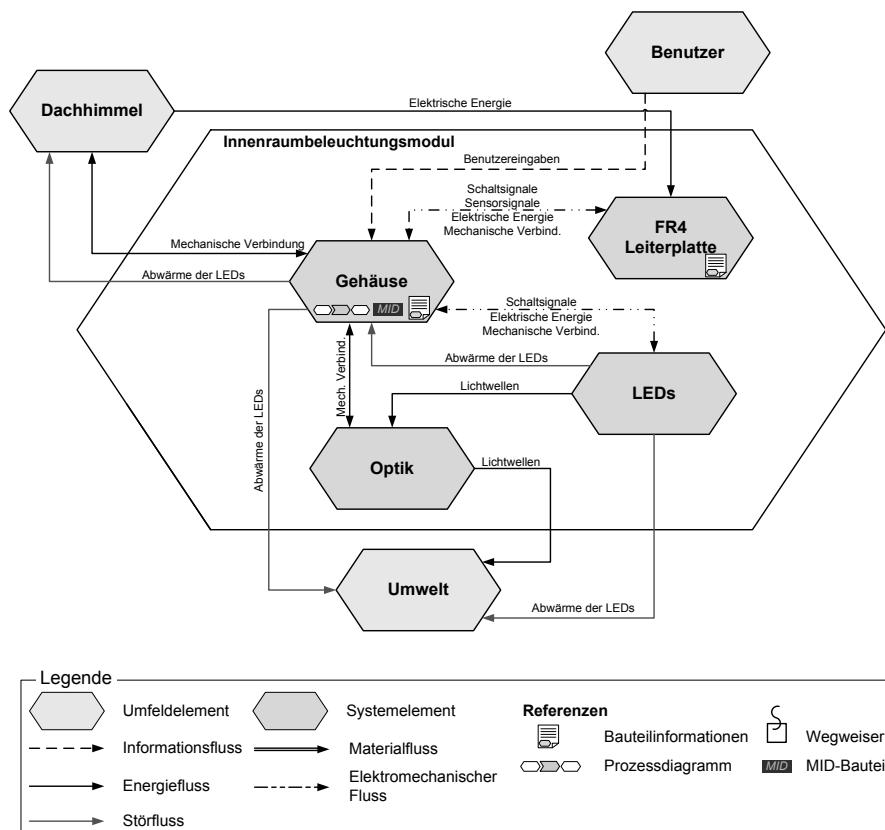


Bild 5-17: Wirkstruktur der Innenraumbeleuchtung

Anschließend wird die Wirkstruktur analysiert. Es werden vor allem die angrenzenden Bauteile zum *MID-Gehäuse* untersucht. Im Fokus stehen hier zusätzlich die Flussbeziehungen. Im besonderen Maße relevant sind elektromechanische Verbindungen.

Beim Innenraumbeleuchtungsmodul werden die *LEDs* sowie die *Leiterplatte* direkt mit dem Gehäuse verlötet. Dieser Prozessschritt lässt sich nur allen Bauteilen gemeinsam zuordnen. Eine Zuweisung von Kosten zu jedem einzelnen Bauteil ist daher kaum möglich. Daher sind die *LEDs* sowie die *Leiterplatte* zwingend Teil des Betrachtungsgegenstandes (Schritt 4). Zusätzlich werden auch die Funktionen, die sie erfüllen, zum Betrachtungsgegenstand hinzu gezählt. Diese sind: *Benutzereingaben verarbeiten*, *Licht erzeugen* und *Lichtintensität steuern* (Schritt 5).

Bild 5-18 zeigt die Elemente des Betrachtungsgegenstandes für die Kostenbewertung der MID-Baugruppe des Innenraumbeleuchtungsmoduls. Zu ihm zählen das *Gehäuse*, die *Leiterplatte* sowie die *LEDs*. Gemeinsam erfüllen sie nahezu alle Funktionen des gesamten Beleuchtungsmoduls. Lediglich die Funktion *Licht streuen* wird von der *Optik* erfüllt.

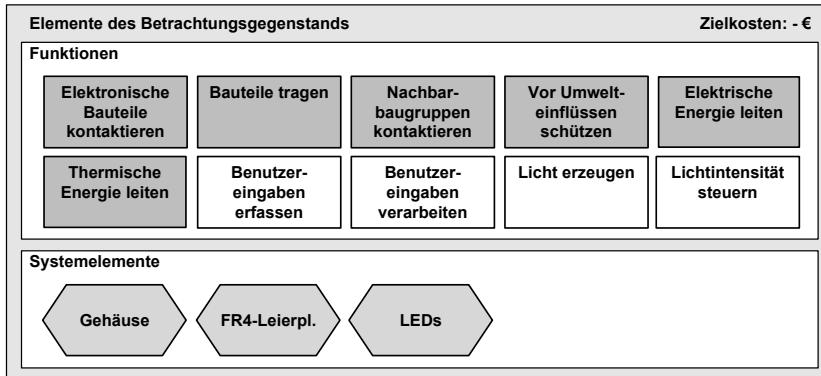


Bild 5-18: Elemente des Betrachtungsgegenstandes des Innenraumbeleuchtungsmoduls

5.2.3 Phase 2: Zielkosten ermitteln

Für die Kostenbetrachtung ist nicht nur die Kostenkalkulation durchzuführen. Den kalkulierten Kosten sind die Zielkosten gegenüber zu stellen, um feststellen zu können, in wie weit das betrachtete Konzept vorteilhaft ist. Sie werden in dieser Phase ermittelt. Zu Beginn ist der Anteil des Funktionsbündels des Betrachtungsgegenstandes an der Erfüllung der Hauptfunktion zu identifizieren. Dazu wurden in Kap. 4.2.1.1 drei Ansätze vorgestellt. In diesem Anwendungsbeispiel wurde der Bottom-Up-Ansatz gewählt, da nahezu alle Funktionen von der MID-Baugruppe erfüllt werden. Es ergibt sich lediglich ein sehr geringer Mehraufwand bei der Bewertung.

Bild 5-19 zeigt die Relevanzmatrix zur Bestimmung des Kostenanteils des Betrachtungsgegenstandes am gesamten Innenraumbeleuchtungsmodul.

	1) Bauteile tragen	2) Benutzerreinfa- ben erfassen	3) Benutzerreinge- ben verarbeiten	4) Nachbarbaugrup- pe kontaktieren	5) Elekt. Bauteile kontaktieren	6) Licht erzeugen	7) Licht streuen	8) Lichtintensität steuern	9) Elekt. Energie leiten	10) Vor Umweltin- flüssen schützen	11) Thermische Energie leiten	Summe	Kostenanteil in %
1)	-	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	4	7,27
2)	0	-	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1,82
3)	0	1	-	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3,64
4)	1	1	1	-	0	0	0	0	0	1	1	5	9,09
5)	1	1	1	1	-	0	0	1	0	1	1	7	12,73
6)	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	10	18,18
7)	1	1	1	1	1	0	-	1	0	1	1	8	14,55
8)	1	1	1	1	0	0	0	-	0	1	1	6	10,91
9)	1	1	1	1	1	0	1	1	-	1	1	9	16,36
10)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	1	1	1,82
11)	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-	2	3,64
												55	100

Bewertungsmaßstab:
0 = Zelle ist unwichtiger als Spalte
1 = Zelle ist wichtiger als Spalte

Bild 5-19: Relevanzmatrix für den Betrachtungsgegenstand

Im nächsten Schritt würde die Funktionsträgerkostenmatrix aufgestellt. Da in diesem Anwendungsbeispiel nur ein weiteres Systemelement (*Optik*) existiert, welches zudem lediglich eine Funktion (*Licht streuen*) erfüllt, kann das Verfahren vereinfacht werden. Die Funktionskostenträgermatrix muss ausgefüllt werden, wenn Bauteile, die nicht Teil des Betrachtungsgegenstandes sind, diese tangieren. Im konkreten Anwendungsbeispiel ist dies nicht gegeben. Daher kann direkt aus der Relevanzmatrix der Zielkostenanteil abgeleitet werden. Er ergibt sich aus der Summe der Anteile der Funktionen des Betrachtungsgegenstandes. Der Zielkostenanteil beträgt 85,45% an den Zielkosten.

5.2.4 Phase 3: Kostenkalkulation durchführen

In dieser Phase wird die Kostenkalkulation für den Betrachtungsgegenstand durchgeführt. Zu ihnen zählen auch mögliche Investitionen. Ob Investitionen notwendig sind, wird mittels Prozessbewertung identifiziert. Es werden sowohl Kompetenzen als auch Kapazitäten überprüft. Der Fertigungsprozess wird den Charakteristika des Produktes gegenübergestellt und der Handlungsbedarf abgeleitet.

Die Kompetenz- und Kapazitätsbewertung ist in Bild 5-20 dargestellt. Mit einer geplanten Stückzahl von 350.000 Stück pro Jahr werden die benötigten Kapazitäten mit fünf bewertet. Die MID-Baugruppe selbst ist relativ einfache aufgebaut. Sie hat eine schalenartige Geometrie ohne Hinterschneidungen. Die Strukturierung erfolgt zwar auf zwei gegenüberliegenden Gehäuseseiten, diese sind für den Laser jedoch sehr gut zugänglich. Die Leiterbahnabstände sind nicht sehr fein. Aufgrund der verbauten Leiterplatte entfällt eine

aufwändige Bestückung. Die Leiterplatte kann mit konventionellen Technologien gefertigt werden. Dies sind etablierte Standardprozesse mit hohem Durchsatz und entsprechend geringen Kosten. Auf das MID-Gehäuse müssen nur wenige Bauteile appliziert werden. Dies geschieht auf einer Prozessfläche. Das Gehäuse, die Leiterplatte und die LEDs sowie die weiteren elektronischen Bauteile werden mittels Dampfphasenlöten miteinander verbunden. Abschließend wird die Gehäuseoberseite lackiert. Hier wird eine Class-A-Oberflächenqualität benötigt.

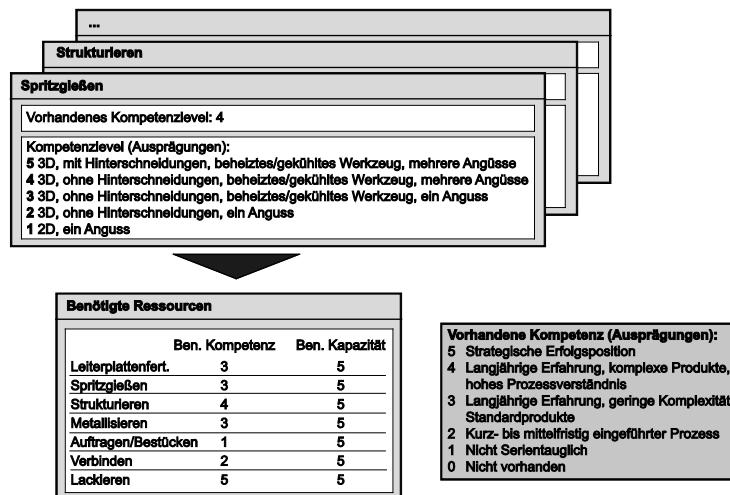


Bild 5-20: Kompetenz- und Kapazitätsbewertung

Im nachfolgenden Schritt werden die Bewertungen in das Prozessportfolio überführt. Das Prozessportfolio ist in Bild 5-21 dargestellt. Dazu sind die relativen Kompetenzen sowie relativen Kapazitäten zu bilden. Für das Innenraumbeleuchtungsmodul liegen die klassischen MID-Prozesse alle im grünen Bereich. Die Normstrategien empfehlen alle Prozesse unternehmensintern durchzuführen (vgl. Kap. 4.3.2.1). Die vorhandenen Kapazitäten reichen für die Fertigung ebenfalls aus. Die Leiterplattenfertigung hingegen könnte sowohl unternehmensintern als auch von einem Auftragsfertiger hergestellt werden. Das Lackieren der Oberfläche sollte jedoch an einen Auftragsfertiger ausgelagert werden. Die geforderte Oberflächenqualität stellt hohe Ansprüche an den Prozess.

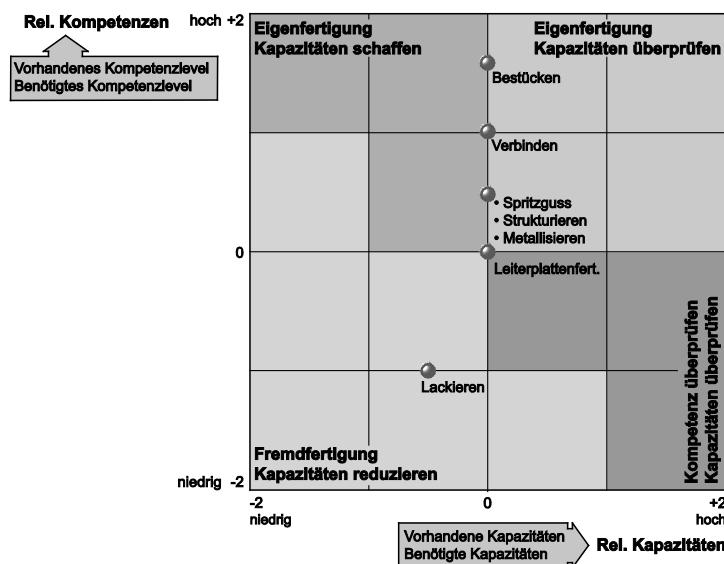


Bild 5-21: Prozessportfolio für das Innenraumbeleuchtungsmodul

Die Prozesse der Eigenfertigung werden im nächsten Schritt näher betrachtet. Der Fertigungsprozess aus der Produkt- und Produktionssystemkonzipierung wird um die Prozesskarten angereichert. In Bild 5-22 ist dies beispielhaft für den Prozess Einkomponentenspritzguss dargestellt. Die Prozesskarten enthalten Informationen über die Kostenstruktur (vgl. Kap. 4.3.2.2). Diese können wiederum mit den Inhalten des Kostenplans verknüpft werden. Der Anwender erhält alle Variablen, die er für die Kostenbewertung ausprägen muss. Für die Bestimmung der Kosten für den Spritzguss müssen die Werkstoffkosten ermittelt werden. Sie setzen sich aus dem Volumen des Bauteils, dem Angussvolumen, dem Materialkoeffizienten, den Referenzmaterialkosten sowie der Dichte des Werkstoffs zusammen. Diese Daten können aus der Materialdatenbank entnommen werden (vgl. Bild 5-22).

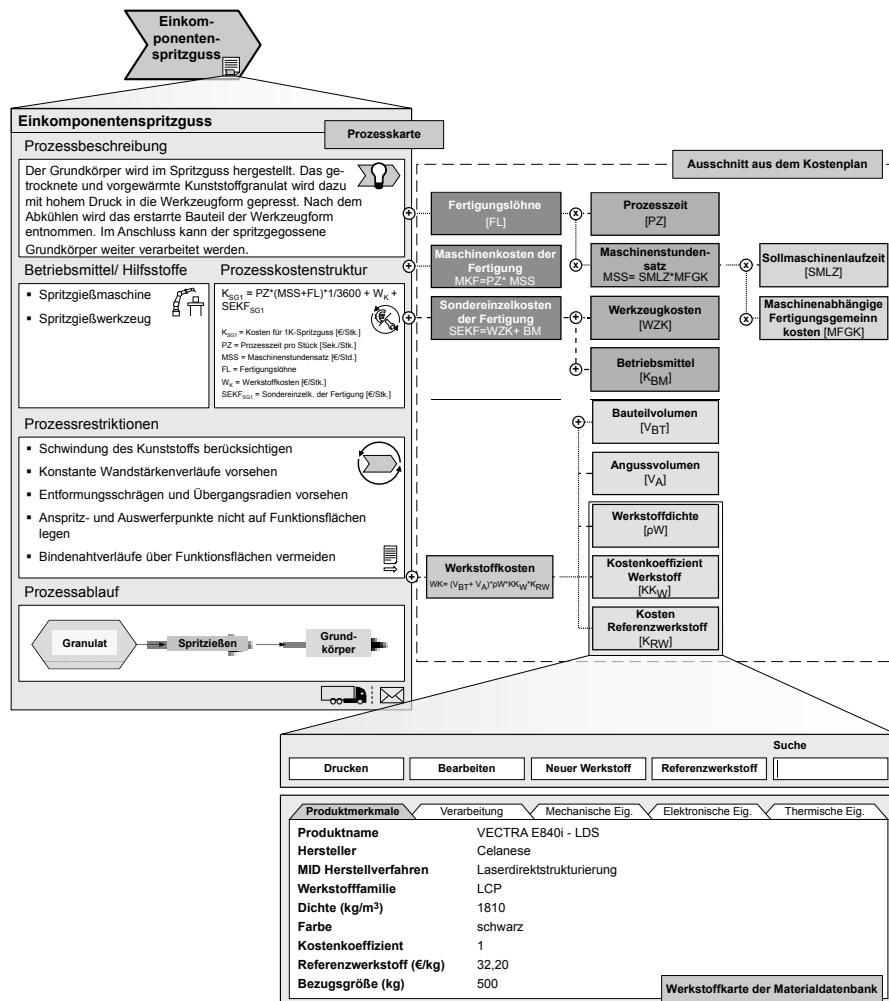


Bild 5-22: Kostenstruktur für den Einkomponentenspritzguss

Abschließend wird das Wertschöpfungskonzept aufgestellt. Es ist in Bild 5-23 dargestellt. Es zeigt, welche Prozesse unternehmensintern ablaufen und welche -extern. Zudem beschreibt es die eingesetzten Ressourcen und Fertigungsmittel. Die Prozessschritte zur Herstellung des Schaltungsträgers, die der klassischen MID-Prozesskette entsprechen, werden im eigenen Unternehmen realisiert. Die Leiterplatte wird von einem Auftragsfertiger zur Verfügung gestellt. Abschließend wird die Oberfläche des Innenraumbeleuchtungsmoduls lackiert. Dieser Prozess wird von einem weiteren Auftragsfertiger realisiert. Im Wertschöpfungskonzept ist zudem dargestellt, wann welche Elemente im Prozess eingesetzt werden. Im Prozessschritt Bauelemente mit Gehäuse verbinden wird zusätzlich die FR4-Leiterplatte benötigt.

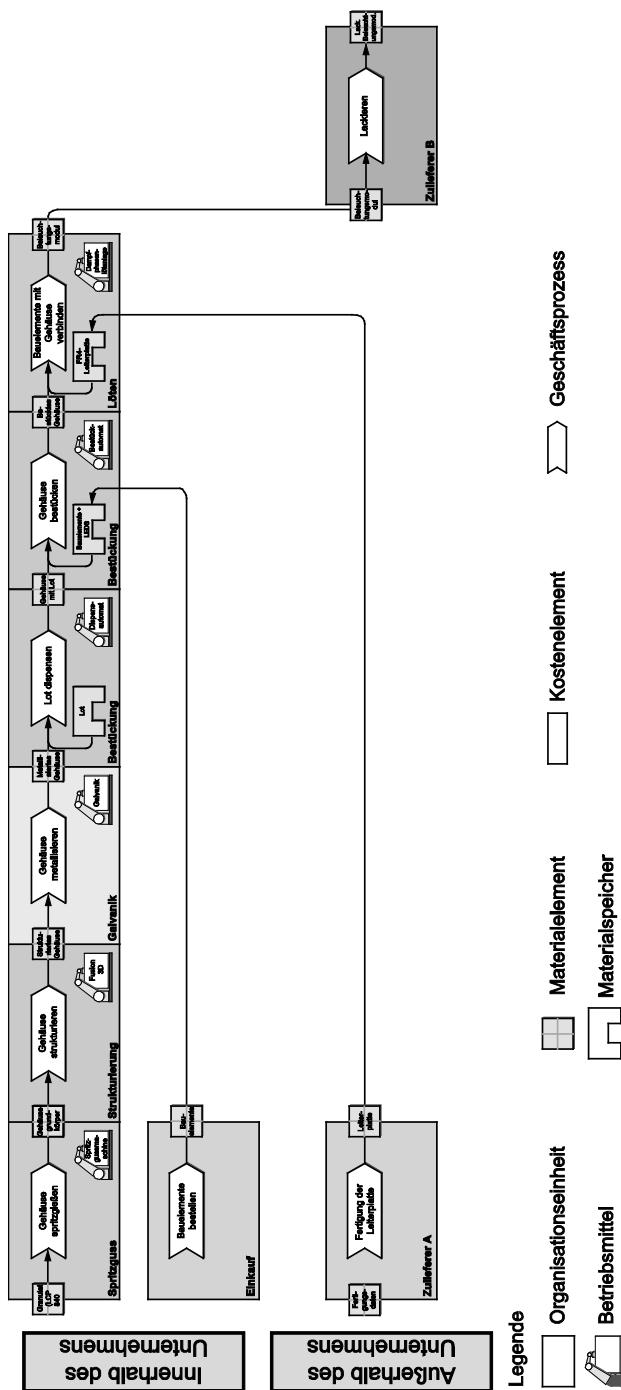


Bild 5-23: Finales Wertschöpfungskonzept

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass das gesetzte Kostenziel eingehalten werden konnte. Da es sich um eine Auftragsentwicklung handelte, können im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Kosteninformationen veröffentlicht werden.

5.3 Bewerten der Arbeit gemäß der Anforderungen

Die in Kapitel 4 vorgestellte *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechanischer Systeme in der Technologie MID* wird nach der beispielhaften Anwendung (Kap. 5.1 und Kap. 5.2) anhand der aufgestellten Anforderungen (Kap. 2.8) bewertet. Dafür wird anhand jeder Anforderung kurz erläutert, inwieweit sie durch die Systematik zur Kostenbewertung erfüllt wird. Bild 5-24 zeigt die Erfüllung der Anforderungen durch die jeweiligen Bestandteile der Systematik im Überblick.

A1) Betrachtung der gesamten Prozesskette: Durch die ganzheitliche Sicht auf das System beschränkt sich die Betrachtung nicht ausschließlich auf die MID-Prozesskette. Durch die funktionale Sicht auf das zu entwickelnde System und deren funktionserfüllende Elemente, einschließlich deren Fertigungsprozesse, wird der Fokus auf die Betrachtung der gesamten Prozesskette gelegt (vgl. Kap. 4.2.1.1). Die Prozesskarten unterstützen weiterhin den Entwickler bei der Definition der Prozesskette (vgl. Kap. 4.3.2.2).

A2) Definition eines gemeinsamen Betrachtungsgegenstandes: In der Produktentwicklung wird ausgehend von den Anforderungen und dem Umfeldmodell die Funktionshierarchie des zu entwickelnden Systems erstellt. Hier setzt die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Definition des Betrachtungsgegenstandes an (vgl. Kap. 4.2.1.1). Mit ihrer Hilfe werden, in fünf Schritten, die zu betrachtenden Elemente identifiziert. Dazu werden zunächst die Funktionen betrachtet und anschließend die Systemelemente und deren Flussbeziehungen in der Wirkstruktur analysiert. Abschließend wird der Betrachtungsgegenstand dokumentiert. Auf dieser Basis werden die weiteren Produktionsprozesse definiert. Er ist die Grundlage für die weitere Kostenbewertung.

A3) Bereitstellen einer einheitlichen Bewertungsgrundlage: Im Rahmen des Standes der Technik wurden Modellierungssprachen/-techniken zur Systembeschreibung analysiert. Es stellte sich heraus, dass die Modellierungstechnik CONSENS eine sehr gute Basis für die Beschreibung einer einheitlichen Bewertungsgrundlage darstellt (vgl. Kap. 3.4.1). Diese wurde um Konstrukte erweitert, um den Anforderungen zur Kostenbewertung sowie der Technologie MID gerecht zu werden (vgl. Kap. 4.4). Mit den zusätzlichen Konstrukten wurde eine Modellierungssprache geschaffen, mit der eine einheitliche Bewertungsgrundlage bereitgestellt wird.

A4) Bereitstellen eines Kostenmodells: Das Kostenmodell adressiert die Haupteinflussgrößen nach VDI-Richtlinie 2235. Dies sind prinzipielle Lösung, Baugröße, Werkstoff und Stückzahl. Der Kostenplan listet die Einflussgrößen auf (vgl. Kap. 4.3.2.2). Sie werden durch die Kostenstruktur in den Prozesskarten in Beziehung gesetzt (vgl. Kap.

4.3.2.2). Ferner werden Methoden zur Zielkostenermittlung (vgl. Kap. 4.3.1) sowie zur Ermittlung der zu kalkulierenden Kosten (vgl. Kap. 4.3.2) bereit gestellt.

A5) Bewerten der absoluten Vorteilhaftigkeit: Die absolute Vorteilhaftigkeit ist ein wesentliches Maß bei der Bewertung von Lösungskonzepten. Dadurch kann sichergestellt werden, dass das ausgewählte Konzept auch das Kostenziel erreicht und einen positiven Beitrag zum Unternehmenserfolg leisten kann. Hierfür werden im Rahmen der Arbeit die ermittelten Zielkosten zu den kalkulierten Kosten ins Verhältnis gesetzt. Für den resultierenden Kostenvergleichsquotienten werden ferner Handlungsempfehlungen ausgesprochen (vgl. Kap. 4.2.1.3).

A6) Rechnerunterstützung zur Kostenbewertung: Im Rahmen der Arbeit wird ein Konzept dargelegt, wie der Anwender durch ein IT-Werkzeug bei der Kostenbewertung unterstützt werden kann (vgl. Kap. 4.5). Zudem wird aufgezeigt, wie das Wissen im Softwarewerkzeug aufbereitet wird und dem Anwender zur Verfügung steht.

A7) Bereitstellen von technologierelevantem Wissen und Methoden: Aufgrund der Tatsache, dass Anwender häufig unerfahren mit dem Umgang der Technologie MID sind, wurden geeignete Hilfsmittel (z.B. Prozesskarten und Kostenmodell) erarbeitet, um den Entwickler zu unterstützen (vgl. Kap. 4.2.1). Weiteres Wissen wird durch die in der Systematik integrierten Hilfsmittel bereitgestellt.

A8) Systematische Vorgehensweise: Das Vorgehensmodell ermöglicht eine systematische, frühzeitige Kostenbewertung (vgl. Kap. 4.2). Hierzu wird das Vorgehen in drei aufeinander folgende Phasen unterteilt. Das Vorgehensmodell beschreibt die durchzuführenden Tätigkeiten und Hilfsmittel. Ferner wurde das Vorgehen in die *Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID* nach KAISER integriert (vgl. Kap. 4.2.2).

A9) Orientierung am Systementwurf: Während der Produktentwicklung wird auf Basis der Anforderungen eine Funktionshierarchie des zu entwickelnden Systems aufgestellt (vgl. Kap. 4.2.1). Im nächsten Schritt werden für die Subfunktionen auf der untersten Hierarchieebene Lösungen gefunden. Das Vorgehensmodell flankiert dieses Vorgehen und nutzt Entwicklungsresultate für die Kostenbewertung. Die Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf orientiert sich somit am Systementwurf.

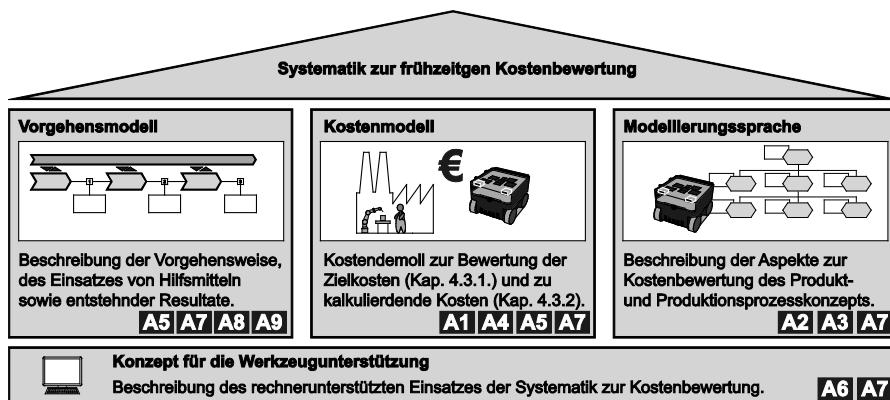


Bild 5-24: Erfüllung der Anforderungen durch die Systematik zur Kostenbewertung

Die vorgestellte *Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie MID* erfüllt damit alle an sie gestellten Anforderungen im vollen Umfang. Sie ist geeignet, eine Kostenbewertung bereits während der Konzipierung durchzuführen. Sie wurde erfolgreich an den Anwendungsbeispielen *Miniaturoboter Be-Bot* und *Innenraumbeleuchtungsmodul* validiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Innovationen bei mechatronischen Systemen, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen (mechanisch-elektronische Baugruppen), können durch die Technologie MID ermöglicht werden. Planare Leiterplatten können durch dreidimensionale Schaltungsträger substituiert werden. Vielmehr kann durch den Einsatz der Technologie MID der zur Verfügung stehende Bauraum sehr viel besser ausgenutzt werden. Sie fördert die Miniaturisierung und ermöglicht eine hohe Gestaltungsfreiheit. Mit der für MID typischen Integralbauweise wird zudem die Teilereduktion begünstigt. Zudem ergeben sich Einsparpotentiale hinsichtlich der Herstellkosten. Darüber hinaus ermöglicht sie völlig neue Applikationen und Funktionalitäten für mechanisch-elektronische Baugruppen. Typische Anwendungsfelder sind die Medizintechnik, der Automotiv- sowie der Mobilfunksektor. Beispielhaft seien hier die Multi-LED-Baugruppe für Zahnarztbehandlungseinheiten, der Sonnensensor zur Regelung der Klimaanlage in Automobilen sowie die Mehrbandantennen für Smartphones genannt.

Den großen Potentialen, die die Technologie MID bietet, stehen auch Barrieren gegenüber: Häufig werden MID-Baugruppen als Kostentreiber wahrgenommen. Die Kostenbewertung von MID-Baugruppen stellt eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund werden MID-Lösungskonzepte häufig verworfen, da ihre Kosten nicht korrekt ermittelt wurden.

Zur Überwindung dieser Barriere benötigen die Entwickler Unterstützung: Sie benötigen eine Systematik, welche die Kostenbewertung strukturiert, detailliert beschreibt sowie die gesamte Prozesskette betrachtet. Dabei müssen sowohl Aspekte des Produkts als auch des Produktionssystems Betrachtung finden. Zudem muss den Entwicklern Wissen über die Technologie vermittelt und Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, um die Kostenbewertung durchführen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden zur Kostenbewertung sowie MID-spezifische Methoden im Stand der Technik untersucht. Keine der betrachteten Methoden konnte die in Kapitel 2.8 definierten Anforderungen erfüllen. Die Methoden zur Kostenbewertung betrachten oftmals nur einen Aspekt und liefern keinen strukturierten Leitfaden zu deren Ermittlung. Zudem stellen sie kein Wissen über die Technologie MID zur Verfügung. Einige MID-spezifische Methoden wiederum liefern Wissen z.B. in Form von Konstruktionskatalogen oder Eigenschaftskarten der einzelnen MID-Herstellverfahren. Sie lassen den Kostenaspekt aber nahezu vollkommen außer Acht. Einzig das Verfahren von FRANKE stellt MID relevantes Wissen zur Verfügung und betrachtet die Ermittlung von Kosten. Der Fokus liegt dabei auf der Betrachtung der MID-Prozesskette. Weiter definiert keiner der Ansätze den eigentlichen Betrachtungsgegenstand, welcher für die Kostenbewertung als Basis dient. Aus diesen Erkenntnissen leitet sich der Handlungsbedarf nach einer neuen Systematik ab.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Systematik integriert existierende Hilfsmittel, erweitert sie oder beschreibt neu entwickelte Hilfsmittel (vgl. Kap. 4). Ergebnis ist eine Systematik die im Kern aus vier Elementen besteht:

1. **Vorgehensmodell:** Das Vorgehensmodell strukturiert die durchzuführenden Tätigkeiten in drei Phasen und beschreibt Hilfsmittel sowie Resultate.
2. **Kostenmodell:** Es stellt Wissen und Methoden zur Ermittlung der Ziel-Kosten und der zu kalkulierenden Kosten des Betrachtungsgegenstandes zur Verfügung. Wissen wird über die Prozesskarten vermittelt. Sie beinhalten zudem eine Kostenstruktur für den jeweiligen Prozessschritt. Das Kostenmodell gliedert sich in das Zielkostenmodell und das Kostenkalkulationsmodell.
3. **Modellierungssprache:** Hier wurde auf die am Heinz Nixdorf Institut entwickelte Modellierungstechnik CONSENS zurückgegriffen und um Konstrukte zur Kostenbewertung und zur Beschreibung der Charakteristika von MIDs erweitert. Ferner stellen die Modelle die Grundlage für die Kostenbewertung dar.
4. **Konzept für die Werkzeugunterstützung:** Das Konzept zur Werkzeugunterstützung beschreibt das rechnergestützte Dokumentieren, Suchen und Anwenden von Hilfsmitteln und Wissen im Rahmen der Kostenbewertung.

Die Validierung der Systematik erfolgte anhand des *Miniaturoboters BeBot* sowie eines *Innenraumbeleuchtungsmodul*. Hierzu wurde das Vorgehensmodell der Systematik vollumfänglich durchlaufen, die Hilfsmittel angewandt und die Resultate vorgestellt. In der Bewertung der Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass die aus der Problemanalyse abgeleiteten Anforderungen erfüllt werden konnten.

Für die Kostenbewertung mechatronischer Systeme – allgemein und im speziellen jene in der Technologie MID – besteht weiterer Forschungsbedarf. Für die Kostenbewertung mechatronischer Systeme in der Technologie MID ist es sinnvoll, weitere Aspekte der Lebenszykluskosten näher zu betrachten. Dazu gehören weitere Kosteneinsparungspotentiale z.B. für das Recycling. Weiter wären Konstruktionskataloge und Richtlinien für das kostengünstige Gestalten von MIDs wünschenswert. Derzeit existieren zwar Konstruktionskataloge und Richtlinien, sie beschreiben aber lediglich, wie bestimmte Funktionen mit der Technologie MID realisiert werden können, oder wie die Bauteile fertigungsgerecht zu gestalten sind. Ein weiterer Aspekt ist das Einbeziehen des gesteigerten Nutzens durch die Verwendung der Technologie MID. Durch den Einsatz der Technologie können z.B. Sensoren exakter positioniert werden, sodass bessere Messergebnisse realisiert werden können. Mitunter entstehen dadurch jedoch erhöhte Kosten im Vergleich mit konventionellen Technologien. Dieser Nutzen, der dem Kunden entsteht, ist jedoch schwierig monetär bewertbar zu machen. Damit ergeben sich hier neue, vielfältige Forschungsaspekte.

7 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
2D	zweidimensional
2K	zwei Komponenten
3-D MID e.V.	Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen
3D	dreidimensional
ACC	Adaptive Cruise Control
AG	Aktiengesellschaft
AHP	Analytic Hierarchy Process
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
Al	Aluminium
Au	Gold
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BGA	Ball Grid Array
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
C.I.	Consistency Index
CAD	Computer Aided Design
CoB	Chip on Board
CONSENS	Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems
d.h.	das heißt
et al.	et alii
etc.	et cetera
FR	flame retardant

i.d.R.	in der Regel
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
INCOSE	International Council of Systems Engineering
IR	Infrarot
IT	Informationstechnologie
K	Kelvin
Kap.	Kapitel
Kg	Kilogramm
KLR	Kosten- und Leistungsrechnung
LCP	Liquid Cristal Polymer
LDS	Laserdirektstrukturierung
LED	Licht emittierende Diode
METUS	Methodische Unterstützung zur Systembildung
MID	Molded Interconnect Devices
MIDIS-C	Molded Interconnect Devices Information Service-Calculation
MID-Plan	Entwicklungsplaner zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Entwicklung von MID-Produkten
Min.	Minute
MSS	Maschinenstundensatz
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OLED	organische Licht emittierende Diode
OMEGA	Objektorientierte Methode zur Geschäftsmodellmodellierung und -analyse
OMG	Object Management Group
PCB	Printed Circuit Board
PCK	Printed Circuit Board Kollmorgen
PS	Produktionssystem
QFD	Quality Function Deployment
QS	Qualitätssicherung

ROI	Return on Investment
SE	Systemelement
Sek.	Sekunde
SFB	Sonderforschungsbereich
SKW	Sankyo Kasei Wiring Board
SMD	Surface Mount Device
SMT	Surface Mount Technology
sog.	sogenannt
Std.	Stunde
Stk.	Stück
SysML	Systems Modeling Language
THT	Through Hole Technology
TS	Thermosonic
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
US	Ultraschall
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VireS	Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionsystementwicklung
WA	Wertanalyse
WLAN	Wireless Local Area Network
z.B.	zum Beispiel

8 Formelverzeichnis

ρ_W	Werkstoffdichte
BEK	Bauelementkosten
FK	Fertigungskosten
FL	Fertigungslöhne
HEA	Hauptfunktionserfüllungsanteil
HK	Herstellkosten
K_{BM}	Kosten für Betriebsmittel
K_{HS}	Kosten für Hilfsstoffe
K_{RW}	Kosten Referenzwerkstoff
KK_W	Kostenkoeffizient Werkstoff
K_{ME}	Kosten für Metallisierungsbad
K_{TA}	Kosten für Testaufbauten
K_V	Kostenvergleichsquotient
LK	Logistikkosten
MEK	Materialeinzelkosten
$MFGK$	Maschinenabhängige Fertigungsgemeinkosten
MGK	Materialgemeinkosten
MK	Materialkosten
MKF	Maschinenkosten der Fertigung
MKR	Maschinenkosten der Rüstung
MSS	Maschinenstundensatz
$PKQS$	Personalkosten der Qualitätssicherung
PKR	Personalkosten der Rüstung
PZ	Prozesszeit
QSK	Qualitätssicherungskosten
$RFGK$	Restfertigungsgemeinkosten
RK	Rüstkosten

RZ	Rüstzeit
$SEKF$	Sondereinzelkosten der Fertigung
$SMLZ$	Sollmaschinenlaufzeit
TZ	Testzeit
V_A	Angussvolumen
V_{BT}	Bauteilvolumen
WK	Werkstoffkosten
WZK	Werkzeugkosten

9 Literaturverzeichnis

- [2E15a-ol] 2E-MECHATRONIC: 23. Februar 2015, unter:
http://www.2e-mechatronic.de/tl_files/datenblaetter/LED_Flyer_032013.pdf
- [2E15b-ol] 2E-MECHATRONIC: 23. Februar 2015 unter:
http://www.2e-mechatronic.de/tl_files/datenblaetter/MID_Stroemungssensor.pdf
- [ADG+09] ADELT, P.; DONOTH, J.; GAUSEMEIER, J.; GEISLER, J.; HENKLER, S.; KAHL, S.; KLÖPPER, B.; KRUPP, A.; MÜNCH, E.; OBERTHÜR, S.; PAIZ, C.; PORRMANN, M.; RADKOWSKI, R.; ROMAUS, C.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITKOWSKI, U.; WITTING, K.; ZNAMENSHCHYKOV, O.: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definition, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 234, Paderborn, 2009
- [AiF09-ol] AIF-ABSCHLUSSBERICHT: Untersuchungen zur Verbesserung der Stempelstandzeit für die Heißpräge-MID-Technik, FV-Nr.: 15257, 2009 unter: <http://www.imat.hsg-imit.de/fileadmin/hsg-mst/pdfs/AiF15257N-Heisspraegestempel.pdf>
- [Alt12] ALT, O.: Modell-basierte Systementwicklung mit SysML – In der Praxis. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Aue08] AUER, B.: Grundkurs Buchführung. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2008
- [BC10] BONE, M.; CLOUTIER, R. J.: The Current State of Model Based Systems Engineering. In: Proceedings of the 8th Conference on Systems Engineering Research, 2010
- [BEP+11] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Verlag, Berlin, 13. überarbeitete Auflage, 2011
- [Bur99] BURGER, A.: Kostenmanagement. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 3. Vollständig überarbeitete Auflage, 1999
- [CF92] CLARK, K.; FUJIMOTO, T.: Automobilentwicklung mit System: Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 1992
- [Con13] CONRAD, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre – Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik. Carl Hanser Verlag, München, 6. aktualisierte Auflage, 2013
- [DH02] DAENZER, W. F.; HUBER, F. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 11. Auflage, 2002
- [Dit98] DITTMAR, J.: Prototypgestützte Zielkostenplanung – Kostenmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Controlling. Vahlen Verlag, München, 1998
- [Dud14a-ol] DUDEN: Wörterbuch Duden online, 25. Juni 2014, unter:
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Systematik#Bedeutung1>
- [Dud14b-ol] DUDEN: Wörterbuch Duden online, 25. Juni 2014, unter:
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Kosten>
- [Dud14c-ol] DUDEN: Wörterbuch Duden online, 25. Juni 2014, unter:
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Loesungskonzept>
- [Dud16-ol] DUDEN: Wörterbuch Duden online, 8. Juni 2016, unter:
<http://www.duden.de/rechtschreibung/kalkulieren>
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011

- [Ehr07] EHRENSTEIN, G. W.: *Mit Kunststoffen konstruieren*. Carl Hanser Verlag, München, 3. aktualisierte Auflage, 2007
- [Ehr09] EHRLENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag, München, 4. aktualisierte Auflage, 2009
- [EKL07] EHRLENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Springer Verlag, Berlin, 2. aktualisierte Auflage, 2007
- [Fah95] FAHRWINKEL, U.: *Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering*. Dissertation. Fachbereich für Maschinen-technik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 1, 1995
- [FG13] FELDHUSEN, J.; GORTE, K. H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer Verlag, Berlin, 8. vollständig überarbeitet Auflage, 2013
- [FGG+11] FRANKE, J.; GAUSERMEIER, J.; GOTH, C.; DUMITRESCU, R.: *MID Studie 2011 – Markt und Technologie Analyse*. Forschungsvereinigung räumliche elektronische Baugruppen 3-D MID e.V., Erlangen, 2011
- [Fis08] FISCHER, J. O.: *Kostenbewusstes Konstruieren – Praxisbewährte Methoden und Informati-onssysteme für den Konstruktionsprozess*. Springer Verlag, Berlin, 2008
- [FKH+94] FISCHER, J.; KOCH, R.; HAUSCHULTE, K.-H.; JAKUSCHONA, K.; SCHMIDT-FABER, B.; SZU, K.: *Design to Cost - Entwicklungsbegleitende Prozesskostenprognose und Zielkostenermittlung im Produktlebenzyklus*. In: *Tagungsband CAD '94 - Produktdatenmodellierung und Prozess-modellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme*, Paderborn, 1994, S. 463-476
- [FMS12] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: *A practical guide to SysML – The systems modeling language*. Morgan Kaufmann, Waltham, 2. Auflage, 2012
- [For04] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID e.V.: *3D-MID Technologie – Räumliche elektronische Baugruppen*. Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [For15a-ol] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID e.V., 11. März 2015, unter: <http://www.3d-mid.de/2/news/reviews/3-d-mid-auf-der-smt-hybrid-packing-2013.html>
- [For15b-ol] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID e.V., 6. März 2015, unter: <http://www.3d-mid.de/1/aktuelles/informationen/midster.html>
- [Fra06] FRANK, U.: *Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlags-schriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fra95] FRANKE, J.: *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)*. Dissertation, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [Fra13] FRANKE, J. (Hrsg.): *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)*. Carl Hanser Verlag, München, 2013
- [Fri11] FRIEDRICH, M. O.: *Funktionsorientiertes Konzept zur Unterstützung früher Phasen der Produktentwicklung in der Informationstechnik*, Dissertation, TU München, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, München, 2011
- [FSS14] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G.: *Handbuch, Fügen, Handhaben, Montieren*. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: *A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production Systems*. In: *Proceedings*

- of the Design 2010 – 11th International Design Conference. May 17-20 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: *Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K.: *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: *Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems*. Research in Engineering Design, Vol. 20, No. 4, Springer Verlag, London, 2009
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHARDT, G.; WIENDAHL, H.-P.: *Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [Got13] GOTTH, C.: *Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*. Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2013
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung – Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [GRS+11] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.-J.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): *8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [GRS14] GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.-J.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): *Design Methodology for Intelligent Technical Systems Systems – Develop Intelligent Technical Systems of the Future*, Springer Verlag, Heidelberg, 2014
- [GTS14] GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.: *Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme: Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten*. Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [GWR09] GAUBINGER, K.; WERANI, T.; RABL, M.: *Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement – Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Han55] HANSEN, F.: *Konstruktionssystematik – Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- [Har15-01] HARTING: Harting AG, 4. März 2015, unter:
http://www.hartingmitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/case_studies/Beleuchtungsmodul_f%BCr_Fahrzeuginnenraum.pdf
- [Her82] HERRMANN, G. (Hrsg.): *Handbuch der Leiterplattentechnik – Laminate, Manufacturing, Assembly, Test*. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1982
- [Hor93] HORVÁTH, P. (Hrsg.): *Target costing – marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993
- [Hub76] HUBKA, V.: *Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktionstätigkeiten*. Springer-Verlag, Berlin, 1976
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: *Mechatronics – „What Is It, Why and How?“ – An Editorial*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996
- [INC10] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Hrsg.): *Systems Engineering Handbook – A Guide for System life cycle processes and activities*. Elsevier, 2010

- [INC12] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Hrsg.): Internetseite des INCOSE. Unter: www.incose.org, 11. Mai 2012
- [JIZ+10] JUST, V.; ILLG, I.; ZEINELDIN, T.; TRÄCHTLER, A.: Efficient Design of Complex Mechatronic Products Using the Example of the Separation Process in an ATM. In: Proceedings of ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2010), Band 38646 , Vancouver, Canada, 2010
- [Joo06] JOOS-SACHSE, T.: Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement – Grundlagen, Instrumente, Neue Ansätze. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 4. überarbeitete Auflage, 2006
- [Kae13] KAESLER, C.: Kosten- und Leistungsrechnung der Bilanzbuchhalter. Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 5. durchgesehene Auflage, 2013
- [Kai09] KAISER, I.: Systematik zur Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 248, Paderborn, 2009
- [Kal98] KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 42, Paderborn, 1998
- [Koc66] KOCH, H.: Grundprobleme der Kostenrechnung. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1966.
- [Kue14] KUEHNAPFEL, J., B.: Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [Lin09] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer Verlag, Berlin, 3. korrigierte Auflage, 2009
- [Mor69] MORI, T.: Yaskawa Internal Trademark Application Memo, 21.131.01. July, 1969
- [Mül06] MÜLLER, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [NiB06] NIBL, A. M.: Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Dr. Mut Verlag, München, 2006
- [Nor12] NORDSIEK, D.: Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 304, Paderborn, 2012
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [Pei07] PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 221, Paderborn, 2007
- [Rap99] RAPP, T.: Produktstrukturierung, Dissertation, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1999
- [Rot01] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 2 – Kataloge. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [Saa80] SAATY, T. L.: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series). McGraw-Hill, New York, 1980
- [Sch99] SCHEEL, W. (Hrsg.): Baugruppentechnologie der Elektronik - Montage. Verlag Technik, Berlin, 1999
- [Sch05] SCHUH, G.: Produktkomplexität managen – Strategien, Methoden, Tools. Carl Hanser Verlag, München, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2005

- [Sei93] SEIDENSCHWARZ, W.: Target costing – marktorientiertes Zielkostenmanagement – Controlling Praxis. Vahler Verlag, München, 1993
- [SK11] SCHUH, G.; KLAPPERT, S. (Hrsg.): Technologiemanagement – Handbuch Produktion und Management 2. Springer Verlag, Berlin, 2. Vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2011
- [SK97] SPUR, G.; KRAUSE, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [SMM+12] STIEGLER, A.; MALETZ, M.; MROTZEK, M.; WECK, T.: Generierung eines multiperspektiven Systemmodells in der automobilen Antriebsstrangentwicklung – Herausforderungen und Erfahrungen. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering, Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [SV12] SAATY, T. L.; VARGAS, L. G.: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Springer Verlag, New York, 2. Auflage, 2012
- [VDI11] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Wertanalyse – das Tool im Value Management. Springer Verlag, Berlin, 6. aktualisierte Auflage, 2011
- [Vaß15] VABHOLZ, M.: Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 346, Paderborn, 2015
- [VS12] VOEGELE, A.; SOMMER, L.: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure – Kostenmanagement im Engineering. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [Wat06] WATTY, R.: Methode zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik. Dissertation. Institut für Konstruktionstechnik und technisches Design, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006
- [Wes06] WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [WK06] WEBER, W; KABST, R.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Gabler Verlag, Wiesbaden, 6. überarbeitete Auflage, 2006
- [WZ09] WESTKÄMPER, E.; ZAHN, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen – Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Zan76] ZANGEMEISTER, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Dissertation, Wittmансche Buchhandlung, München, 1976
- [Zir10] ZIRKLER, S. C.: Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Dr. Mut Verlag, München, 2010
- [Zwi71] ZWICKY, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. Droener-Knaur Verlag, München, 1971

Normen und Richtlinien

- [DIN32990] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Kosteninformationen – Begriffe zu Kosteninformationen in der Maschinenindustrie. DIN 32990, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin, 1989
- [DIN9000] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. DIN EN ISO 9000, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004

- [VDI2225-1] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Vereinfachte Kostenermittlung. VDI-Richtlinie 2225, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [VDI2225-2] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Tabellenwerk. VDI-Richtlinie 2225, Blatt 2, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [VDI2225-3] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung. VDI-Richtlinie 2225, Blatt 3, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [VDI2225-4] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Bemessungslehre. VDI-Richtlinie 2225, Blatt 4, Beuth Verlag, Berlin, 1998
- [VDI2234] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur. VDI-Richtlinie 2234, Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [VDI2800-1] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Wertanalyse. VDI-Richtlinie 2800, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin, 2010
- [VDI2800-2] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Wertanalysearbeitsplan nach DIN EN 12973 - Formularsatz. VDI-Richtlinie 2800, Blatt 2, Beuth Verlag, Berlin, 2010

Anhang

Inhaltsverzeichnis		Seite
A1 Kompetenzkarten		A-1
A2 Prozesskarten.....		A-3

A1 Kompetenzkarten

Bestücken
Vorhandenes Kompetenzlevel:
Anordnung der Bauelemente
<ul style="list-style-type: none">5 unterschiedliche Freiformflächen4 Freiformfläche, in einer Ebene3 getrennte Prozessflächen2 Angrenzende Prozessflächen1 Ebene Prozessfläche

Bild A-1: Kompetenzkarte „Bestücken“

Metallisieren
Vorhandenes Kompetenzlevel:
Qualität der Oberfläche
<ul style="list-style-type: none">5 Galvanische Nachverstärkung notwendig, bondbar, feine Leiterbahnstrukturen, sehr geringer Leiterbahnabstand4 Galvanische Nachverstärkung notwendig, bondbar, feine Leiterbahnstrukturen, geringer Leiterbahnabstand3 Galvanische Nachverstärkung notwendig, Bondbar2 Keine Nachverstärkung, bondbar1 Keine Nachverstärkung, nicht bondbar

Bild A-2: Kompetenzkarte „Metallisieren“

Spritzgießen
Vorhandenes Kompetenzlevel:
Geometrie der mechanischen Struktur
<ul style="list-style-type: none">5 3D mit Hinterschneidungen, beheiztes/gekühltes Werkzeug, mehrere Angüsse4 3D, ohne Hinterschneidungen, beheiztes/gekühltes Werkzeug, mehrere Angüsse3 3D, ohne Hinterschneidungen, mehrere Angüsse2 3D, ohne Hinterschneidungen, ein Anguss1 2D, ein Anguss

Bild A-3: Kompetenzkarte „Spritzgießen“

Strukturieren
Vorhandenes Kompetenzlevel:
Komplexität der Leiterbahngometrie
5 3 Laserquellen, Umpositionierung des Bauteils notwendig
4 2 Laserquellen, Umpositionierung des Bauteils notwendig
3 1 Laserquelle, Umpositionierung des Bauteils
2 2-3 Laserquellen, keine Umpositionierung
1 1 Laserquelle, keine Umpositionierung

Bild A-4: Kompetenzkarte „Strukturieren“

A2 Prozesskarten

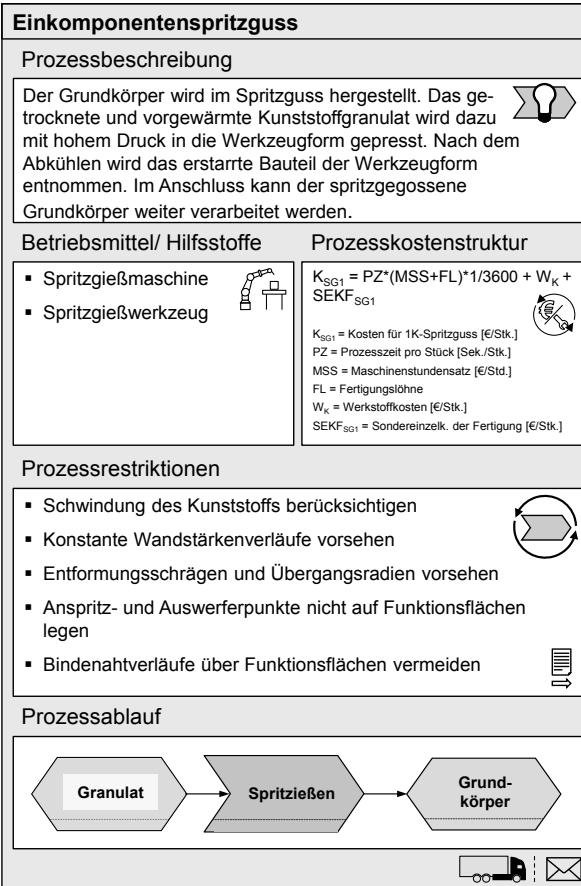


Bild A-5: Prozesskarte „Einkomponentenspritzguss“

Zweikomponentenspritzguss (PCK/SKW)

Prozessbeschreibung

Der Schaltungsträger wird in zwei aufeinanderfolgenden Spritzgießzyklen hergestellt. Es werden ein metallisierbarer und nicht metallisierbarer Kunststoff einem gespritzt. Man unterscheidet das PKW-Verfahren (Printed Circuit Board Koll-morgen) und das SKW-Verfahren (Sankyo Kasei Wiring Board).



Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Spritzgießmaschine
- Spritzgießwerkzeug



Prozesskostenstruktur

$$K_{SG2} = PZ \cdot (MSS + FL) \cdot 1/3600 + W_K + SEKF_{SG2}$$



K_{SG2} = Kosten für 2K-Spritzguss [€/Stk.]

PZ = Prozesszeit pro Stück [Sek./Stk.]

MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]

FL = Fertigungslöhne

W_K = Werkstoffkosten [€/Stk.]

$SEKF_{SG2}$ = Sondereinzellk. der Fertigung [€/Stk.]

Prozessrestriktionen

- Schwindung des Kunststoffs berücksichtigen
- Konstante Wandstärkenverläufe vorsehen
- Entformungsschrägen und Übergangsradien vorsehen
- Anspritz- und Auswerferpunkte nicht auf Funktionsflächen legen
- Bindenahverläufe über Funktionsflächen vermeiden



Prozessablauf

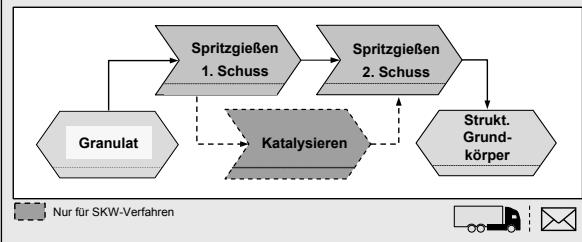


Bild A-6: Prozesskarte „Zweikomponentenspritzguss“

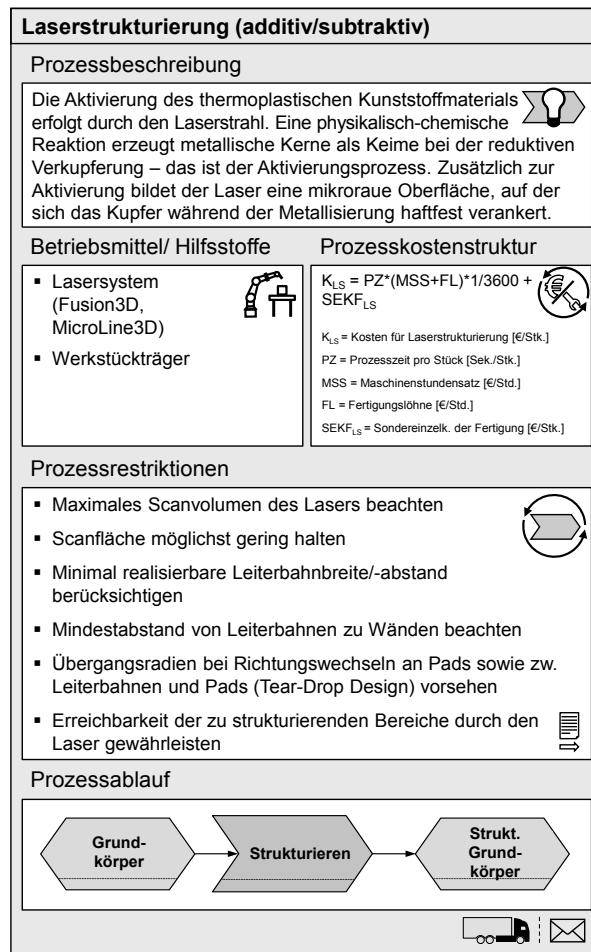


Bild A-7: Prozesskarte „Laserstrukturierung“

Chemisch-galvanische Metallisierung

Prozessbeschreibung

Ein nasschemischer Prozess, bei dem die Bauteile während des Vorgangs in die Behandlungslösungen getaucht werden. Die Handhabung erfolgt über Warenträger wie Gestelle oder Trommeln. Der Schichtaufbau der metallisierten Strukturen unterteilt sich in der Regel in eine Basissschicht aus Kupfer, eine darauf aufgebrachte Nickelschicht sowie eine Finish-Beschichtung aus Gold.



Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Metallisierungsanlage für bestehend aus Prozessbecken für Aktivierung, Vorbehandlung und Beschichtung. Beschichtung je nach gewünschtem Aufbau der Leiterbahnen (z.B. Cu-Ni-Au)
- Werkstückträger



Prozesskostenstruktur

$$K_{MET} = PZ * (MSS + FL) * 1/3600 * SD * A * K_{MET} + SEKF_{MET}$$



K_{MET} = Kosten für Metallisierung [€/Stk.]

PZ = Prozesszeit pro Stück [μm*Sek./Stk.]

MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]

FL = Fertigungslöhne [€/Std.]

SD = Schichtdicke [μm¹/1000]

A = Fläche der Leiterbahnen [mm²]

K_{MET} = Kostenkoeffizient für Metallisierung [€/mm²]

$SEKF_{MET}$ = Sondereinzelk. der Fertigung [€/Stk.]

Prozessrestriktionen

- Leiterbahnführungen über scharfe Kanten vermeiden
- Kavitäten und Sacklöcher hinsichtlich der Verschleppung von Chemikalien vermeiden
- Restriktionen durch unterschiedliche Warenträger beachten
- Maximal realisierbare Schichtdicke durch außenstromlose Prozessführung beachten
- Leiterbahnführungen über Bindenähte aufgrund thermomechanischer Belastungen auf die metallisierte Struktur vermeiden



Prozessablauf

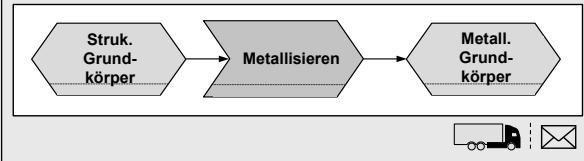


Bild A-8: Prozesskarte „Metallisierung“

Folienhinterspritzen

Prozessbeschreibung

Das Verfahren zeichnet sich durch eine kurze Prozesskette aus. Es kommt eine flexible Leiterbildfolie zum Einsatz, die mit Kunststoff hintspritzt wird. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass die Kunststofffolie mit etablierten Techniken aus der Leiterplattenherstellung strukturiert und metallisiert wird. Es werden jedoch hohe Anforderungen an den Spritzgießprozess gestellt.

Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Spritzgießmaschine
- Spritzgießwerkzeug
- Leiterbildfolie



Prozesskostenstruktur

$$K_{FH} = PZ \cdot (MSS + FL) \cdot 1/3600 + K_{LBF} + SEKF_{FH}$$

K_{FH} = Kosten für Folienhinterspritzen [€/Stk.]
 PZ = Prozesszeit pro Stück [Sek/Stk.]
 MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]
 FL = Fertigungslohn [€/Std.]
 K_{LBF} = Leiterbildfolie [€/Stk.]
 $SEKF_{FH}$ = Sonderreinzelk. der Fertigung [€/Stk.]



Prozessrestriktionen

- Aufgrund der erforderlichen Umformung der bedruckten Folien muss das aufgetragene Medium eine hohe Flexibilität und eine gute Haftung zur Folie aufweisen
- Passgenauigkeit der Folie in das Spritzgießwerkzeug beachten, um Faltenbildung, Oberflächendefekte und Überspritzung zu vermeiden
- Folienschwindung berücksichtigen
- Geometrie der Folie so realisieren, dass diese dem Halt im Spritzgießwerkzeug dienen kann, sonst mechanische Fixierung oder elektrostatische Aufladung



Prozessablauf

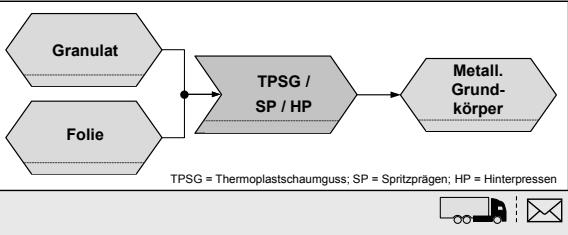


Bild A-9: Prozesskarte „Folienhinterspritzen“

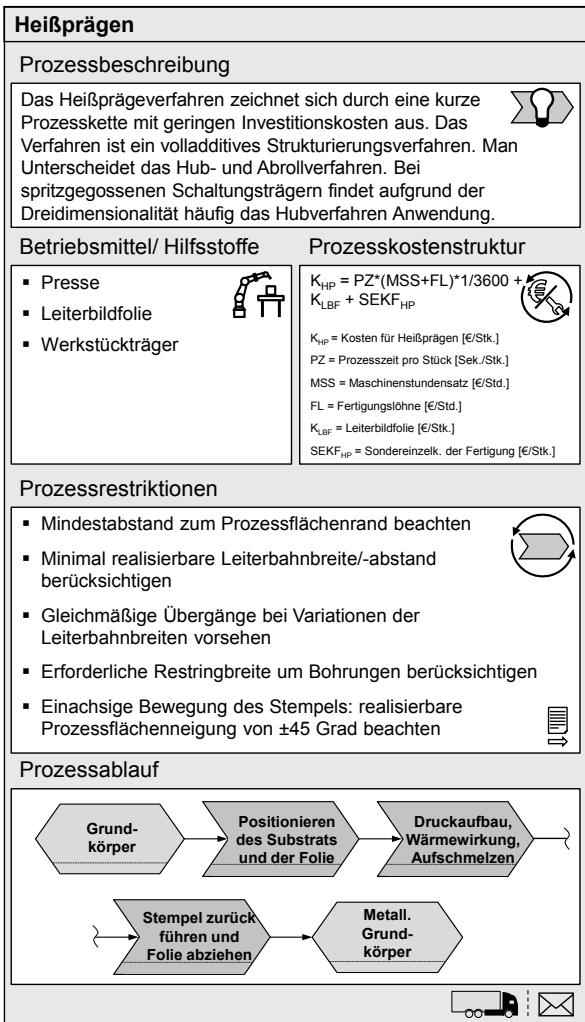


Bild A-10: Prozesskarte „Heißprägen“

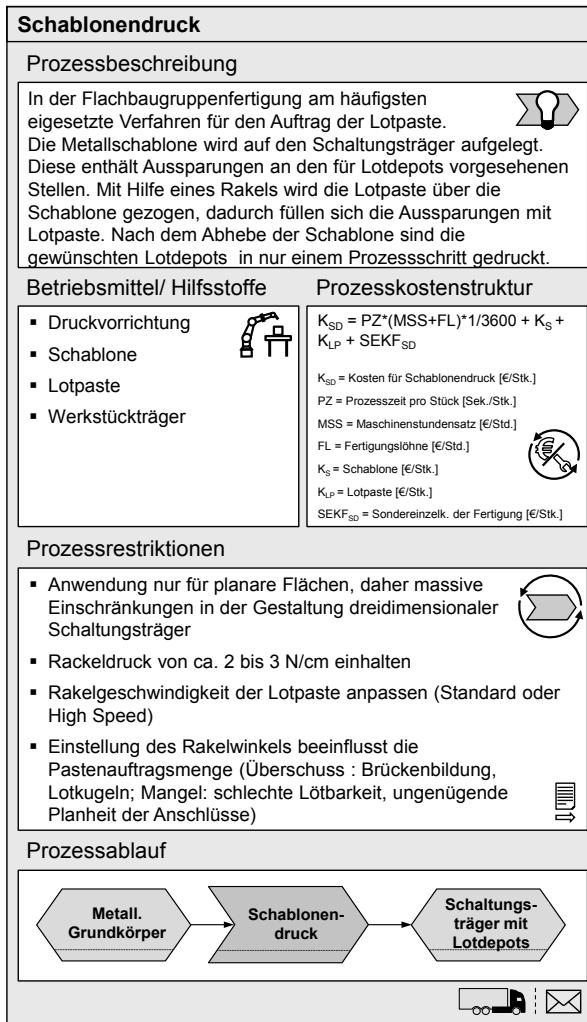


Bild A-11: Prozesskarte „Schablonendruck“

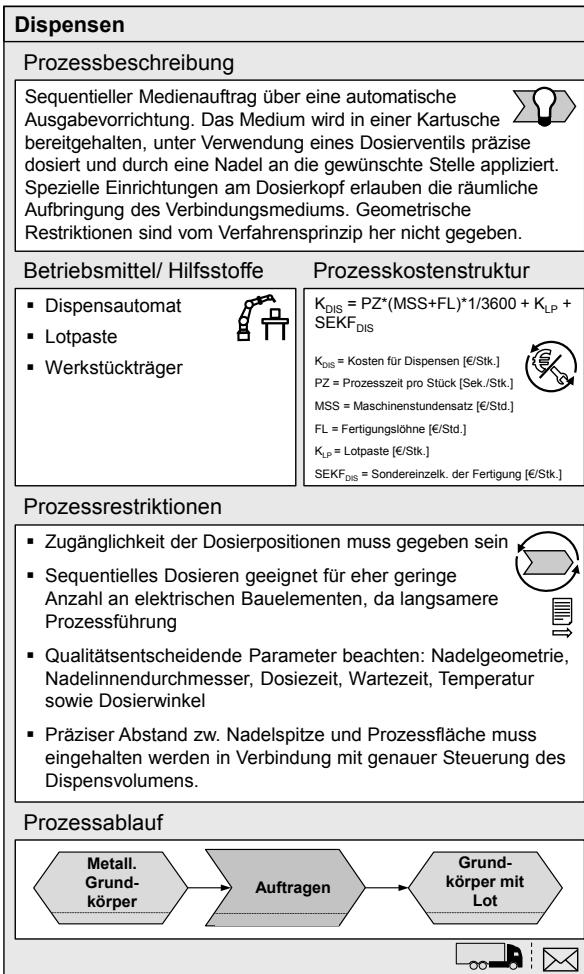


Bild A-12: Prozesskarte „Dispensen“

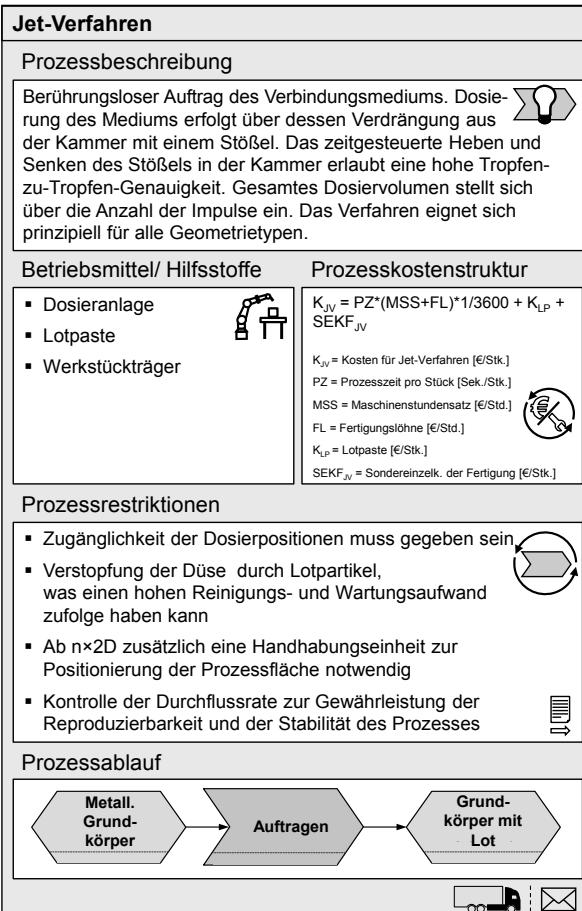


Bild A-13: Prozesskarte „Jet-Verfahren“

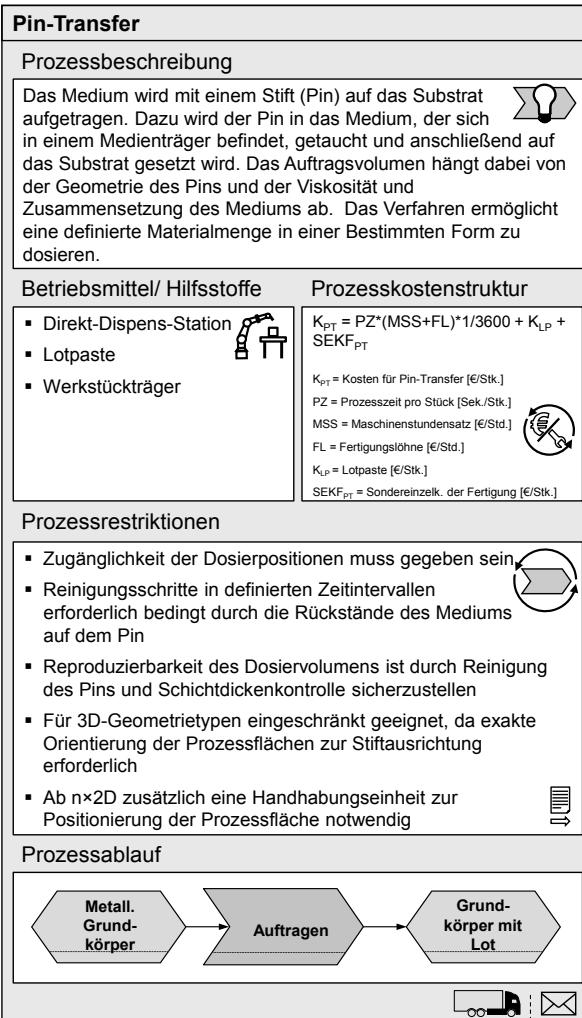


Bild A-14: Prozesskarte „Pin-Transfer“

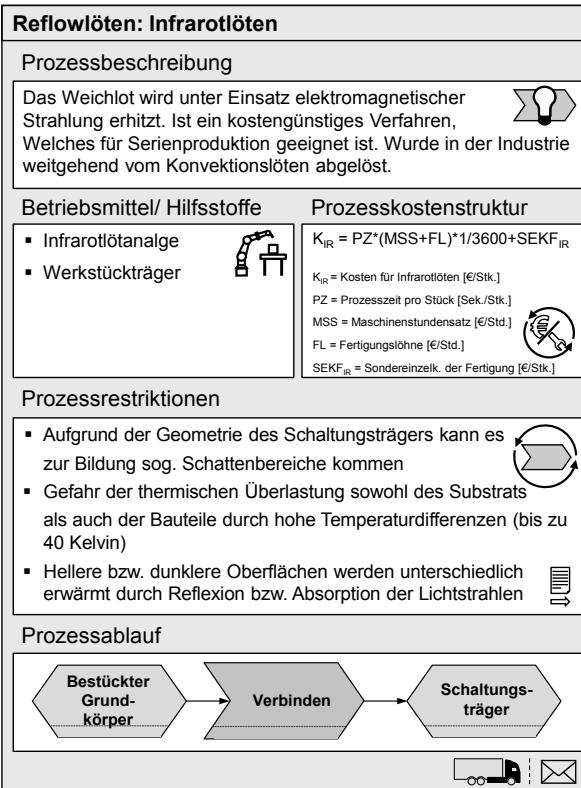


Bild A-15: Prozesskarte Infrarotlöten

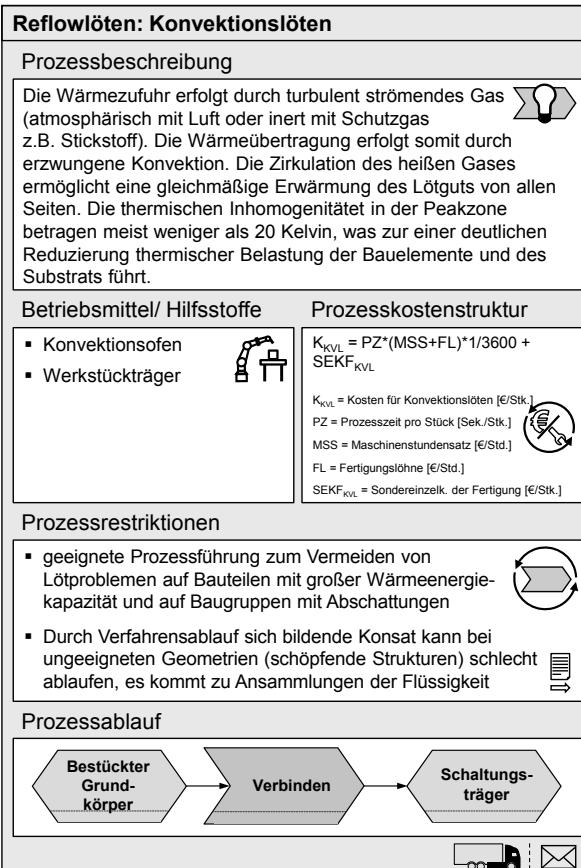


Bild A-16: Prozesskarte „Konvektionslöten“

Reflowlöten: Kondensationslöten

Prozessbeschreibung

Der Dampf verdrängt des Luftsauerstoff, wirkt somit inert, was die Oxidation im Prozess vermeidet. Das physikalische Prinzip der Dampfphase schließt eine Überhitzung zuverlässig aus, da die Prozesstemperatur auf die Dampftemperatur des Dampfphasenmediums begrenzt ist. Auch kritische Bauteiloberflächen oder schwer zu erwärmende Baugruppen, wie mehrlagige Leiterplatten, doppelseitig inhomogen bestückt, lassen sich problemlos löten.

Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Dampfphasenlötanlage 
- Werkstückträger

Prozesskostenstruktur

$$K_{KDL} = PZ \cdot (MSS + FL) \cdot 1/3600 + SEKF_{KDL}$$

K_{KDL} = Kosten für Kondensationslöten [€/Stk.]

PZ = Prozeszeit pro Stück [Sek./Stk.]

MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]

FL = Fertigungslöhne [€/Std.]

$SEKF_{KDL}$ = Sondereinzelk. der Fertigung [€/Stk.]

Prozessrestriktionen

- Vermehrtes Auftreten des „Tombstone Effect“, dem man mit mehreren Ansätzen entgegenwirken kann 
- Bei der Bauteilgestaltung ist auf eine gute Abflussmöglichkeit des Prozessmediums zu achten, um langen Abdunstzeiten vorzubeugen 

Prozessablauf

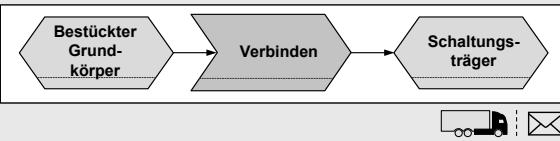


Bild A-17: Prozesskarte „Kondensationslöten“

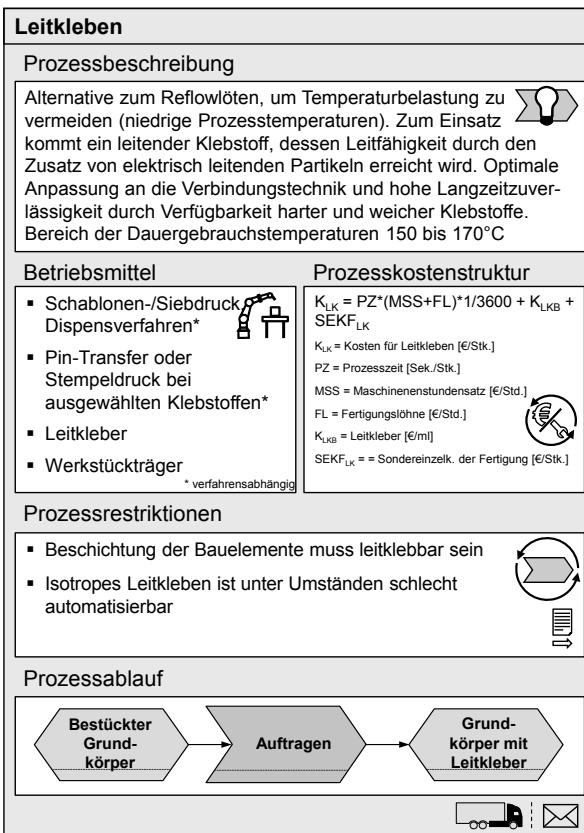


Bild A-18: Prozesskarte „Leitkleben“

Drahtbonden

Prozessbeschreibung

Kontaktierung der Siliziumchips an das Zwischenmaterial (Leadframe) eines IC-Gehäuses oder an das Substrat (kleine Leiterplatte). Dabei wird ein dünner Verbindungsdräht (Bonddraht) vom Chip zu seiner Umgebung oder umgekehrt gezogen. Eine dauerhafte Kontaktierung des Drahtes erfolgt durch einen Ultraschallschweißprozess.



Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Bondmaschine
- Bonddraht
- Werkstückträger



Prozesskostenstruktur

$$K_{DB} = PZ \cdot (MSS + FL) \cdot 1/3600 + K_{BD} + SEKF_{DB}$$

K_{DB} = Kosten für Drahtbonden [€/Stk.]

PZ = Prozesszeit pro Stück [Sek./Stk.]

MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]

FL = Fertigungslöhne [€/Std.]

K_{BD} = Bonddraht [€/Stk.]

$SEKF_{DB}$ = Sondereinzelk. der Fertigung [€/Stk.]



Prozessrestriktionen

- Erzeugen einer geringen Oberflächenrauheit
- Da Metallisierung als Vorprozess erfolgte, ist eine spezifische Rauheit schon im Vorfeld gefordert, daher genaue Abstimmung aller Prozessparameter erforderlich
- Geeignete Fixierung in der Gestaltungsphase vorsehen, denn eine gute Ultraschallübertragung setzt eine harte Auflage des Bondwerkzeugs voraus



Prozessablauf

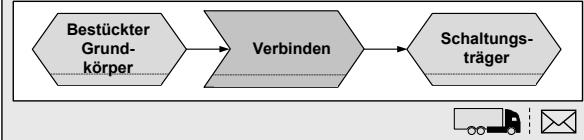


Bild A-19: Prozesskarte „Drahtbonden“

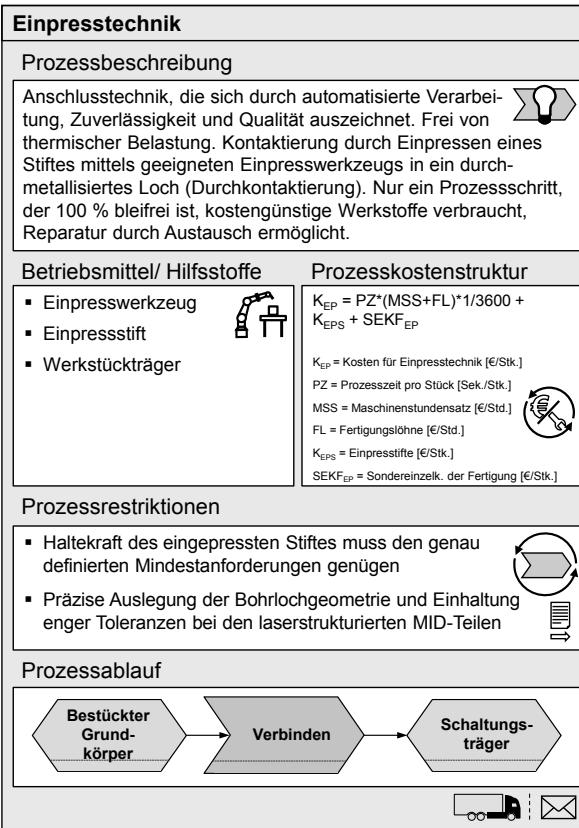


Bild A-20: Prozesskarte „Einpresstechnik“

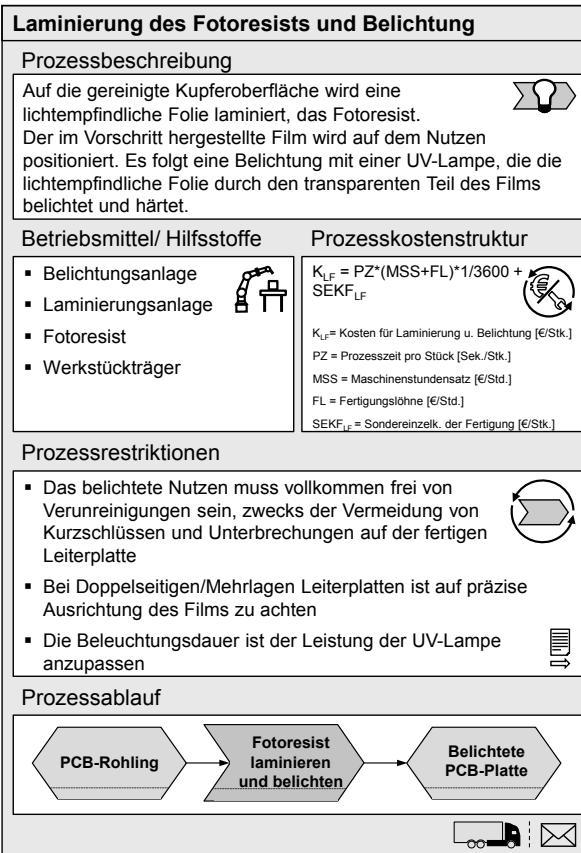


Bild A-21: Prozesskarte „Laminieren des Fotoresists und Belichten“

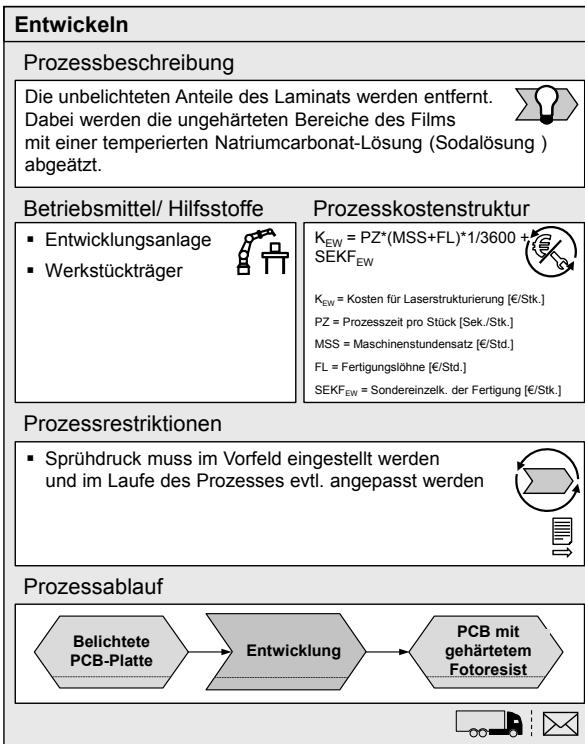


Bild A-22: Prozesskarte „Entwickeln“

Ätzen

Prozessbeschreibung

Das überschüssige, freiliegende Kupfer wird entfernt. Im Standardverfahren erfolgt dies durch Wegätzen in einer Ätzmaschine. Typische industrielle Ätzmittel sind Eisen-III-Chlorid und Ammoniumpersulfat. Dadurch entsteht die Leiterbahnstruktur, deren Qualität stark über die Gesamtqualität der Leiterplatte entscheidet.



Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Ätzmaschine
- Werkstückträger



Prozesskostenstruktur

$$K_{AE} = PZ * (MSS + FL) * 1/3600 + SEKF_{AE}$$



K_{AE} = Kosten für Ätzen [€/Stk.]

PZ = Prozesszeit pro Stück [Sek./Stk.]

MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]

FL = Fertigungslöhne [€/Std.]

SEKF_{AE} = Sonderreinzelk. der Fertigung [€/Stk.]

Prozessrestriktionen

- Bei einer Verwendung des Resists werden die Kupferoberflächen geschützt, aber die Flanken können durch das Ätzmedium angegriffen werden. Dieses hat Unterätzung als Folge.



Prozessablauf

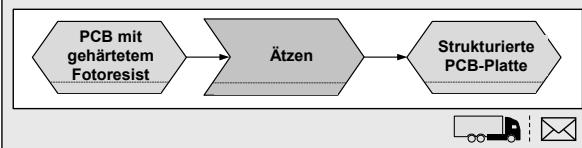


Bild A-23: Prozesskarte „Ätzen“

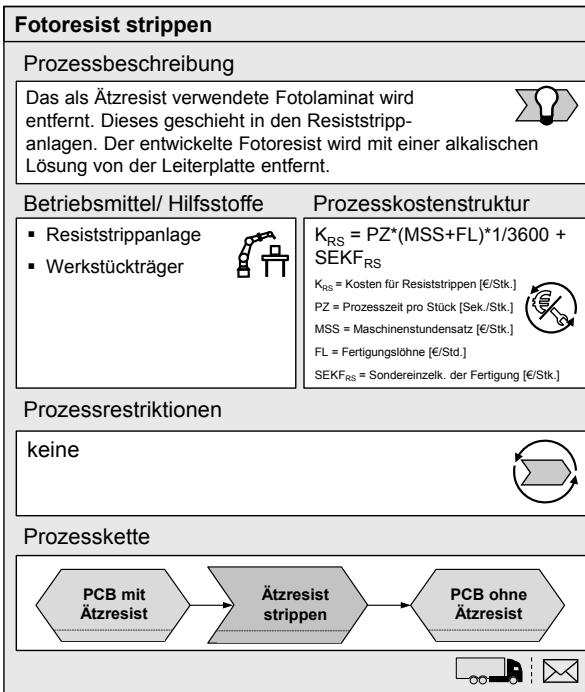


Bild A-24: Prozesskarte „Fotoresist stripfen“

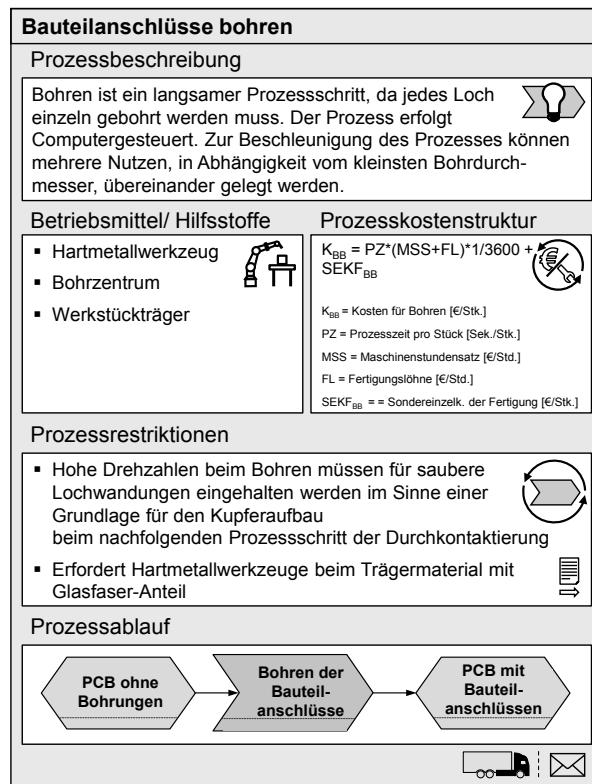


Bild A-25: Prozesskarte „Bauteilanschlüsse bohren“

Applizieren der Lötstoppmaske

Prozessbeschreibung

Zunächst werden die Nutzen zur Entfernung von Verunreinigungen gereinigt und gebürstet. Durch antistatische Kleberollen werden letzte Staubreste entfernt. Eine Beschichtungsmaschine bedeckt das Nutzen mit Epoxidharz-Lötstopplack anschließend werden die Nutzen belichtet. Das ungehärtete Resist wird beim Entwickeln entfernt. Für einen widerstandsfähigen und permanenten Lötstopplack wird dieser in einer Durchlauföfen ausgehärtet.



Betriebsmittel/ Hilfsstoffe

- Reinigungsvorrichtung
- Beschichtungs-maschine
- Durchlauföfen
- Lötstopplack
- Werkstückträger

Prozesskostenstruktur

$$K_{LM} = PZ \cdot (MSS + FL) \cdot 1/3600 + SEKF_{LM}$$

K_{LM} = Kosten für Lötstoppmaske [€/Stk.]
 PZ = Prozesszeit pro Stück [Sek./Stk.]
 MSS = Maschinenstundensatz [€/Std.]
 FL = Fertigungslöhne [€/Std.]
 $SEKF_{LM}$ = Sonderreinzelk. der Fertigung [€/Stk.]

Prozessrestriktionen

- Auftragsdicke ist abhängig von Prozessschritten, Viskosität sowie Festkörperanteilen des Lackes
- Minimale Stegbreite liegt bei ca. 100 µm (bei der Laser-Direktbelichtung sind Stegbreiten von 50 µm realisierbar)



Prozessablauf

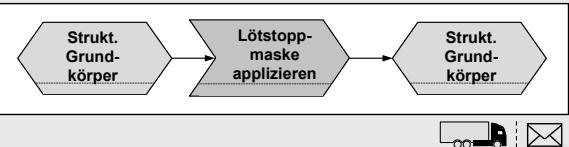


Bild A-26: Prozesskarte „Lötstoppmaske“

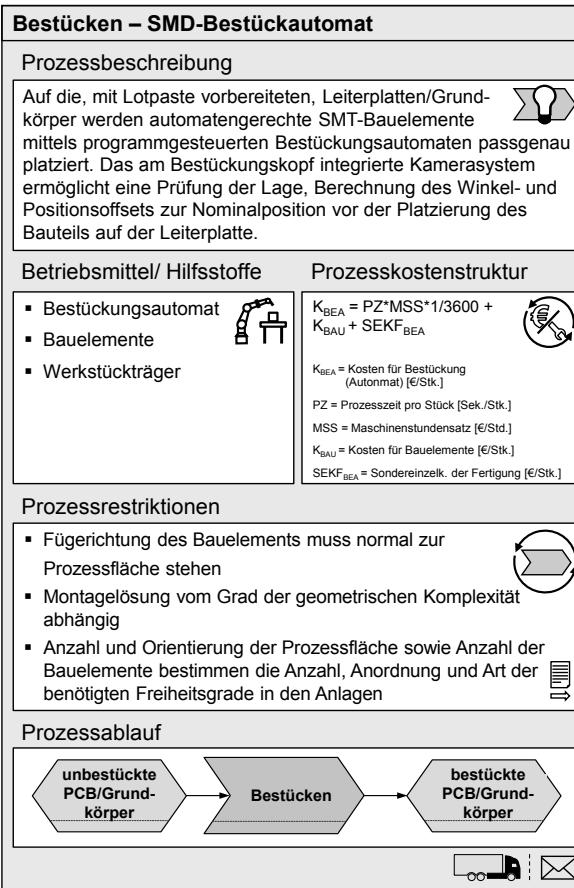


Bild A-27: Prozesskarte „Bestücken – SMD-Bestückautomat“

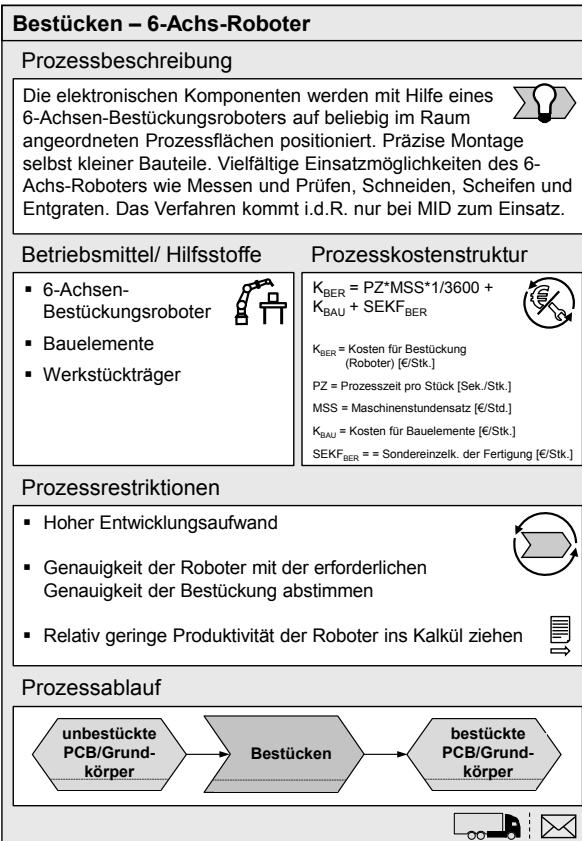


Bild A-28: Prozesskarte „Bestücken – 6-Achs-Roboter“

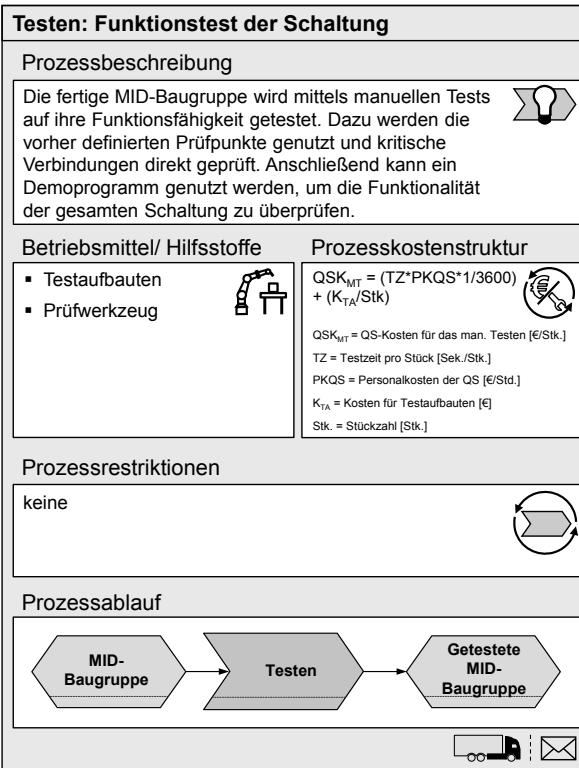


Bild A-29: Prozesskarte „Funktionstest“

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

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

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

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- | | | | |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 340 | DOROCIAK, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5 | Bd. 347 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 11. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. Oktober 2015, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 347, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-66-3 |
| Bd. 341 | BAUER, F.: Planungswerzeug zur wissensbasierten Produktionssystem-konzipierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 341, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-60-1 | Bd. 348 | HEINZEMANN, C.: Verification and Simulation of Self-Adaptive Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 348, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-67-0 |
| Bd. 342 | GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 342, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-61-8 | Bd. 349 | MARKWART, P.: Analytische Herleitung der Reihenfolgeregeln zur Entzerrung hochauslastender Auftragsmerkmale. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 349, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-68-7 |
| Bd. 343 | GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 343, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-62-5 | Bd. 350 | RÜBBELKE, R.: Systematik zur innovationsorientierten Kompetenzplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 350, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-69-4 |
| Bd. 344 | BRÖKELMANN, J.: Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 344, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-63-2 | Bd. 351 | BRENNER, C.: Szenario-basierte Synthese verteilter mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 351, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-70-0 |
| Bd. 345 | SHAREEF, Z.: Path Planning and Trajectory Optimization of Delta Parallel Robot. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 345, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-64-9 | Bd. 352 | WALL, M.: Systematik zur technologie-induzierten Produkt- und Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 352, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-71-7 |
| Bd. 346 | VASSHOLZ, M.: Systematik zur wirtschaftlichkeitsorientierten Konzipierung Intelligenter Technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 346, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-65-6 | Bd. 353 | CORD-LANDWEHR, A.: Selfish Network Creation - On Variants of Network Creation Games. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 353, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-72-4 |

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- | | | | |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 354 | ANACKER, H.: Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 354, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-73-1 | Bd. 361 | PETER, S.: Systematik zur Antizipation von Stakeholder-Reaktionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 361, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-80-9 |
| Bd. 355 | RUDTSCH, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 355, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-74-8 | Bd. 362 | ECHTERHOFF, O.: Systematik zur Erarbeitung modellbasierter Entwicklungsaufträge. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 362, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-81-6 |
| Bd. 356 | SÖLLNER, C.: Methode zur Planung eines zukunftsfähigen Produktpportfolios. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 356, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-75-5 | Bd. 363 | TSCHIRNER, C.: Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 363, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-82-3 |
| Bd. 357 | AMSHOFF, B.: Systematik zur musterbasierten Entwicklung technologieinduzierter Geschäftsmodelle. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 357, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-76-2 | Bd. 364 | KNOOP, S.: Flachheitsbasierte Positionsregelungen für Parallelkinematiken am Beispiel eines hochdynamischen hydraulischen Hexapoden. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 364, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-83-0 |
| Bd. 358 | LÖFFLER, A.: Entwicklung einer modellbasierten In-the-Loop-Testumgebung für Waschautomaten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 358, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-77-9 | Bd. 365 | KLIEWE, D.: Entwurfssystematik für den präventiven Schutz intelligenter Technischer Systeme vor Produktpiraterie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 365, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-84-7 |
| Bd. 359 | LEHNER, A.: Systematik zur lösungsmusterbasierten Entwicklung von Frugal Innovations. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 359, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-78-6 | Bd. 366 | IWANEK, P.: Systematik zur Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 366, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-85-4 |
| Bd. 360 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 12. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. Dezember 2016, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 360, Paderborn, 2016 – ISBN 978-3-942647-79-3 | Bd. 367 | SCHWEERS, C.: Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 367, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-86-1 |