

*Jan Brökelmann*

***Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen***

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2015

ISSN 2195-5239

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: Jan Brökelmann

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

Printed in Germany

## **Geleitwort**

Mehr denn je müssen Produktionssysteme in der Lage sein Produktvarianten wirtschaftlich herzustellen. Das Paradigma der flexiblen Automatisierung ist seit Jahren der Ansatz diese Herausforderung zu bewältigen. Die Inbetriebnahme ist bei solchen Produktionssystemen häufig ein Engpass. In der Inbetriebnahmephase werden Fehler aus vorangegangenen Phasen identifiziert. Dies führt zu einer hohen Unsicherheit hinsichtlich Zeit und Kosten in dieser Phase. Verstärkt wird diese Problematik durch die seit einiger Zeit zu verzeichnende Entwicklung, dass intelligente Produktionsanlagen via Internet zu Wertschöpfungssystemen vernetzt werden, wofür die Begriffe Cyber-Physical Systems und Industrie 4.0 stehen.

Als probates Mittel zur Verkürzung der Anlagenentstehungszeit und der Inbetriebnahme bietet sich die virtuelle Inbetriebnahme an. Darunter verstehen wir den frühzeitigen Test der Steuerungsprogramme an Verhaltensmodellen der Anlage. Die Erstellung der Verhaltensmodelle ist allerdings sehr aufwändig.

Vor diesem Hintergrund hat Herr Brökelmann eine Systematik zur virtuellen Inbetriebnahme entwickelt, die sich frühzeitig in den Anlagenentstehungsprozess integriert. Sie gliedert sich in die drei Bestandteile: Vorgehensmodell, Spezifikationstechnik sowie Methoden und Werkzeuge für die Lösung von Teilaufgaben. Die Systematik verbessert das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Verhaltensmodelle durch ihre Mehrfachverwendung über den gesamten Anlagenentstehungsprozess. Durch Integration der Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe wird der benötigte Detaillierungsgrad der Verhaltensmodelle bestimmt und so unnötiger Aufwand bei der Modellerstellung vermieden. Die Anwendung der Systematik wird am Beispiel eines flexiblen Materialflusssystems demonstriert.

Paderborn, im Mai 2015

*Prof. Dr.-Ing. J. Gausemeier*





# **Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen**

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

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Wirt.-Ing. Jan Brökelmann  
*aus Gütersloh*

Tag des Kolloquiums: 17. Dezember 2014  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts. Ihre Grundlage bildet meine Forschungsarbeit im von der DFG geförderten Projekt Methodik zur virtuellen Inbetriebnahme auf Basis von objektorientierten Verhaltensmodellen mit wählbarer Modellierungstiefe.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier für die lehrreiche Zeit am Institut. Er hat ein Arbeitsumfeld geschaffen in dem Ideen entwickelt und neue Themen erarbeitet werden konnten. Die fordernde und fördernde Arbeitsweise hat meine Entwicklung in großem Maße geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler danke ich für die Übernahme des Koreferates meiner Dissertation. Ebenfalls danke ich Ihm und Tanja Friebe für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes.

Ein großer Dank gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit und die vielen anregenden Diskussionen. Besonders hervorzuheben sind die Kollegen aus dem Team Integrative Produktionssystemplanung: Rinje Brandis, Frank Bauer, Daniel Nordsiek, Johannes Kolsch, Dominic Dettmer, Mariana Reyes Krupp, Jörg Schaffrath, Daniel Köchling, Marcus Petersen, Vinzent Rutsch, Gerald Rehage und Marcel Schneider. Besonders Rinje und Frank danke ich für die gemeinsame Zeit im Büro. Die Kolleginnen und Kollegen waren der wesentliche Grund für die sehr gute Zeit am Lehrstuhl.

Am Ende danke ich meinen Eltern und meinen Geschwistern für ihre Unterstützung auf meinem gesamten Weg. Der größte Dank geht an meine Freundin Mayumi Wilms. Sie war die ganze Zeit für mich da und hat mir den Rücken freigehalten. Ohne ihre Unterstützung würden Sie diese Zeilen hier nicht lesen.

Hannover, im Mai 2015

*Jan Brökelmann*



## Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

- [STB+13] SCHMÜDDERRICH, T.; TRÄCHTLER, A.; BRÖKELMANN, J.; GAUSEMEIER, J.: Procedural Model for the Virtual Commissioning on the Basis of Model-Based Design. In: Abramovi-  
ci, M.; Stark, R. (Hrsg.). Smart Product Engineering, Springer, Berlin, 2013
- [LSB+12] LOCHBIECHLER, M.; SCHMÜDDERRICH, T.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodolo-  
gy for Selecting the Modeling Depth of Object-Oriented Behavioral Models. In: Proceed-  
ings of the World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET 2012, July  
5.-6. 2012, Zurich, 2012



## Zusammenfassung

Der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit gelingt nur mit flexiblen maschinenbaulichen Anlagen. Im Anlagenentstehungsprozess ist die Inbetriebnahme häufig ein Engpass. Der Anteil der Inbetriebnahme an der Gesamtzeit wird größer, je häufiger die Anlagen auf neue Gegebenheiten auszurichten sind. Bei steigendem Anteil an Softwaretechnik nimmt die Unsicherheit in dieser Phase zu. Um das Risiko zu reduzieren, kann eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden. Dabei erfolgt der Steuerungsprogrammtest frühzeitig an Modellen der Anlage. Ein bestehender Nachteil ist der Aufwand für die Modellierung. Dem kann zum einen durch eine Wiederverwendung in weiteren Projekten und zum anderen durch eine Nutzung im Anlagenentstehungsprozess von Beginn an begegnet werden.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*. Die Systematik umfasst ein Vorgehensmodell in dem die Tätigkeiten im Anlagenentstehungsprozess detailliert beschrieben werden. Es steuert den Einsatz der bereitgestellten Methoden und Werkzeuge, u. a. die frühzeitige Berücksichtigung von Testszenarien, die Modularisierung des Systems sowie die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe. Zur integrativen Beschreibung des Anlagenkonzeptes wird die Spezifikationstechnik CONSENS eingesetzt, die um notwendige Konstrukte erweitert wurde. Die Anwendung der Systematik wird exemplarisch an einem Materialflusssystem demonstriert.

## **Summary**

Flexible production systems are necessary to sustain competitiveness. The bottleneck in the plant development process is often the commissioning. The more often the production systems have to adapt to new situations, the proportion of commissioning on the total time increases. Furthermore, with an increasing proportion of software technology, the uncertainty during this phase also increases. An approach to reduce the risk is the virtual commissioning. Here, the control program test takes place at an early stage on a model of the production system. A major disadvantage is the effort for the modelling. To improve the effort-effectiveness ratio of the models, they can be reused in future projects, and/or used from the beginning of the plant development process.

This thesis describes a design framework for the virtual commissioning of automated production systems. The design framework consists of a procedure model, methods and tools, and a technique for the integrative description of production system concepts (CONSENS). The procedure model describes the activities of the plant development process in detail. It also controls the use of the method and tools, e.g. the early consideration of testing scenarios, the modularisation of the system, and selection of a suitable modelling depth. The application of the design framework is demonstrated on a material flow system.



# Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>5</b>
1.1 Problematik.....	5
1.2 Zielsetzung .....	7
1.3 Vorgehensweise .....	8
<b>2 Problemanalyse.....</b>	<b>9</b>
2.1 Begriffsbestimmungen.....	9
2.1.1 Konzept, Konzeption und Prinziplösung .....	9
2.1.2 Systematik .....	10
2.1.3 Der Systembegriff .....	10
2.1.4 Mechatronische Systeme .....	11
2.1.5 Produktionssysteme .....	13
2.1.6 Informationssysteme in der Produktionssystemautomatisierung	15
2.1.7 Simulation und Automatisierungstechnik.....	16
2.2 Der Anlagenentstehungsprozess.....	17
2.2.1 Der Produktentstehungsprozess .....	18
2.2.2 Lebenszyklus maschinenbaulicher Anlagen.....	19
2.2.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik .....	20
2.3 Anlagenkonzipierung und -ausarbeitung .....	21
2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.....	21
2.3.2 Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK.....	23
2.3.3 Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption .....	25
2.3.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik .....	29
2.4 Anlagenherstellung.....	29
2.5 Anlageninbetriebnahme.....	31
2.5.1 Klassische Inbetriebnahme und Hochlauf .....	31
2.5.2 Virtuelle Inbetriebnahme.....	32
2.5.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik .....	35
2.6 Problemabgrenzung .....	36

---

2.7	Anforderungen.....	40
<b>3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>43</b>
3.1	Rahmenwerke und Vorgehensmodelle.....	43
3.1.1	Simultaneous Engineering.....	43
3.1.2	Model Based Systems Engineering.....	45
3.1.3	Entwurfstechnik intelligente Mechatronik (ENTIME).....	47
3.1.4	Integriertes Prozessmodell zur Planung und Entwicklung nach MAUDERER.....	49
3.1.5	Allgemeine Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung	51
3.1.6	Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik.....	53
3.2	Inbetriebnahme.....	55
3.2.1	Methodische Ansätze .....	55
3.2.2	Virtuelle Inbetriebnahme.....	57
3.2.2.1	Hardware-in-the-Loop-Simulation.....	59
3.2.2.2	Software-in-the-Loop-Simulation .....	60
3.2.2.3	Hybride Inbetriebnahme .....	61
3.2.3	Softwaretechnische Realisationen.....	62
3.2.3.1	Logisches Ersatzmodell.....	62
3.2.3.2	Physikmodell .....	63
3.3	Verfahren zur Produktmodularisierung .....	64
3.3.1	Modular Function Deployment.....	65
3.3.2	Design Structure Matrix .....	69
3.3.3	Produktstrukturierung nach STEFFEN .....	71
3.3.4	Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS) .....	73
3.3.5	Modularisierung komplexer Produkte nach KOEPPEN .....	75
3.4	Handlungsbedarf .....	77
<b>4</b>	<b>Einführung in die Systematik.....</b>	<b>81</b>
4.1	Grundidee.....	81
4.2	Bestandteile der Systematik .....	83
4.3	Validierungsbeispiel.....	85
<b>5</b>	<b>Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen.....</b>	<b>89</b>
5.1	Anlagenkonzipierung.....	89
5.1.1	Zielbestimmung .....	89
5.1.1.1	Aufgabenanalyse durchführen.....	90
5.1.1.2	Umfeldanalyse durchführen.....	91
5.1.1.3	Anwendungsszenarien definieren.....	92
5.1.1.4	Testszenarien definieren .....	93

---

5.1.1.5	Anforderungsliste erstellen .....	97
5.1.1.6	Funktionshierarchie erstellen.....	97
5.1.2	Synthese.....	98
5.1.2.1	Prozessfolge aufstellen .....	100
5.1.2.2	Lösungsmuster suchen .....	102
5.1.2.3	Wirkstruktur erstellen.....	103
5.1.2.4	System modularisieren .....	105
5.1.2.5	Verhaltensmodelle erstellen .....	115
5.1.2.6	Grobgestalt erstellen .....	118
5.1.2.7	Module konzipieren .....	120
5.1.2.8	Module integrieren.....	121
5.1.3	Analyse.....	122
5.2	Anlagenausarbeitung.....	123
5.3	Anlagenherstellung.....	126
5.4	Virtuelle Inbetriebnahme.....	127
5.4.1	Modellerstellung .....	128
5.4.2	Durchführung.....	131
5.4.3	Auswertung.....	134
5.5	Einordnung der VIBN.....	135
5.6	Anlageninbetriebnahme.....	139
5.7	Bewertung der Arbeit anhand der Anforderungen .....	141
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>143</b>
<b>7</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>145</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>

## Anhang

<b>A1</b>	<b>Ergänzungen zur Anwendung der Systematik.....</b>	<b>A-1</b>
A1.1	Layout Miniaturfertigungsanlage .....	A-1
A1.2	Demonstrator Produkt - Taschenlampe .....	A-2
A1.3	Funktionshierarchie und Baustruktur des Demonstrators .....	A-4
A1.4	System modularisieren.....	A-6



# 1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des von der DFG geförderten Projektes *Methodik zur virtuellen Inbetriebnahme auf Basis von objektorientierten Verhaltensmodellen mit wählbarer Modellierungstiefe*. Ziel des Projektes war eine Methodik zur Reduzierung des Modellierungsaufwands bei der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN). Die Bestandteile sind eine Methode zur Dekomposition, die eine Wiederverwendbarkeit von Anlagenmodulen für die virtuelle Inbetriebnahme gewährleistet, und eine Methode zur Wahl der Modellierungstiefe. Des Weiteren umfasst die Methodik ein Vorgehensmodell zur Anwendung und Umsetzung der Methodik. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen. Sie beschreibt eine Systematik zur Integration der virtuellen Inbetriebnahme in den Anlagenentstehungsprozess. Dadurch wird das Verhältnis zwischen Modellerstellungsaufwand und Modellnutzen verbessert.

## 1.1 Problematik

Die dynamischen globalen Märkte bilden eine Herausforderung für produzierende Unternehmen. Eine Vielzahl von sich ständig ändernden Einflussfaktoren wie Technologien, Gesetzen und Kunden wirken sich auf die Produkte und die Produktion aus [WZ09, S. 9]. Durch einen stark ausgeprägten Käufermarkt und hohen Wettbewerb nimmt die Variantenvielfalt der Produkte zu. Gleichzeitig steigt die Produktkomplexität und die Lebenszyklen werden immer kürzer. Diese Situation ist nicht neu [GLR+00, S. 12], prägt die Produktion in Deutschland jedoch im hohen Maße.

Im Maschinen- und Anlagenbau spiegelt sich die gesteigerte Funktions- und Variantenvielfalt auch in den produzierenden Maschinen und Anlagen wider. Die damit einhergehende Komplexität der Fertigungssysteme ist eine Herausforderung für die Fertigungsindustrie [MKD11, S. 25]. Maschinenbauliche Anlagen sind oftmals mechatronische Systeme, an denen mehrere Fachdisziplinen beteiligt sind. Eine erhöhte Flexibilität der Produktionssysteme ist ebenfalls erforderlich, da die Produkte zur Entwicklungszeit der Produktionsanlage noch unbekannt sind [FMF+10, S. 63]. Durch den vermehrten Einsatz von flexibler Automatisierung wird diese Flexibilität erreicht. Der Anteil der Informationstechnik in Produktionssystemen wird immer größer. Verstärkt wird die Zunahme der Informationstechnik auch dadurch, dass einzelne Anlagenkomponenten extern zugekauft werden. Die Steuerungstechnik ist das verbindende Element. So ist zu erklären, dass der Anteil der Steuerungstechnik in maschinenbaulichen Anlagen stark angestiegen ist. Der stetig wachsende Automatisierungsgrad macht softwaretechnische Integrationstests immer wichtiger. Der Test einzelner Softwaremodule reicht nicht aus, um die Fehlerfreiheit des Gesamtsystems sicherzustellen [Som01, S. 460].

Die industrielle Produktion steht vor einem erneuten Wandel. Nach den ersten drei industriellen Revolutionen, bedingt durch die Einführung von: 1) mechanischen Produkti-

onsanlagen, 2) arbeitsteiliger Massenproduktion und 3) dem Einsatz von Elektronik und IT zur weiteren Automatisierung, wird die neue Revolution unter dem Begriff *Industrie 4.0* zusammengefasst [KWH12, S. 13]. In dieser nimmt die Automatisierungstechnik einen größeren Stellenwert ein. Die maschinenbaulichen Anlagen werden zu *Cyber-Physical Systems* (CPS). Ein CPS beschreibt die Verbindung von physikalischer und informationstechnischer Welt. Dabei kommt es zu einem Zusammenspiel aus eingebetteten Systemen, Anwendungssystemen und Infrastrukturen. Diese sind stark vernetzt und hochgradig integriert. Die Interaktion von Mensch-Technik und Technik-Technik spielt eine große Rolle [GB12, S. 17]. Aus dieser Entwicklung geht hervor, dass die Informationstechnik in Zukunft einen immer größeren Stellenwert im Maschinen- und Anlagenbau einnehmen wird.

Zur Verkürzung der Entwicklungszeiten von Produktionssystemen ist eine parallele Entwicklung von Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik notwendig (Simultaneous Engineering). Darüber hinaus sollen auch hohe Kosten in späteren Phasen vermieden werden [VDI2235, S. 5]. Neben der parallelen Entwicklung kommt im Maschinen- und Anlagenbau der Inbetriebnahme eine besondere Bedeutung zu.

Bei ungenügender Validierung der einzelnen Komponenten kommt es spätestens bei der Inbetriebnahme zu Verzögerungen. Die **Inbetriebnahme** macht bei maschinenbaulichen Anlagen etwa 20 % der Projektkosten und 25 % der Projektdauer aus [ZW05, S. 699], [Web06, S. 8]. Auch bei der Inbetriebnahme gilt, dass bei einer Vorwegnahme von Aufgaben große Einsparungen realisiert werden können [FFH+00, S. 91]. Je später ein Fehler identifiziert wird, desto größer ist die Auswirkung auf die Kostenstruktur der Gesamtanlage [VDI2223, S. 3]. In der Inbetriebnahmephase werden häufig Fehler aus vorangegangenen Entwicklungsphasen identifiziert. Da diese Fehler nicht vorhersehbar sind, stellen die Kosten für die Inbetriebnahme einen großen Unsicherheitsfaktor dar. Die Unsicherheit entsteht durch einen fehlenden Systemtest, bei dem das Zusammenwirken der einzelnen Module geprüft wird. Die mechatronischen Module werden in den Fachdisziplinen Tests unterzogen, aber einen Systemtest gibt es nicht. Bei der Inbetriebnahme entfallen 70 % der Zeit auf die Beseitigung von Softwarefehlern [SL00, S. 293], [DAH08, S. 144]. Zur Vermeidung von Softwarefehlern muss schon frühzeitig mit einer Validierung begonnen werden. In aktuellen Vorgehensmodellen (vgl. Abschnitt 3.1) wird diesem Umstand durch ein iteratives Testen Rechnung getragen. Ziel ist es dabei, die Fehler frühzeitig zu finden und die Softwarequalität zu erhöhen. Dadurch wird die Unsicherheit bei der Inbetriebnahme reduziert.

Ein Lösungsansatz, um dem gestiegenen Anteil an Softwaretechnik in maschinenbaulichen Anlagen gerecht zu werden, ist die **virtuelle Inbetriebnahme** (VIBN). Bei der virtuellen Inbetriebnahme wird das Verhalten der Anlage in Modellen (z. B. Verhaltensmodell, Gestaltmodell und Kinematikmodell) abgebildet. Hierdurch wird die Inbetriebnahmezeit in der Regel reduziert und die Qualität der Software erhöht [ZWH+06a, S. 598]. Unter dem Begriff VIBN werden dabei mehrere Bereiche zusammengefasst: die maschinennahe Validierung [VDI3633-8, S. 10], die Absicherung von Produktions-

steuerungen [BKC+08, S. 141ff.] und die Inbetriebnahme von Leittechniksystemen [SS10, S. 81ff.]. Nachteil der VIBN ist jedoch die aufwändige Modellerstellung [KHK10, S. 125]. Häufig kompensiert sie den Zeitvorteil bei der Inbetriebnahme und der kumulierte Zeitaufwand bis zum Produktionsanlauf der Anlage bleibt gleich. Bestehende Modelle können in neuen Projekten nur eingeschränkt wiederverwendet werden [WWC+08, S. 155]. Aufbau und Art der Modellierung sind nicht formal beschrieben und daher sehr stark vom Ersteller des Modells abhängig.

In der vereinfachten Modellerstellung, der erhöhten Nutzung der Modelle bzw. der Wiederverwendung von Modulen liegt daher großes Verbesserungspotential für die VIBN. Eine vereinfachte Modellerstellung kann durch eine Methode zur geeigneten Wahl der Modellierungstiefe unterstützt werden. Derzeit ist die VIBN nicht Teil des Entwicklungsprozesses für maschinenbauliche Anlagen. Synergieeffekte aus gemeinsamer Nutzung der Modelle entfallen. Darüber hinaus ist oftmals Expertenwissen<sup>1</sup> bei der Erstellung der Modelle erforderlich. Die Wiederverwendung der Modelle kann durch eine geeignete Dekomposition der Anlage sowie durch ein systematisches Vorgehen unterstützt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*. Die Systematik umfasst ein **Vorgehensmodell**, das die Tätigkeiten im Anlagenentstehungsprozess detailliert beschreibt. Es erläutert die erforderlichen Eingangsinformationen sowie die erzeugten Ausgangsinformationen der einzelnen Tätigkeiten. Das Vorgehensmodell unterstützt den Entwickler durch die Zuordnung der bereitgestellten **Methoden und Werkzeuge** zur Lösung von Teilaufgaben im Prozess. Zur integrativen Beschreibung des Anlagenkonzeptes wird die **Spezifikationstechnik** CONSENS eingesetzt. Diese beschreibt die Anlage durch verschiedene Aspekte und ist an die Erfordernisse der virtuellen Inbetriebnahme angepasst.

Die virtuelle Inbetriebnahme wird von Beginn an in den Anlagenentstehungsprozess integriert. Der Einsatz in den verschiedenen Entwicklungsphasen setzt Modelle von Anlagenmodulen mit wählbarer Modellierungstiefe voraus. Zur Reduktion des Modellierungsaufwands wird die Wiederverwendung der Modelle angestrebt. Somit wird nach der initialen Erstellung der Modelle aus ihnen ein möglichst großer Nutzen gezogen.

Die Systematik greift auf bestehende Ansätze zurück, passt sie teils an und integriert sie in ein detailliertes Vorgehensmodell. Sie lehnt sich an das Vorgehensmodell zum Entwurf mechatronischer Systeme an. Die Anwendung der Systematik wird exemplarisch an einem Materialflusssystem demonstriert.

---

<sup>1</sup> Der Inhalte der vorliegenden Arbeit beziehen sich in gleichem Maße sowohl auf Frauen als auf Männer. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch die männliche Form (Kunde, Inbetriebnehmer etc.) für alle Personenbezeichnungen gewählt. Die weibliche Form wird dabei stets mitgedacht.

### 1.3 Vorgehensweise

Die beschriebene Problematik wird in **Kapitel 2** detailliert. Zunächst werden die für diese Arbeit grundlegenden Begriffe definiert. Es folgt die Einordnung des Anlagenprozesses in den Produktentstehungsprozess und den Lebenszyklus maschinenbaulicher Anlagen. Im Anschluss werden die Grundlagen der Entwicklung von mechatronischen Systemen und die Anlagenherstellung mit der Arbeitsplanung sowie der Fertigung und Montage vorgestellt. Abschnitt 2.5 beschreibt die Anlageninbetriebnahme mit dem Fokus auf der VIBN. Das Kapitel schließt mit der Problemabgrenzung und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die Systematik.

Das **Kapitel 3** gibt einen Überblick über bestehende Ansätze, mit denen die Anlagenentstehung und die VIBN integriert werden können. Nach der Vorstellung der Rahmenwerke für die Produktentstehung werden Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung und zur Planung der Automatisierung erläutert. Zur Reduktion der Aufwände bei der Modellierung bietet sich eine Wiederverwendung von Modellen an. Aus diesem Grund werden Verfahren zur Produktstrukturierung erörtert. Darauf folgt eine Vorstellung der bestehenden Ansätze zur Inbetriebnahme, zunächst die methodischen Ansätze und anschließend die Ansätze zur virtuellen Inbetriebnahme und die softwaretechnischen Umsetzungen. Das Kapitel endet mit der Analyse und Bewertung der beschriebenen Ansätze im Hinblick auf die gestellten Anforderungen.

Eine Einführung in das Ziel der Arbeit erfolgt in **Kapitel 4**. Zunächst wird die Grundidee für die *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* dargelegt. Im Anschluss werden die Bestandteile der Systematik und die Ausgangssituation geschildert.

**Kapitel 5** bildet den Kern der Arbeit, wobei die entwickelte Systematik anhand eines durchgängigen Beispiels erläutert wird. Nach einer Beschreibung der Vorgehensweise und der eingesetzten Methoden wird eine Bewertung der Systematik anhand der in Kapitel 2 erarbeiteten Anforderungen vorgenommen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in **Kapitel 6**.



## 2 Problemanalyse

In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Betrachtung der im vorherigen Kapitel beschriebenen Problematik. Das Ziel besteht darin, Anforderungen an die *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* herauszuarbeiten. Es werden zunächst grundlegende Begriffe für diese Arbeit definiert. Im Abschnitt 2.2 wird der Anlagenentstehungsprozess in den Produktentstehungsprozess und den Lebenszyklus maschinenbaulicher Anlagen eingeordnet. Im Anschluss werden die Grundlagen der Entwicklung von mechatronischen Systemen vorgestellt. In Abschnitt 2.3.4 wird die Anlagenherstellung mit der Arbeitsplanung sowie der Fertigung und Montage beschrieben. Abschnitt 2.5 befasst sich mit der Anlageninbetriebnahme mit dem Fokus auf der VIBN. Das Kapitel schließt mit der Problemabgrenzung in Abschnitt 2.6 und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die Systematik.

### 2.1 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden die relevanten Begriffe kurz erläutert. Sie werden, sofern notwendig, im Kontext dieser Arbeit definiert.

#### 2.1.1 Konzept, Konzeption und Prinziplösung

Das Resultat der Phase Konzipierung wird in der Konstruktionsmethodik als **Produktkonzept** bzw. **prinzipielle Lösung** oder **Prinziplösung** bezeichnet [PBF+07, S. 198]. Die Prinziplösung beschreibt den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise eines technischen Systems [GFD+09, S. 201]. Für die Prinziplösung wird in der Literatur auch der Begriff *Konzeption* synonym verwendet [Mic06, S. 22].

Die Konzeption ist als einem *Werk zugrundeliegende Anschauung, Leitidee, geistiger Entwurf* und das Konzept als *stichwortartiger Entwurf, klar umrissener Plan, Programm für ein Vorhaben* definiert [Dud14a-ol]. Die Sozialpädagogik grenzt Konzept und Konzeption klar voneinander ab. Das Konzept ist die Beschreibung eines ersten Entwurfes, der weiterentwickelt und verändert werden kann. Die Konzeption ist das ausgearbeitete und festgelegte Konzept [Kre08, S. 9ff.]. Das Konzept ist somit die Vorstufe der Konzeption.

In dieser Arbeit wird unter der Prinziplösung das *Konzept* verstanden. Die Prinziplösung ist ein erster Entwurf eines technischen Systems, das im Entwicklungsverlauf detailliert werden muss.

### 2.1.2 Systematik

Die **Systematik** ist als *planmäßige, einheitliche Darstellung bzw. Gestaltung nach bestimmten Ordnungsprinzipien* definiert [Dud14b-ol]. In der Produktentwicklung wurde der Begriff von BISCHOF und HANSEN eingeführt. Sie beschreiben die Konstruktionssystematik als *„das planmäßige, wissenschaftliche Kombinieren der Einzelerkenntnisse der Technik zum Aufbau eines technischen Gebildes“* [Han55, S. 36], [Hup76, S. 74]. Dar- aus wurde von DUMITRESCU die Definition für eine Entwicklungssystematik abgeleitet:

*„Eine Entwicklungssystematik [ist] ein universelles Rahmenwerk, das ein Vorgehensmodell sowie dedizierte Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung der Entwicklung technischer Systeme bereitstellt. Sie ermöglicht weder ein automatisiertes Entwickeln noch ist sie ein Ersatz für die kreative Leistung eines Anwenders. Das Vorgehensmodell strukturiert den Entwicklungsprozess nach aufgabenspezifischen Gesichtspunkten. Hilfsmittel können bspw. Methoden, Richtlinien, Spezifikationstechniken/Modellierungssprachen, Konstruktionsprinzipien, Entwurfsmuster oder Werkzeuge sein“* [Dum11, S. 6].

Die Entwicklungsmethodik<sup>2</sup> geht über die Entwicklungssystematik hinaus [Dum11, S. 6]. Sie beinhaltet zusätzlich Erkenntnisse aus der Denk- und Arbeitspsychologie und gibt organisatorische Leitlinien zur effektiven interdisziplinären Zusammenarbeit [PBF+07, S. 10f.].

In der vorliegenden Arbeit wird die Definition von DUMITRESCU verwendet. Die zu entwickelnde Systematik umfasst ein **Vorgehensmodell** und dedizierte **Hilfsmittel** zur Integration der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess. Bei den Hilfsmitteln soll auf bestehende zurückgegriffen werden, welche unter Zuhilfenahme des Vorgehensmodells integriert werden sollen. Sollten keine geeigneten Hilfsmittel vorhanden sein, sind bestehende für den vorliegenden Fall anzupassen oder neue zu entwickeln.

### 2.1.3 Der Systembegriff

In der Systemtheorie können technische Produkte und ihre Herstellung als **Systeme** betrachtet werden. Der Systembegriff wird von EHRENSPIEL wie folgt definiert:

*„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System)“* [Ehr09, S. 19].

---

<sup>2</sup> Synonym mit dem Begriff Konstruktionsmethodik vgl. [Hup76], [Ehr09], [PBF+07].

Bestandteile eines Systems, die in der gewählten Betrachtungsebene nicht weiter differenziert werden, sind **Elemente**. Sie können in anderen Betrachtungsebenen weiter aufgeteilt werden. Die Elemente und ihre Beziehungen zueinander werden als **Struktur** bezeichnet. Die **Beziehungen** sind Flussbeziehungen, wie Stoff-, Energie- und Informationsflüsse, oder hierarchische Ordnungsbeziehungen, bspw. Aggregationsbeziehungen. Elemente außerhalb der Systemgrenze sind Teil der **Umgebung**. Sie wirken auf das System ein. Die Wechselwirkungen zwischen dem System und seiner Umgebung werden mit **Ein- und Ausgangsgrößen** beschrieben. Das **Verhalten** des Systems ist die Reaktion auf Einflüsse. Das erwartungsgemäße Verhalten des Systems wird als **Funktion** bezeichnet. Die Funktion wird durch das Verhalten der Ausgangsgrößen des Systems in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen erfüllt [PBF+07, S. 17], [Ehr09, S. 19f.], [Mül90, S. 58]. Das Bild 2-1 veranschaulicht die beschriebenen Begriffe des Systemdenkens.

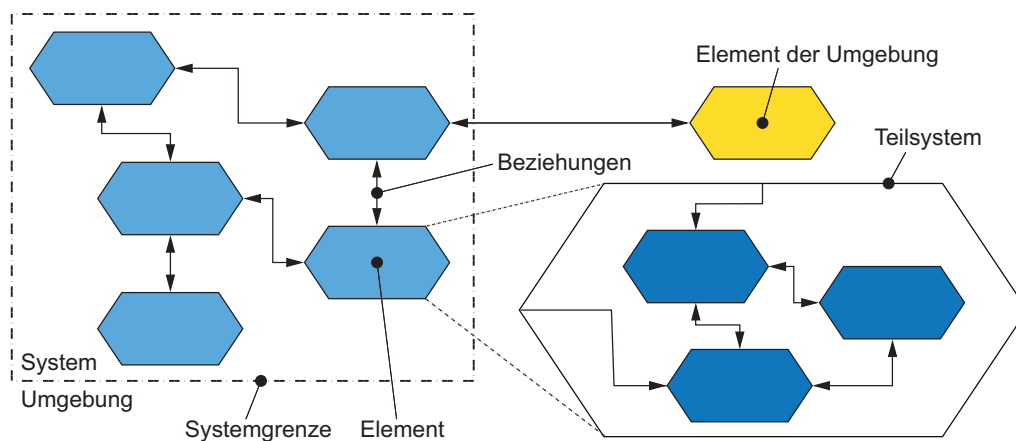


Bild 2-1: Grundlagen des Systemdenkens nach [DH02, S. 9]

Die Planung, Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme wird durch ein *Denken in Systemen* vereinfacht [Ehr09, S. 26], [DH02, S. 9]. Die Komplexität des Untersuchungsgegenstandes lässt sich durch das Ausblenden der inneren Zusammenhänge des Systems (Black-Box) und durch eine Hierarchisierung reduzieren. Durch eine Reduktion auf das Wesentliche können Modelle des Systems gebildet werden. Die Modelle werden zur Simulation oder zur Darstellung der Eigenschaften des Systems genutzt. Die Eigenschaften und Beziehungen der Elemente lassen sich durch eine geeignete Wahl der Sicht auf das System hervorheben.

#### 2.1.4 Mechatronische Systeme

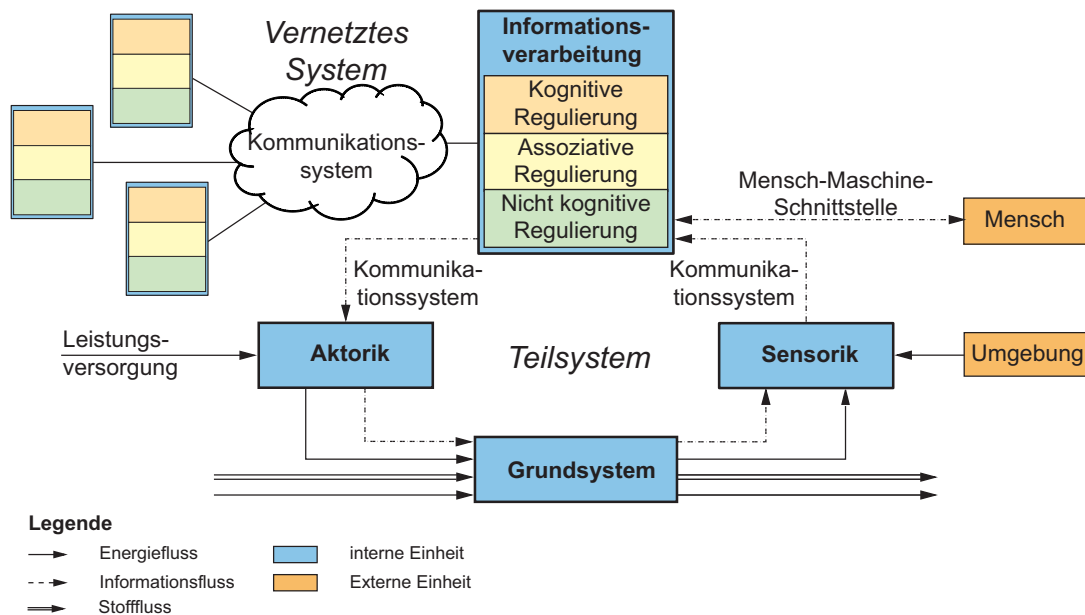
Moderne maschinenbauliche Erzeugnisse und Produktionssysteme sind geprägt durch ein Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik. Den klassischen von der Mechanik dominierten Maschinenbau gibt es nicht mehr. Die neue Klasse von Systemen wird mit dem Kunstwort **Mechatronik** be-

zeichnet. Es wurde erstmals im Jahre 1969 benutzt, um mechanische Komponenten zu beschreiben, die um einen elektronischen Anteil erweitert wurden. Der Begriff wurde 1996 von HARASHIMA, TOMIZUKA und FUKUDA erweitert und definiert [HTF96, S. 1].

Die Übersetzung der Definition wird in der VDI-Richtlinie 2206 verwendet:

*„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].*

Im Bild 2-2 sind die grundsätzliche Struktur eines mechatronischen Systems und die Vernetzung zum Cyber-physischen System abgebildet. Ein mechatronisches System besteht aus einem Grundsystem, dessen Zustand von einer Sensorik erfasst und in der Informationsverarbeitung ausgewertet wird. Anschließend erfolgt von der Informationsverarbeitung über die Aktorik eine Rückkoppelung auf das Grundsystem.



*Bild 2-2: Grundsätzliche Struktur eines mechatronischen Systems und die Vernetzung zum Cyber-physischen System nach [VDI2206, S. 14], [GAC+13, S. 17]*

Das **Grundsystem** besteht aus einer mechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Struktur bzw. einer Kombination aus diesen. Die Zustandsgrößen (Messwerte) des Grundsystems werden von der **Sensorik** erfasst. Sie erfasst ebenfalls Einflüsse aus der Umgebung. Dabei können die physikalischen Kenngrößen direkt erfasst oder indirekt ermittelt werden. Die Sensorik gibt die Informationen an die **Informationsverarbeitung** weiter. Bei der Informationsverarbeitung handelt es sich in der Regel um einen Mikroprozessor und entsprechende Steuerungssoftware. Im Bereich der maschinenbaulichen Anlagen werden meistens speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) verwendet. Auf Grundlage der Eingangsinformationen der Sensorik und des Steuerungspro-

gramms werden Stellgrößen an die **Aktorik** weitergegeben. Die Stellwerte werden durch die Aktorik an das Grundsystem weitergegeben [VDI2206, S. 14f.].

Die Elemente eines mechatronischen Systems sind durch Flussbeziehungen miteinander verbunden. Sie werden nach PAHL/BEITZ in drei Flussarten unterschieden [PBF+07, S. 453]:

- **Stoffflüsse:** der Austausch von festen, flüssigen oder gasförmigen Einheiten
- **Energieflüsse:** die Übertragung von Energie in Form von mechanischer, elektrischer oder thermischer Energie
- **Informationsflüsse:** der Austausch von Messgrößen, Steuerinformationen oder Daten

Das Grundsystem ist der elementare Aufbau eines mechatronischen Systems. In der Regel besteht es aus mehreren Modulen, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Das Gesamtsystem kann hierarchisch strukturiert werden, wobei sich die Teilsysteme wieder aus dem Grundsystem zusammensetzen [VDI2206, S. 16].

Intelligente Technische Systeme (Cyber-physische Systeme) sind mechatronische Systeme, die in der Lage sind, zu kommunizieren und zu kooperieren. Die Funktionalität des vernetzten Systems entsteht durch das Zusammenspiel der Einzelsysteme. Dabei sind die Rolle und die Art der Vernetzung flexibel. So ist der Verbund in der Lage, dynamisch auf wechselnde Funktionalitäten zu reagieren. Die Vernetzung spielt dabei eine zentrale Rolle, so dass keine räumliche Nähe der Einzelsysteme notwendig ist. Durch Ansätze wie das Cloud Computing erfolgt eine Vernetzung der Systeme über geografische Grenzen hinweg. Das gute globale Verhalten wird nicht mehr durch eine zentrale Steuerung sichergestellt. Es sind dynamische lokale Strategien notwendig [GAC+13, S. 6f.].

### 2.1.5 Produktionssysteme

**Produktionssysteme** dienen der Erstellung von materiellen Gütern. Sie transformieren Produktionsfaktoren (Input) in Produkte (Output) [Gab14a-ol], [DIN8580, S. 6]. Synonym zum Begriff Produktion wird auch Fertigung verwendet. Diese wird in die Teilefertigung und die Montage unterteilt. Bei der **Teilefertigung** werden Einzelteile hergestellt. Diese werden anschließend an den Endkunden weitergegeben oder gelangen in die Montage. In der **Montage** werden Einzelteile zu Baugruppen oder zu Produkten zusammengesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht zwischen der Teilefertigung und der Montage unterschieden, es wird deshalb der Begriff Produktion verwendet.

Ein System aus mehreren sich ergänzenden Teilsystemen zur Teilefertigung, Montage und der Materialfluss zwischen den Systemen wird als komplexes Produktionssystem definiert [REF90, S. 15]. Ein komplexes Produktionssystem kann ein Arbeitsplatz, ein

Mehrmaschinensystem oder ein Produktionsbetrieb sein [Eve96, S. 4]. Es lässt sich in drei technische Teilsysteme unterteilen (vgl. Bild 2-3) [REF90, S. 41f.].

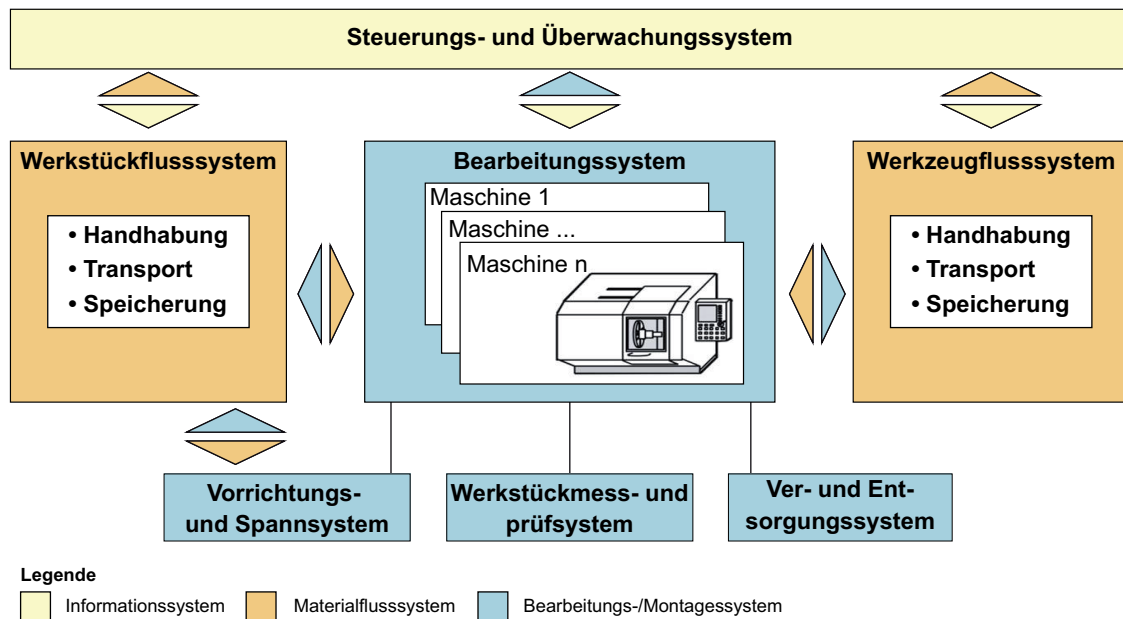


Bild 2-3: Bestandteile eines komplexen Produktionssystems nach [Eve89, S. 55]

**Informationssystem:** Es steuert und überwacht den Fertigungsablauf des gesamten Systems. Es beinhaltet Systeme zur Verwaltung, Bearbeitung, Speicherung sowie Übertragung der Informationen. Das Informationssystem kann z. B. eine SPS, ein Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) oder ein Manufacturing Execution System (MES) sein.

**Bearbeitungssystem:** Es enthält die Betriebsmittel, die den Prozess durchführen, die Transformation der Edukte in Produkte. Hierzu gehören, Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen, Mess- und Prüfeinrichtungen.

**Materialflusssystem:** Es umfasst alle Fördermittel und Förderhilfsmittel, die zum Lagern, Speichern, Transportieren, Bereitstellen und Handhaben dienen. Es können die Werkstücke, die Werkzeuge, Hilfsstoffe und Abfälle gefördert werden.

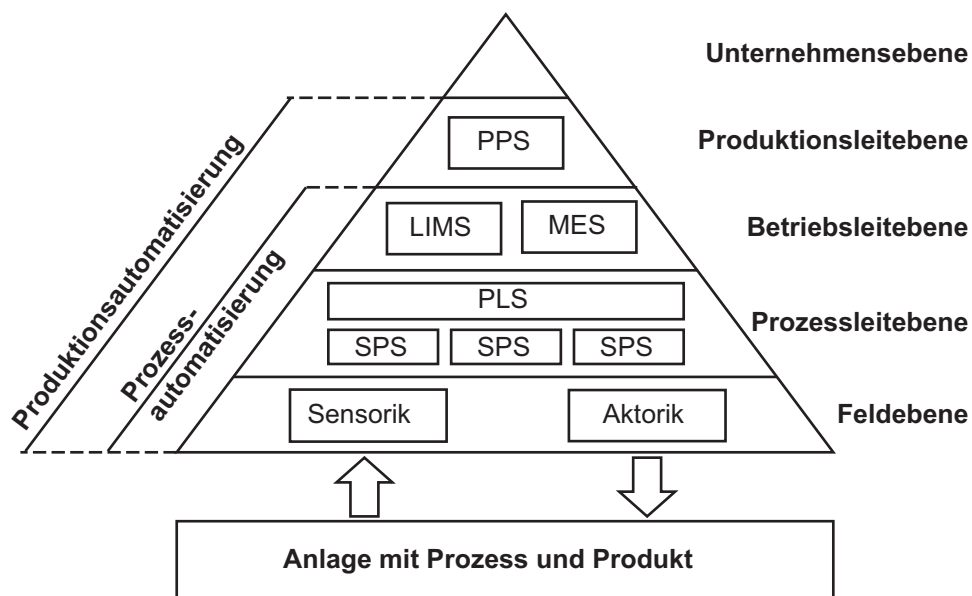
In dieser Arbeit wird der Begriff **Produktionsanlage**<sup>3</sup> synonym für ein komplexes Produktionssystem verwendet. Dabei werden unter dem Begriff Anlage nicht Gebäude und Grundstücke verstanden [Gab14b-ol]. Die Produktionsanlage ist in Anlehnung an MILBERG [Mil92, S. 1], SCHULLERER [Sch98, S. 6], der DIN IEC 60050 [DIN60050-351, S. 21] von DOMINKA wie folgt definiert worden:

<sup>3</sup> Wird in dieser Arbeit von der Anlage gesprochen, ist immer die Produktionsanlage gemeint.

„Unter einer Produktionsanlage wird die Gesamtheit der technischen Einrichtungen verstanden, die in einer definierten Art und Weise auf einen technischen Prozess einwirken. Dieser Prozess dient der Stoffumwandlung und Stoffumformung, der Materialbearbeitung oder der Energieumwandlung“ [Dom07, S. 8].

### 2.1.6 Informationssysteme in der Produktionssystemautomatisierung

Produktionssysteme werden mit Hilfe von Informationssystemen gesteuert und überwacht. Die Informationssysteme gliedern sich in unterschiedliche Klassen von Systemen, die hierarchisch aufgebaut sind. Dies lässt sich mit der *Automatisierungspyramide* wie in Bild 2-4 darstellen, die auch Ebenenmodell der Produktion genannt wird. Gleichartige Aufgaben sind dabei auf einer Ebene zusammengefasst [Zac00, S. 378f.].



- Legende**
- SPS Speicherprogrammierbare Steuerung
  - PLS Prozessleitsystem
  - LIMS Laborinformations- und -managementsystem
  - MES Manufacturing Execution System
  - PPS Produktionsplanungs- und Steuerungssystem

Bild 2-4: Automatisierungspyramide nach [Zac00, S. 379], [DIN62264-1, S. 14]

In der **Feldebene** finden die direkte Kommunikation mit der Anlage statt, die Informationsbeschaffung durch die *Sensorik* und die Informationsweitergabe durch die *Aktorik*. Zur Sensorik gehören alle Geräte, die Informationen über den Zustand der Anlage, den Ablauf des Produktionsprozesses oder des Werkstücks erfassen. Die Aktorik umfasst alle Komponenten, die in die Anlage eingreifen und den Prozess beeinflussen, z. B. Antriebe, Ventile. Die Informationen von der Sensorik oder zur Aktorik werden von der **Prozessleitebene** gesteuert. Das Aufgabengebiet der Prozessleitebene ist insbesondere das Regel, Steuern, Überwachen, Melden, Protokollieren und Darstellen der Prozessbe-

dingungen. Die wichtigsten Elemente der Prozessleitebene sind die *speicherprogrammierbaren Steuerungen* (SPS) und die *Prozessleitsysteme*. Mit der SPS werden einzelne Anlagenteile gesteuert und sie bildet die Schnittstelle zur Feldebene. Die Sollwertvorgaben für die Steuerung oder Regelung erhalten die Prozessleitsysteme aus der **Betriebsleitebene**. Auf dieser Ebene werden die mittel- und kurzfristigen Produktionspläne erstellt. Es erfolgen die Erzeugung von Produktionsaufträgen, die Disposition von Ressourcen und die Qualitätssicherung. Systeme, die solche Aufgaben durchführen, werden *Manufacturing Execution Systems* (MES) genannt, wobei Systeme zur Qualitätssicherung unter dem Begriff *Laborinformations- und -managementsysteme* zusammengefasst werden. Die Ebenen bis zur Betriebsleitebene sind Teil der Fertigungssteuerung. In der nächsthöheren Ebene der **Produktionsleitebene** finden die langfristige Produktionsplanung, die Kundenauftragsverwaltung und die Abrechnung statt. Hier kommen *Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme* (PPS) zum Einsatz. Bei der **Prozessautomatisierung** steht der Prozess im Fokus, wohingegen die **Produktionsautomatisierung** das Produkt im Fokus hat. Die oberste Ebene bildet die **Unternehmensebene**, die über das operative Geschäft hinausgeht [Zac00, S. 378ff.].

In der vorliegenden Arbeit werden nur solche Informationssysteme berücksichtigt, die zur Feld- oder Prozessleitebene gehören. Die Betriebsleitebene kann bei der VIBN betrachtet werden, ist aber nicht Fokus der Arbeit.

### 2.1.7 Simulation und Automatisierungstechnik

Die im Bereich der Simulation und Automatisierungstechnik verwendeten Fachtermini werden im Folgenden definiert.

**Modell:** Das Modell ist eine „*vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System*“ [VDI3633, S. 9].

**Simulation:** Die Simulation ist „*ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ [VDI3633, S. 14].

**Echtzeitfähigkeit:** Die Echtzeitfähigkeit ist die „*Fähigkeit eines Rechensystems, die Rechenprozesse ständig derart ablaufbereit zu halten, dass sie innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls auf Ereignisse im Ablauf eines technischen Prozesses reagieren können*“ [DIN60050-351, S. 117].

**Simulationmethode:** Die Simulationmethode unterscheidet, wie die Zustandsänderung des Modells durchgeführt wird (Voranschalten der Simulationszeit). Es wird zwischen kontinuierlicher und diskreter Simulation unterschieden (vgl. Bild 2-5).



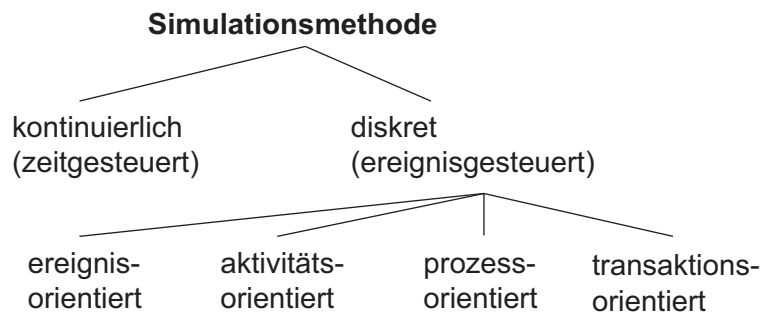


Bild 2-5: Klassifikation von Simulationsmethoden [VDI3633, S. 15]

Bei der *kontinuierlichen* Simulation wird davon ausgegangen, „*dass sich der Modellzustand mit der Zeit ändert*“. Bei der *diskreten* Simulation ändert sich „*der Modellzustand durch Ereignisse sprunghaft zu diskreten Zeitpunkten*“. Bei der diskreten Simulation wird zwischen einer *ereignis-*, *aktivitäts-*, *prozess-* und *transaktionsorientierten* Simulation unterschieden. Die ereignisorientierte Simulation zeichnet sich dadurch aus, dass die „*Eintrittspunkte der Ereignisse [...] durch Ereignisse festgelegt*“ werden. Die aktivitätsorientierte Simulation bestimmt die „*Zustandsänderung [...] durch eine Eintrittsbedingung und die Dauer*“ des Ereignisses. Ereignisse, die durch „*Prozesse, die miteinander interagieren, generiert*“ werden, sind prozessorientierte Simulationen. Bei der transaktionsorientierten Simulation bilden „*stationäre Modellelemente [...] die Knoten eines Graphen, durch die mobile Modellelemente [...] fließen*“ [VDI3633, S. 14f.].

**Verhaltensmodell:** „*Das Verhaltensmodell ist das Signalabbild des zu simulierenden Systems. Es beschreibt sowohl das Zeit- und Schaltverhalten als auch die Logik im System bzw. der einzelnen Komponenten (z. B. Ventile, Pumpen, Zylinder)*“ [Spi09, S. 8f.].

## 2.2 Der Anlagenentstehungsprozess

Im Folgenden wird der Anlagenentstehungsprozess in den Produktentstehungsprozess eingeordnet. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf maschinenbaulichen Anlagen. Diese können dabei als zwei Faktoren auftreten. Zum einen dienen sie als Produktionsmittel, um ein Produkt (z. B. Massenware) zu erzeugen. Sie stellen in dem Fall Betriebsmittel dar, die in der Produktionssystemplanung entwickelt und anschließend in der Fertigung genutzt werden. Zum anderen kann es sich bei maschinenbaulichen Anlagen selbst um ein Produkt (z. B. Verpackungsmaschine) handeln. Der Anlagenentstehungsprozess ist somit ein Sonderfall der Produktentstehung (vgl. Bild 2-6). Es wird zunächst der Produktentstehungsprozess im Allgemeinen (vgl. Abschnitt 2.2.1) und anschließend der Sonderfall des Anlagenentstehungsprozesses erläutert (vgl. Abschnitt 2.2.2).

## 2.2.1 Der Produktentstehungsprozess

Im Lebenszyklus eines Produktes (vgl. Bild 2-6) wird die Zeit von der Produktidee bis zum erfolgreichen Markteintritt als Produktentstehung<sup>4</sup> bezeichnet. Sie umfasst die Aufgabenbereiche der strategischen Produktplanung, der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14].

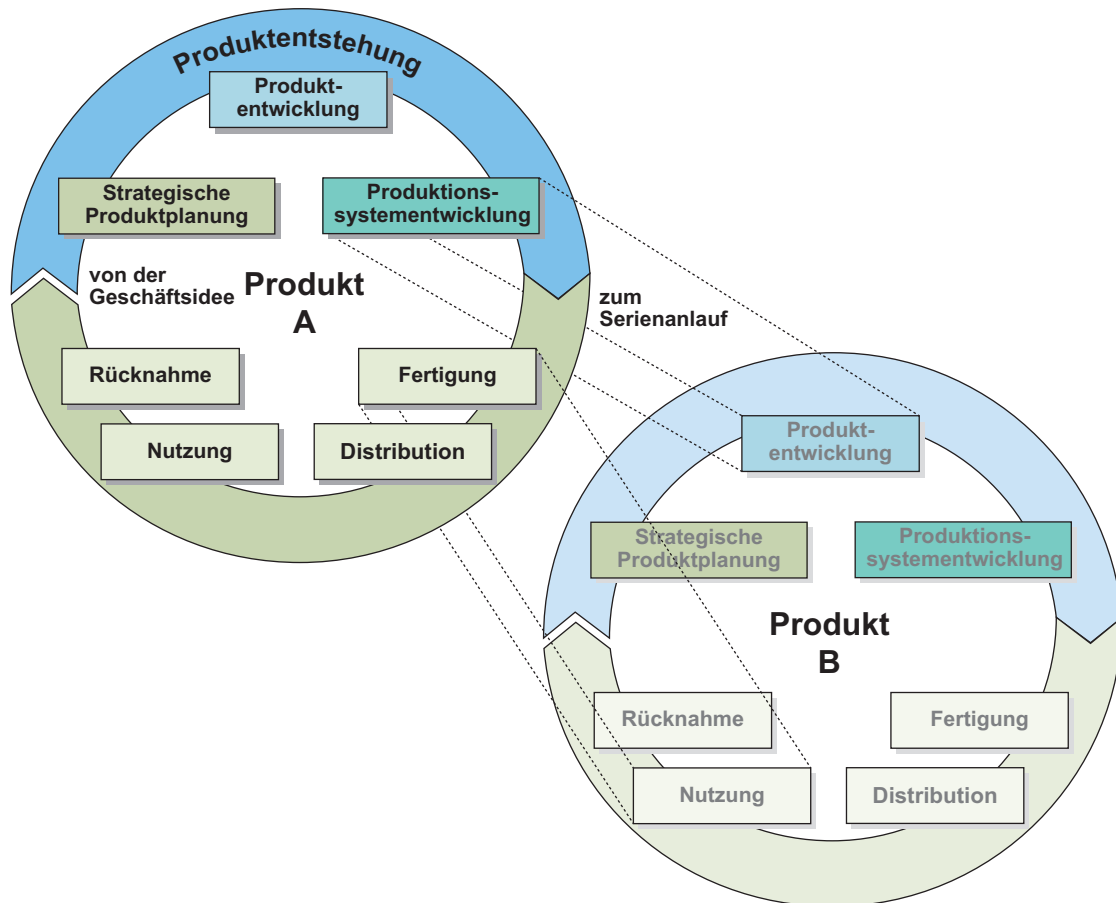


Bild 2-6: Produktentstehung im Produktlebenszyklus nach [GLR+00, S. 3], [GW11, S. 14]

**Strategische Produktplanung:** In dem Aufgabenbereich werden erfolgversprechende Produktkonzepte ermittelt. Ziel ist die Prinziplösung eines Produktes, bei dem ein positiver Return on Invest am Markt erzielt wird. In der Potentialfindung werden zunächst die Erfolgspotentiale der Zukunft identifiziert und hieraus Handlungsoptionen für das Unternehmen abgeleitet. In der Produktfindung werden auf Basis der Erfolgspotentiale neue Produkt- und Dienstleistungsideen generiert. Anschließend wird in der Produktkonzipierung eine Prinziplösung erarbeitet. Diese Phase ist dabei schon der Produkt-

<sup>4</sup> In der Literatur werden die Begriffe Produkterstellung und Produktengineering als Synonyme verwendet [GLR+00, S. 2], [Ehr09, S. 158].

entwicklung zuzuordnen. Sie wird jedoch benötigt, um in der Phase der Geschäftsplanung eine Produktstrategie zu erarbeiten und den Geschäftsplan zu erstellen [GLS04, S. 09].

**Produktentwicklung:** Dieser Aufgabenbereich umfasst die Produktkonzipierung, Entwurf und Ausarbeitung sowie die Produktintegration. Die Produktkonzipierung ist dabei die Schnittstelle zwischen der strategischen Produktplanung und der Produktentwicklung. In der Produktentwicklung erfolgt die Ausarbeitung der Produktkonzeption zu einer Gesamtlösung. Dabei wird zunächst das Produktkonzept fachdisziplinenübergreifend verfeinert und anschließend fachdisziplinspezifisch ausgearbeitet und zur Gesamtlösung integriert [GP14, S. 26].

**Produktionssystementwicklung:** Unter der Produktionssystementwicklung wird im Wesentlichen die Fertigungs- bzw. Arbeitsplanung verstanden. Sie umfasst die Aufgabenbereiche der Arbeitsablaufplanung, der Arbeitsmittelplanung, der Arbeitsstättenplanung und die Planung der Produktionslogistik (Materialflussplanung). Diese Aufgabenbereiche sind im Verlauf der Produktionssystementwicklung integrativ zu bearbeiten und zu konkretisieren.

In der Produktionssystementwicklung kann ein neuer Produktentstehungsprozess angestoßen werden. Dies ist im Bild 2-6 mit dem zweiten Produktlebenszyklus auf der rechten Seite verdeutlicht. In der Produktionssystementwicklung von Produkt A kann festgestellt werden, dass kein Produktionssystem zur Fertigung existiert. Tritt dieser Fall auf, muss ein neues Produktionssystem entwickelt werden. Dieses stellt nun das Produkt B dar, für das nun ein neuer Produktentstehungsprozess angestoßen wird. In der Nutzungsphase von Produkt B werden Teile des Produktes A gefertigt.

In der Praxis können diese Aufgabenbereiche nicht streng sequentiell abgearbeitet werden. Sie lassen sich auch nicht eindeutig trennen. Vielmehr sind die einzelnen Aufgabenbereiche im Wechselspiel zu bearbeiten [GP14, S. 25].

## 2.2.2 Lebenszyklus maschinenbaulicher Anlagen

Die Produktionssystementwicklung, insbesondere der Anlagenentstehungsprozess, ist ein eigener Produktentstehungsprozess mit zugehörigen Produktionsmitteln und Ressourcen [AR11, S. 63]. Dabei benötigen die zugehörigen Produktionsmittel ggf. wieder eine Produktionssystementwicklung.

Der Lebenszyklus umfasst alle Lebensphasen einer maschinenbaulichen Anlage<sup>5</sup> von der Konzeption bis zur Redistribution. In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Modellen (vgl. [REF87, S. 89], [Ehr09, S. 195], [Dom07, S. 12f.], [DAH08, S. 148], [WHW02, S. 651]), die sich hauptsächlich in der Zuordnung der Aufgaben zu verschie-

---

<sup>5</sup> Synonym sind in diesem Fall auch Produktionsanlagen gemeint.

denen Lebensphasen unterscheiden. So wird beispielsweise bei WIEHNDAHL ET AL. zwischen der Planungs- und Realisierungsphase der Betriebsphase und der Redistributionsphase unterschieden [WHW02, S. 650f.].

Im Bild 2-7 sind die Phasen des Lebenszyklus von maschinenbaulichen Anlagen abgebildet, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

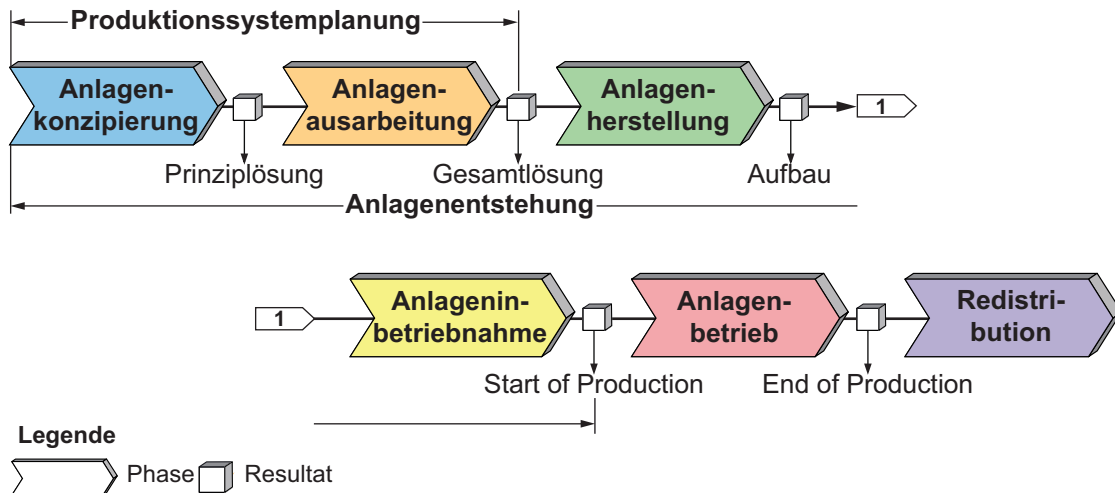


Bild 2-7: Lebenszyklus maschinenbaulicher Anlagen

Die **Anlagenentstehung** bezeichnet im Lebenszyklus einer maschinenbaulichen Anlage die Phasen von der Anlagenkonzipierung bis zum Start of Production (SOP). Sie gliedert sich noch einmal in die Phase der **Produktionssystemplanung** sowie der **Anlagenherstellung** und **Anlageninbetriebnahme**. Die Produktionssystemplanung umfasst die Phasen **Anlagenkonzipierung** und **Anlagenausarbeitung**. Nach dem SOP erfolgt der **Anlagenbetrieb**. Wird der Anlagenbetrieb in den Produktlebenszyklus aus Bild 2-6 eingeordnet, handelt es sich um die Phase der Fertigung. Nach dem End of Production (EOP) erfolgt die **Redistribution**, bei der die Anlage recycelt oder entsorgt wird.

### 2.2.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Der Anlagenentstehungsprozess beginnt mit der Produktionssystemplanung. Es folgt die Anlagenfertigung und abschließend erfolgt die Anlageninbetriebnahme. Er stellt einen Sonderfall des Produktentstehungsprozesses dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden die strategische Produktplanung sowie die Phasen nach der Anlagenentstehung, der Anlagenbetrieb und die Redistribution nicht weiter betrachtet.

Der Anlagenentstehungsprozess bildet den Rahmen für die zu entwickelnde Systematik. Hierzu liefert sie ein Vorgehen, welches den gesamten Prozess berücksichtigt. Die beiden Phasen der Produktionssystemplanung sind sehr eng miteinander verbunden und werden gemeinsam in Abschnitt 2.3 beschrieben. Auf die Anlagenherstellung wird in

Abschnitt 2.4 eingegangen. Eine Betrachtung der Anlageninbetriebnahme erfolgt in Abschnitt 2.5.

## 2.3 Anlagenkonzipierung und -ausarbeitung

Komplexe Produktionssysteme sind in der Regel mechatronische Systeme. Die Entwicklung solcher mechatronischer Systeme wird im Folgenden beschrieben. Bei der Entwicklung sind verschiedene Fachdisziplinen beteiligt. Um kosten- und zeitintensive Iterationen bei einem sequentiellen Vorgehen bei der Entwicklung zu vermeiden [VDI2206, S. 22], wird in der Anlagenkonzipierung die fachdisziplinenübergreifende Prinziplösung erarbeitet. Diese ist Grundlage für die Anlagenausarbeitung. Im Abschnitt 2.3.1 wird das Vorgehen nach VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme geschildert. Der folgende Abschnitt beschreibt die Konzipierung von Produktionssystemen. In Abschnitt 2.3.3 wird eine Spezifikationstechnik zur integrativen Beschreibung der Prinziplösung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme erläutert.

### 2.3.1 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Das Vorgehen im Entwicklungsprozess ist nicht streng sequentiell [GP14, S. 25]. Aufgrund der Komplexität der technischen Systeme ist das Vorgehen iterativ. In der VDI-Richtlinie *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* [VDI2206] sind Methoden und Vorgehensmodelle zusammengefasst und beschrieben, die bei der interdisziplinären Entwicklung von mechatronischen Systemen unterstützen. Der Kern ist ein flexibles Vorgehensmodell, was im Wesentlichen drei Bestandteile aufweist:

- einen allgemeinen Problemlösungszyklus auf Mikroebene,
- das V-Modell auf der Makroebene und
- vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte [VDI2206, S. 26].

Der Entwicklungsprozess wird nach einem **allgemeinen Problemlösungszyklus** strukturiert, wie er z. B. im *Systems Engineering* [HWF+12, S. 155f.] beschrieben wird. Er umfasst die folgenden fünf Schritte, die immer wieder durchlaufen werden: *Situationsanalyse*, *Zielformulierung*, *Synthese/Analyse*, *Bewertung* und *Entscheidung*. In der Situationsanalyse wird die zuvor unklare Situation analysiert und in der anschließenden Phase werden die Ziele formuliert. Ist die Situation bekannt, können die externen vorgegebenen Ziele übernommen werden. Es folgen die Synthese und die Analyse. Dabei werden im Wechselspiel Lösungsvarianten erarbeitet (Synthese) und diese mit der Zielerfüllung abgeglichen (Analyse). In der Bewertung werden die Lösungsvarianten einer detaillierten Evaluation unterzogen. Die Eigenschaften der Lösungen werden hinsichtlich der Anforderungen analysiert. Dies kann z. B. durch Berechnung, Simulation oder

Versuche geschehen. Abschließend erfolgt auf Basis der Bewertung die Entscheidung, ob die gefundene Lösung ein befriedigendes Ergebnis liefert. Ist dies nicht der Fall, muss in die Situationsanalyse zurückgesprungen werden. Dabei werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um die Zielformulierung zu präzisieren. Die Prozessplanung ist durch die Aneinanderreihung und Verschachtelung der Vorgehenszyklen flexibel gestaltet. So wird auf die Eigenheiten der Entwicklungsaufgabe eingegangen. Der Mikrozyklus unterstützt den Produktentwickler bei der Bearbeitung der geplanten Teilaufgaben und gibt Hilfestellung bei unvorhersehbaren Problemen [VDI2206, S. 26ff.], [HWF+12, S. 155f.].

In dem **V-Modell** wird das generische Vorgehen bei dem Entwurf<sup>6</sup> mechatronischer Systeme beschrieben und ist fallspezifisch auszuprägen (vgl. Bild 2-8).

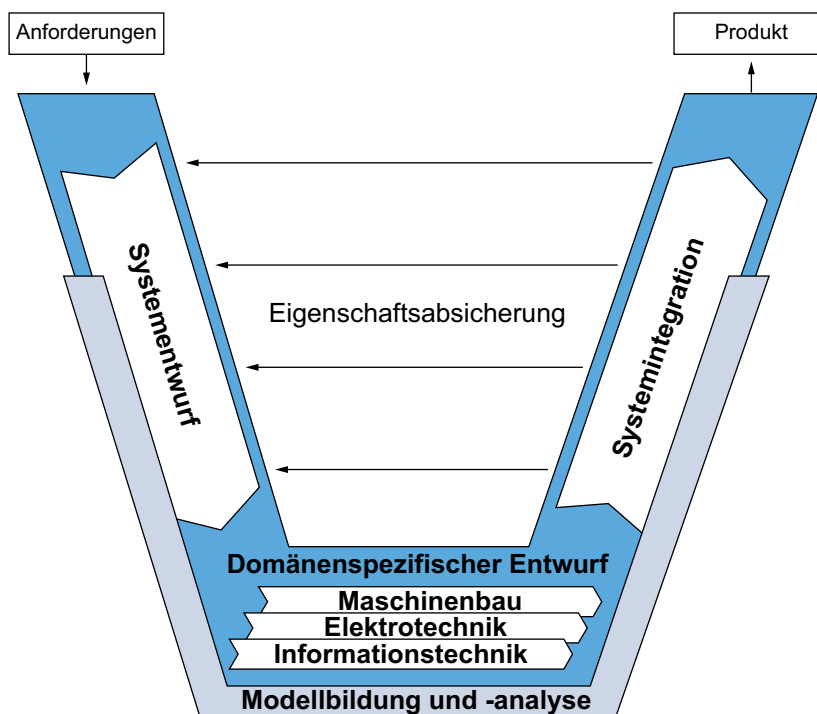


Bild 2-8: V-Modell als Makrozyklus nach [VDI2206, S. 29]

**Anforderungen:** Die Anforderungen sind eine Präzisierung der Aufgabenstellung. Sie sind der Maßstab zur Bewertung des Produktes.

**Systementwurf:** Ziel ist ein fachdisziplinenübergreifendes Lösungskonzept, in dem die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Systems beschrieben

<sup>6</sup> Dabei wird unter Entwurf „die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen“ [DH02, S. 158] verstanden. Das Konzipieren ist somit Teil des Entwurfes, in dem ausgehend von den Anforderungen ein technisches System konkretisiert wird.

werden. Dazu werden die Gesamtfunktionen des Systems in Teilfunktionen gegliedert. Für diese werden Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente ermittelt. Damit entspricht der Systementwurf der Phase Anlagenkonzipierung.

**Domänenspezifischer Entwurf:** Ausgehend von dem entwickelten Lösungskonzept erfolgt die weitere Konkretisierung meist getrennt nach den beteiligten Domänen. Dabei werden etablierte domänenspezifische Entwicklungsmethoden genutzt.

**Systemintegration:** Die Ergebnisse der einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert. Dabei wird zwischen drei Integrationsarten unterschieden: die Integration von verteilten Komponenten wie Aktoren, Sensoren und Leistungsstellglieder, die modulare Integration, bei der die Kopplung der Module über definierte Schnittstellen erfolgt, und die räumliche Integration von Komponenten auf kleinstem Bauraum.

**Eigenschaftsabsicherung:** Der Fortschritt wird nach jeder Entwicklungsphase geprüft. Die Lösungskonzepte werden anhand der Anforderungen überprüft, damit die gewünschten Systemeigenschaften erreicht werden.

**Modellbildung und -analyse:** In den Entwicklungsphasen können rechnerinterne Modelle des Systems erzeugt werden. Mit Hilfe von Analyse- und Simulationswerkzeugen können die Systemeigenschaften untersucht werden.

**Produkt:** Ergebnis des Makrozyklus ist das Produkt. Dabei ist unter Produkt nicht nur das fertige Erzeugnis zu verstehen, sondern auch die zunehmende Konkretisierung wie z. B. Labormuster oder Funktionsmuster. Komplexe mechatronische Produkte erfordern in der Regel das mehrfache Durchlaufen des Makrozyklus [VDI2206, S. 29ff.].

Teilschritte, die beim Entwurf mechatronischer Systeme wiederholt auftreten, können konkreter in vordefinierten **Prozessbausteinen** beschrieben werden. Neben den Vorgehensmodellen werden in der VDI-Richtlinie 2206 Hinweise zur Organisation der Produktentwicklung und ein Ansatz zur Integration der Produktionssystementwicklung geliefert.

### 2.3.2 Konzipierung von Produktionssystemen nach NORDSIEK

Die von NORDSIEK [Nor12] beschriebene Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme dient dem Entwickler als Rahmenwerk und ermöglicht ihm eine Konzeption des Produktionssystems. Das entwickelte Vorgehensmodell umfasst drei Hauptphasen: *Planen und Klären der Aufgabe*, *Konzipierung auf Prozessebene* und *Konzipierung auf Ressourcenebene*. Diese Hauptphasen schließen sich der *Konzipierung auf Systemebene* des zu fertigenden mechatronischen Systems an (vgl. Bild 2-9).

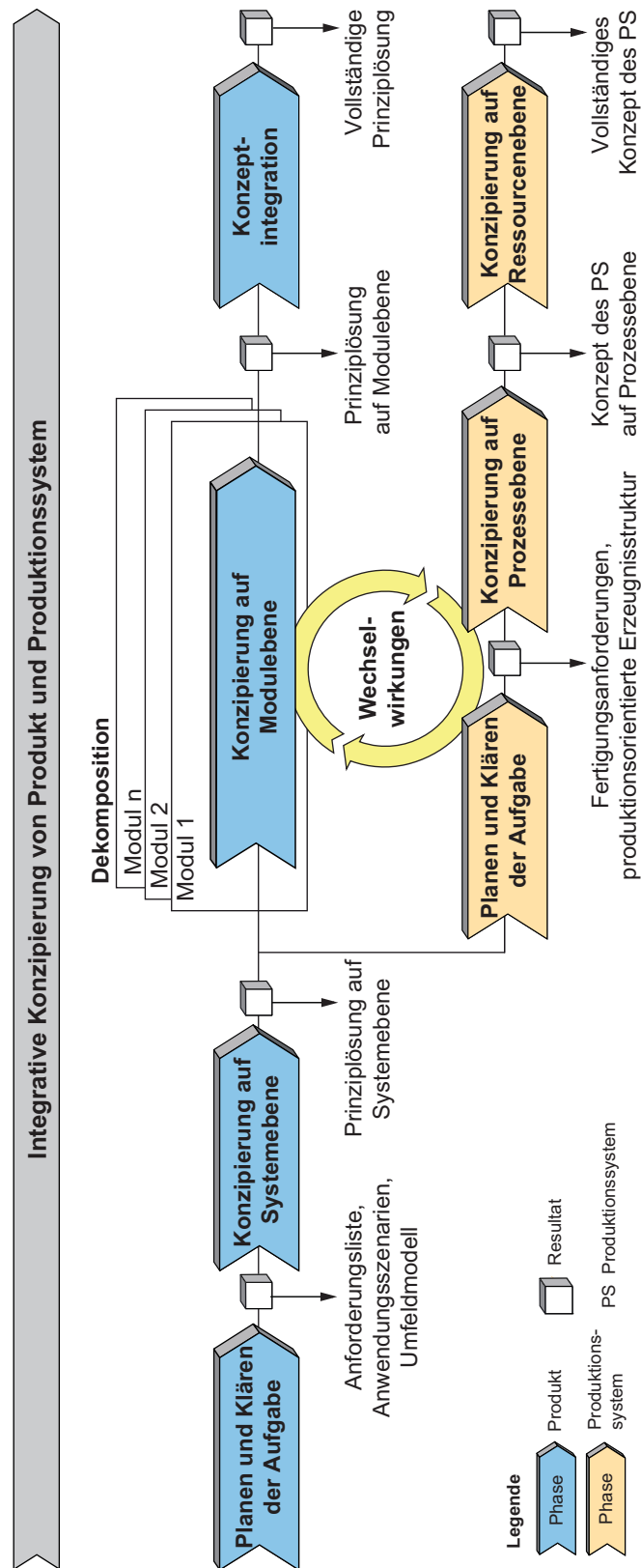


Bild 2-9: Generelles Vorgehensmodell für die integrative Konzipierung von Produkt- und Produktionssystem [Nor12, S. 99]



In der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* werden die Fertigungsanforderungen und eine produktionsorientierte Erzeugnisstruktur erstellt. Ziel der *Konzipierung auf Prozessebene* ist die Auswahl und Spezifikation der notwendigen Fertigungs- und Montageprozesse. Zunächst werden erste Montage- bzw. Fügeprozesse aus der Erzeugnisstruktur abgeleitet und der Arbeitsablauf detailliert. Zu dieser Zeit findet auch die Wahl geeigneter Fertigungstechnologien statt. Die Auswahl von Prozessen und Technologien wird dabei von den Charakteristika der Systemelemente (Werkstoff, Gestaltmodelle etc.) und weiteren Randbedingungen (strategische Technologieplanung, Technologieverfügbarkeit etc.) beeinflusst. Resultat dieser Phase sind die Arbeitsvorgangfolgen. In der Phase *Konzipierung auf Ressourcenebene* erfolgt die Festlegung der Ressource zur Ausführung des Prozesses. Die Auswahl der Ressourcen wird unter Berücksichtigung der Fertigungsanforderungen und der Wirtschaftlichkeit vorgenommen.

Der Ausgangspunkt für die Konzipierung von Produktionssystemen ist für NORDSIEK die Prinziplösung von mechatronischen Systemen. Diese ist Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der Fachleute der beteiligten Fachdisziplinen. Das Konzept des Produktionssystems soll in gleicher Form beschrieben werden. Dazu wird die Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Prinziplösung fortschrittlicher mechatronischer Systeme und des zugehörigen Produktionssystems von GAUSEMEIER ET AL. verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.3).

### **2.3.3 Spezifikationstechnik CONSENS zur Beschreibung der Produkt- und Produktionssystemkonzeption**

Mit der Spezifikationstechnik CONSENS – *CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems* ist eine fachdisziplinenübergreifende und integrative Beschreibung der Prinziplösung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme möglich. Die Prinziplösung wird über zehn Aspekte beschrieben (vgl. Bild 2-10). Die Aspekte *Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur, Verhalten* und *Gestalt* beschreiben die Prinziplösung des Produktes. Das zugehörige Produktionssystem wird über die Aspekte *Prozesse, Ressourcen* und *Gestalt* beschrieben. Die Aspekte stehen zueinander in Beziehung und sollen ein konsistentes Ganzes ergeben. Die Prinziplösung von Produkt und Produktionssystem bestehen aus einem kohärenten System von Partialmodellen [GBD+12, S. 89ff.].

Die Aspekte werden im Wechselspiel erstellt und bearbeitet. Es handelt sich um ein stark iteratives Vorgehen, das jedoch eine grundsätzliche Reihenfolge besitzt (vgl. Abschnitt 2.3.1). Zunächst wird das Umfeld geschildert und es werden Anwendungsszenarien entwickelt, auf deren Basis die Ableitung von Anforderungen vorgenommen wird. Es folgen die Aufstellung der Systemfunktionen und die Bildung einer ersten Wirkstruktur. Abschließend werden die Gestalt und das Verhalten spezifiziert [Fra06, S. 79], [GD10, S. 56ff.], [GFD+09, S. 209f.], [GBD+12, S. 89f.]. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte kurz erläutert.

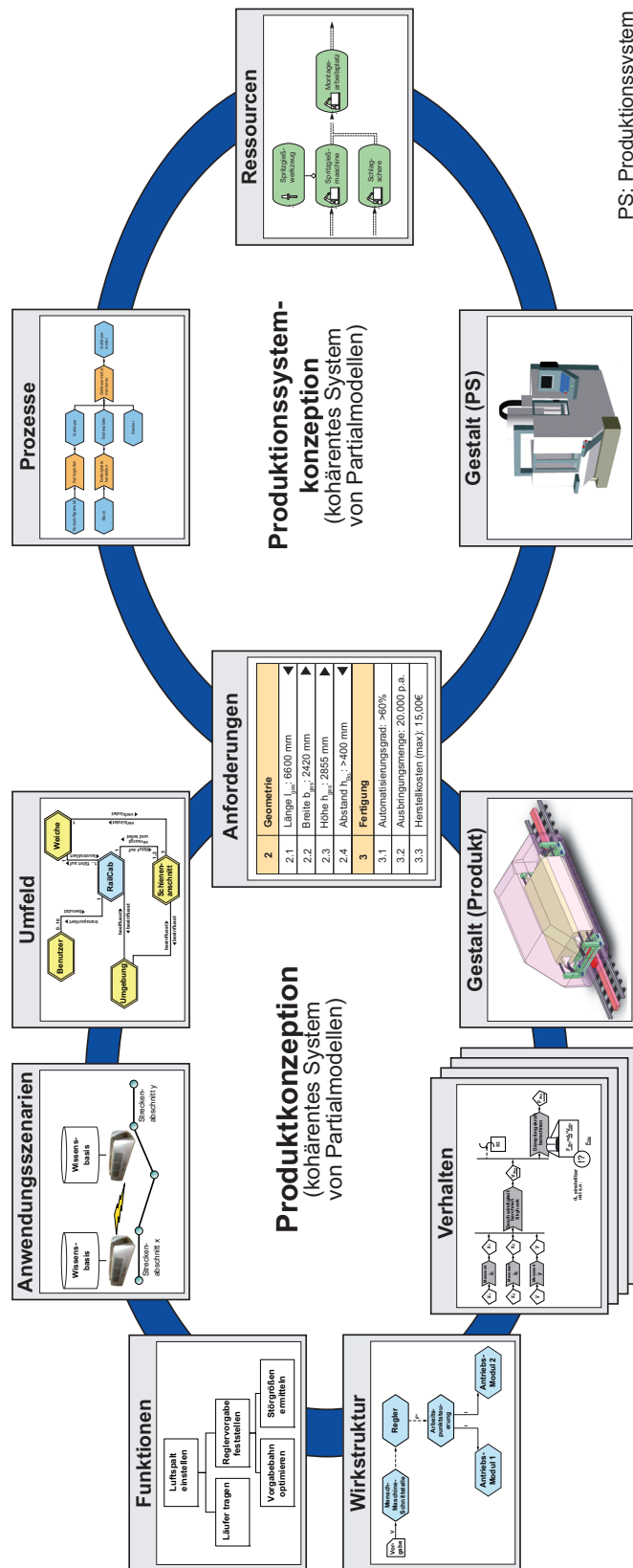


Bild 2-10: Partialmodelle zur fachdisziplinenübergreifenden Beschreibung der Prinziplösung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme [GBD+12, S. 90]

**Umfeld:** Das Umfeld beschreibt die Einbettung des zu entwickelnden Systems in seinem Umfeld. Das System wird als Black Box betrachtet und die Beziehungen zu Elementen des Umfeldes (z. B. Nutzer, Witterung) werden über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse spezifiziert. Beziehungen können Interaktionen (z. B. Benutzereingaben) oder Einflüsse (z. B. Umgebungstemperaturen) sein [GFD+09, S. 210], [GBD+12, S. 91f.].

**Anwendungsszenarien:** Mit den Anwendungsszenarien werden Betriebssituationen für das System festgelegt und geschildert, wie es sich in diesen zu verhalten hat. Sie beschreiben die situationsspezifische Sicht und das daraus resultierende Verhalten des Systems. Die Anwendungsszenarien sind Grundlage für die Anforderungsermittlung und die Identifikation von Betriebsmodi [GFD+09, S. 210f.], [GBD+12, S. 92f.].

**Anforderungen:** Die Anforderungen beschreiben die Ziele für das zu entwickelnde System. An ihnen orientiert sich in dem gesamten Produktentstehungsprozess die Bewertung der Zielerreichung. Sie werden in einer Anforderungsliste strukturiert und rechnerintern in einem Partialmodell abgelegt. Es wird zwischen Wunsch- und Festanforderungen unterschieden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Anforderungen möglichst eine quantitative Aussage besitzen, so dass die Erfüllung der Anforderung einfach geprüft werden kann. Bei der Erstellung von Anforderungslisten können Checklisten<sup>7</sup> Hilfestellung geben.

**Funktionen:** Eine Funktion beschreibt den lösungsneutralen und gewollten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen zur Erfüllung einer Aufgabe [PBF+07, S. 215]. Die Funktionen werden in einer Funktionshierarchie strukturiert und so lange in Teilfunktionen untergliedert, bis sinnvolle Lösungen zur Erfüllung der Teilfunktionen gefunden werden können. Dabei können Funktionskataloge<sup>8</sup> unterstützen [GFD+09, S. 212f.], [GBD+12, S. 94f.].

**Wirkstruktur:** Die Wirkstruktur ist neben den Anforderungen der Kern des Prinzipiöses eines mechatronischen Systems. In ihr werden der grundsätzliche Aufbau und die Wirkungsweise dargelegt. Sie enthält die Systemelemente zur Erfüllung der Teilfunktionen und ihre Beziehungen zueinander. Die Beziehungen werden mittels Stoff-, Energie- und Informationsflüssen modelliert. Abhängig vom Konkretisierungsgrad handelt es sich bei den Systemelementen um Wirkprinzipien, Module, Bauteile, Baugruppen oder Software-Komponenten. Im Verlauf der Entwicklung werden sie konkretisiert und detailliert [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 95ff.].

**Verhalten:** Das Verhalten wird über zwei Partialmodelle modelliert. Zustände und Zustandsübergänge werden im Partialmodell Verhalten-Zustände beschrieben. In dem zweiten Partialmodell Verhalten-Aktivitäten werden die Ablaufprozesse innerhalb eines

---

<sup>7</sup> Beispiele für Checklisten finden sich in [Rot00], [PBF+07], [Ehr09].

<sup>8</sup> Beispiele für Funktionskataloge finden sich in [BB80] und [Lan00].

Systemzustandes erläutert. Das Verhalten wird hierarchisch spezifiziert, sowohl für das Gesamtsystem als auch für einzelne Systemelemente. Die Beschreibung des Verhaltens bildet den Ausgangspunkt für den Software- und Reglerentwurf [GFD+09, S. 213f.], [GBD+12, S. 98f.].

**Gestalt des Produkts:** Unter diesem Aspekt werden bereits in der Konzipierung erste Festlegungen zur Produktgestalt getroffen. Den Ausgangspunkt bilden die Wirkstruktur sowie Gestaltinformationen von bekannten Bauteilen und Baugruppen (z. B. Zukauf- oder Normteile). Es werden Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte spezifiziert. Des Weiteren können Hüllflächen und Stützstrukturen ergänzt werden. Zur rechnerinternen Modellierung können 3-D-CAD-Systeme verwendet werden [GFD+09, S. 213], [GBD+12, S. 96ff.].

**Prozesse:** In dem Partialmodell Prozesse wird der Produktionsablauf als Folge von Arbeitsvorgängen beschrieben. Zu den Arbeitsvorgängen zählen Fertigungs-, Montage-, Prüf- und Transportprozesse, die im Entwicklungsverlauf detailliert und konkretisiert werden. Materialelemente bilden die Ein- und Ausgangsobjekte der Prozesse und können Rohstoff, Zulieferteil, Handelsware sowie Roh-, Halb- und Fertigteil sein [GK07, S. 22]. Die Materialelemente entsprechen z. T. den zu fertigenden Systemelementen aus der Wirkstruktur (z. B. Bauteil, Baugruppe) und andere stellen Zwischenzustände des Produktionsprozesses dar (z. B. Ausgangsmaterialien, Zwischenbaugruppen) [GBR10, S. 717f.], [GBD+12, S. 100ff.].

**Ressourcen:** In dem Partialmodell Ressourcen werden die zur Realisierung der Prozesse benötigten Betriebsmittel und das erforderliche Personal dargelegt. Sie werden den einzelnen Arbeitsvorgängen zugeordnet. Dabei können Ressourcen mehrere Arbeitsvorgänge ausführen. Sie sind über Materialflüsse verkettet. Die Reihenfolge der zu durchlaufenden Ressourcen ergibt sich aus der im Partialmodell Prozess geschilderten Arbeitsfolge. Das Partialmodell Ressourcen ist Ausgangspunkt für die Arbeitsmittel- und Materialflussplanung [GBR10, S. 718f.], [GBD+12, S. 102f.].

**Gestalt des Produktionssystems:** Analog zur Produktkonzipierung werden auch in der Produktionssystemkonzipierung bereits erste Festlegungen zur Gestalt getroffen. So können Arbeitsräume und Platzbedarfe in einem groben Layout festgelegt werden. Die Spezifikation erfolgt in Form von Skizzen oder CAD-Modellen und kann für die Konkretisierung in der Arbeitsstättenplanung und Arbeitsmittelplanung verwendet werden [GBR10, S. 719], [GBD+12, S. 103].

Eine softwaretechnische Umsetzung der Spezifikationstechnik ist der **Mechatronic Modeller**. Es ist ein Werkzeug zur Modellierung der Prinziplösung und unterstützt bei der Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. Der Mechatronic Modeller nutzt formale Modelle zur Modellierung. Diese umfasst die Festlegung bzgl. Syntax und Semantik der Spezifikationstechnik CONSENS.

### 2.3.4 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen ist die erste Phase, die *Konzipierung*, sehr wichtig. Dies gilt ebenso für die Produktionssystemplanung, in der die fachdisziplinenübergreifende Beschreibung des Systems erstellt wird. Diese Prinziplösung enthält den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems. Es wurden bereits erste Festlegungen hinsichtlich Fertigungs- und Montageprozessen getroffen und die Arbeitsvorgangsfolge festgelegt. Durch die Identifikation von Lösungselementen können bereits Baugruppen und Anlagenteile bekannt sein. Auf Grundlage dieser Prinziplösung erfolgt die weitere fachdisziplinspezifische Konkretisierung.

Die zu entwickelnde Systematik lehnt sich an der vorgestellten Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme und der Konzipierung von Produktionssystemen an. Dazu wird das Vorgehen bei der Entwicklung von mechatronischen Systemen in das zu entwickelnde Vorgehensmodell integriert. Es stellt einen roten Faden für Entwickler und Planer dar. Das natürliche Vorgehen bei der Entwicklung entspricht nicht einem sequentiellen Vorgehen, sondern ist vielmehr durch Iterationen geprägt. Die Systematik muss ebenfalls die Modellierung mit der Spezifikationstechnik unterstützen.

## 2.4 Anlagenherstellung

In der Anlagenherstellung erfolgt die Fertigung der in den vorangegangenen Phasen (Produktionssystemplanung) geplanten Anlage. Die wesentlichen Aufgaben dieser Phase sind die Teilefertigung und die Montage. Vorab sind in der Fertigungsvorbereitung die zur Erstellung der Anlage notwendigen Maßnahmen durchzuführen.

Die **Fertigungsvorbereitung** gliedert sich in die Arbeitsplanung und die Arbeitssteuerung<sup>9</sup>. Aufgaben der Arbeitsplanung sind die Festlegung der Arbeitsvorgänge und der geeigneten Arbeitsverfahren sowie Betriebsmittel, die Auswahl der Rohstoffe und die Materialflussplanung. Des Weiteren ist eine Kosten-, Investitions- und Personalplanung vorzunehmen. Die Arbeitsplanung beeinflusst auch die Produktgestaltung und entscheidet über Eigen- und Fremdfertigung [AR68, S. 3], [REF91, S. 64], [Eve97, S. 6ff.].

Die Aufgaben der Arbeitsplanung beeinflussen sich gegenseitig und sind aus diesem Grund nicht streng sequentiell durchzuführen. Während der Arbeitsplanung werden unterschiedliche Planungsebenen, unterschiedliche Abstraktionsgrade und unterschiedliche Sichtweisen genutzt. GAUSEMEIER ET AL. strukturiert die Arbeitsplanung in die Hauptaspekte Arbeitsablaufplanung, Arbeitsmittelplanung und die Produktionslogistik mit dem Schwerpunkt Materialflussplanung sowie die Arbeitsstättenplanung [GP14, S. 28ff.].

---

<sup>9</sup> In der Arbeitssteuerung erfolgt die Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsabläufe. Sie ist ein kontinuierlicher Prozess, der festlegt, *wie viel, wann, wo* und *durch wen* das Produkt hergestellt wird [Eve97, S. 3]. Die Arbeitssteuerung wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Ziel der Arbeitsablaufplanung ist die Festlegung des Arbeitsablaufes. Die Erzeugnisdokumentation bestehend aus Konstruktionszeichnungen und Stücklisten bildet die Eingangsinformation [PBF+07, S. 553ff.], [REF91, S. 369ff.]. Diese wurden in den vorangegangenen Phasen *Anlagenkonzipierung* und *-ausarbeitung* (vgl. Abschnitt 2.3) erstellt. In der Arbeitsablaufplanung wird festgelegt, welche Arbeitsaufgabe in welcher Reihenfolge an welcher Arbeitsstation und mit welchem Betriebsmittel ausgeführt wird [GP14, S. 31].

In der Arbeitsmittelplanung werden die Betriebsmittel (Anlagen, Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen sowie Prüf- und Messmittel) zur Erfüllung der Arbeitsvorgänge geplant. Das Ergebnis der Arbeitsmittelplanung ist die Auswahl der Betriebsmittel und die optimale Anordnung der Maschinen und Anlagen [Eve89, S. 51ff.], [Eve97, S. 70f.].

In den Bereich der Produktionslogistik fällt der gesamte Materialfluss in einem Fertigungsbetrieb von dem Wareneingang bis zum Versand. Bei der Planung sind die Aufgabenbereiche Erstellung der Logistikkonzeption, Projektierung des Materialflusssystems, der Handhabungssysteme und der Lagersysteme zu berücksichtigen [GP14, S. 32f.].

In der Arbeitsstättenplanung erfolgt die räumliche Gestaltung der Fabrik, der Arbeitsbereiche, der Produktionslinien und der Arbeitsplätze. Sie lässt sich in Aufgabenbereiche Bebauungs- und Gebäudeplanung, Planung der Produktionsbereiche und -linien und Gestaltung der Arbeitsplätze unterteilen [GP14, S. 33].

Die wesentlichen Aufgabenbereiche der Anlagenherstellung sind die **Teilefertigung** und die **Montage**, in der die vorangegangene Fertigungsvorbereitung umgesetzt wird und der Aufbau des Systems erfolgt. Eine Auflistung der Fertigungsverfahren zur Teilefertigung und Montage ist in der DIN 8580 – Fertigungsverfahren [DIN8580] aufgeführt. Auch hierbei handelt es sich nicht um ein streng sequentielles Vorgehen, vielmehr findet die Fertigung und Montage von Modulen parallel statt. Auch werden einzelne Module schon früher in Betrieb genommen (Teilbetriebnahme). Damit ist der Aufbau der Anlage abgeschlossen und das System ist als Nächstes in Betrieb zu nehmen.

### **Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik**

Die Anlagenherstellung umfasst im Wesentlichen die Arbeitsplanung, die Teilefertigung und die Montage. In der Arbeitsablaufplanung als wesentlicher Teil der Arbeitsplanung werden die Arbeitsvorgangsfolge und die Produktionstechnologien ermittelt. Dies sind zentrale Teilaufgaben bei der Entwicklung von Produktionssystemen. Nach der Arbeitsablaufplanung wird die Arbeitsmittel-, Arbeitsstätten- und Materialflussplanung vollzogen. Mit Ende der Arbeitsplanung sind die einzelnen Planungs- und Entwicklungstätigkeiten abgeschlossen. Es folgt die Teilefertigung und Montage.

Die zu entwickelnde Systematik muss die Anlagenherstellung mit berücksichtigen, um den gesamten Anlagenentstehungsprozess abzubilden. Teilaufgaben der Arbeitsplanung, wie die Ermittlung von Prozessfolgen, die Auswahl von Produktionstechnologien und

erste Materialflussplanungen, sollen in der Anlagenkonzipierung erledigt werden. In der Prinziplösung sollen schon die Aspekte der Arbeitsplanung beachtet werden. Diese dient als Grundlage für die spätere Konkretisierung der Arbeitsplanung in der Arbeitsablauf-, Arbeitsmittel-, Arbeitsstätten- und Produktionslogistikplanung.

## 2.5 Anlageninbetriebnahme

Im Anschluss an die Anlagenherstellung wird die Anlage in Betrieb genommen. Nach Beendigung der Anlageninbetriebnahme und dem SOP ist die Anlagenentstehung abgeschlossen. Im Folgenden wird zum einen die klassische Anlageninbetriebnahme und zum anderen die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) erläutert.

### 2.5.1 Klassische Inbetriebnahme und Hochlauf

Die Inbetriebnahme ist der erste Teil des Produktionsanlaufes. Nach der Inbetriebnahme erfolgt der SOP und mit Abschluss des Hochlaufes ist der Produktionsanlauf vollendet [Lan04, S. 14ff.]. Die Inbetriebnahme schließt den Anlagenentstehungsprozess ab. Damit ist der erste entscheidende Teil des Lebenszyklus der Anlage abgeschlossen. Die Tätigkeiten des Herstellers sind damit beendet und werden vom Kunden abgenommen. Bei der Inbetriebnahme muss zwischen der Erst-Inbetriebnahme beim Anwender und der wiederholten Inbetriebnahme (z. B. nach Wartungsarbeiten) unterschieden werden. In dieser Arbeit wird unter der Inbetriebnahme die Erst-Inbetriebnahme verstanden. Für die vorliegende Arbeit gilt die folgende Definition:

*„Die Inbetriebnahme stellt die Funktionsbereitschaft und das funktionale Zusammenwirken der zuvor montierten Einzelkomponenten her und prüft die Korrektheit der Einzelfunktionen sowie deren funktionales Zusammenwirken. Das Ergebnis der Inbetriebnahme ist eine abnahmefertige und funktionsfähige Anlage“ [Zeu98, S. 27], [DIN19256].*

Die Inbetriebnahme schließt mit einem Leistungsnachweis, der sowohl die Leistung des technischen Systems als auch die Produktionsleistung bewertet. Im Anschluss geht die Verantwortung vom Hersteller auf den Kunden über, der sog. Gefahrenübergang [Bau82, S. 62f.].

Die steigende Komplexität von maschinenbaulichen Anlagen schlägt sich auch in der Inbetriebnahme nieder. So steigt die Bedeutung der Inbetriebnahme und erfordert besondere Maßstäbe an Organisation und Mitarbeiter. Probleme, die in den vorangegangenen Phasen nicht erkannt wurden, treffen hier aufeinander. Sie müssen schnellstmöglich entdeckt und beseitigt werden (vgl. Bild 2-11). Das Ganze geschieht unter einem enormen Zeitdruck, da der Termin des SOP häufig vertraglich zugesichert ist. Hinzu kommt, dass bereits hohe Investitionen in der Anlage stecken. Ein weiteres Problem stellen kurzfristige Änderungen aufgrund von Kundenwünschen dar [Lan04, S. 15].

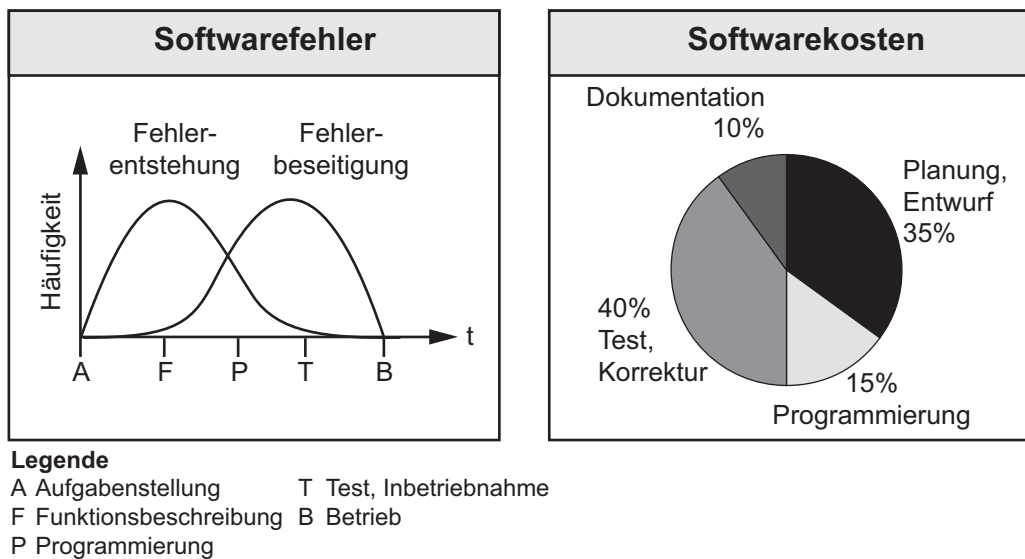


Bild 2-11: Fehler und Kosten bei der SPS-Programmentwicklung [Wec01, S. 151]

Neben der Herstellung der Funktionsfähigkeit und dem Nachweis der Leistungsfähigkeit ist ein weiteres Ziel die Qualifizierung des Bedien- und Instandhaltungspersonals. In Schulungsmaßnahmen, Workshops und Lehrgängen erfolgt durch Spezialisten des Anlagenherstellers der Wissenstransfer [Zeu98, S. 29].

In der Praxis stellt die Inbetriebnahme einen hohen zeitlichen und monetären Aufwand dar. Sie ist geprägt von vielen Unsicherheiten, z. B. einem hohen Ausfallrisiko, der relativen Einmaligkeit der Handlungen, einem hohen Organisationsaufwand und der erhöhten Belastung des Personals [Web06, S. 16ff.]. Verbesserungen in der Inbetriebnahme bieten ein hohes Potential, um Zeit und Kosten einzusparen. Eine Möglichkeit zur Verbesserung stellt die VIBN dar, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

## 2.5.2 Virtuelle Inbetriebnahme

Der steigende Anteil an Elektrik und Softwaretechnik in maschinenbaulichen Anlagen stellt neue Herausforderungen an die Inbetriebnahme. Die Mechanik wird heute schon durch zahlreiche Simulationsmethoden und -werkzeuge getestet. Für die elektrischen und steuerungstechnischen Anteile fehlte es jedoch an Verfahren, um die funktionale Korrektheit zu verifizieren. Darüber hinaus fallen Defizite in der Entwicklung erst bei der Inbetriebnahme beim Kunden auf. In der VDI-Norm *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen* Blatt 8 *Maschinennahe Simulation* [VDI3633-8] wurde die klassische Simulation um elektro- und steuerungstechnische Aspekte erweitert. Das Ziel der sog. *maschinennahen Simulation* ist es, den mechatronischen Anforderungen gerecht zu werden und bereits im Entwicklungsprozess eine fachdisziplinenübergreifende Integration zu ermöglichen. Typische Simulationsmethoden sind die 3-D-Kinematiksimulation, die Mehrkörpersimulation und die Prozesssimulation [VDI3633-8]. Neben den genannten Simulationsmethoden soll die maschinennahe Simulation auch



die Absicherung des Steuerungssystems und der Steuerungslogik ermöglichen. Hierzu dient die virtuelle Maschine, die auf einer Verknüpfung von Maschinensteuerung, der Simulation und der Visualisierung basiert [MK00, S. 19f.], [Die02, S. 4f.], [Sch01, S. 18]. In der Wissenschaft und industriellen Praxis hat sich der Begriff der *virtuellen Inbetriebnahme* für den Einsatz der virtuellen Maschine für die Absicherung des Steuerungssystems etabliert [VDI4499-2, S. 11f.], [ZW05, S. 699f.], [Kie07, S. 42f.], [Bat06, S. 22]. In der vorliegenden Arbeit wird die VIBN wie folgt definiert:

*Die VIBN ist „die Vorwegnahme der Steuerungsinbetriebnahme an einem virtuellen Modell der mechanischen, hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Bestandteile einer Maschine“ [ZW05, S. 699], „ohne Vorhandensein der realen Fertigungssysteme“ [Kie07, S. 42]. Sie reicht von der „Entwicklung und Überprüfung von Steuerungsabläufen“ [Wün08, S. 32] bis zum „abschließenden Steuerungstest anhand eines Simulationsmodells, das in der Kopplung von realer oder virtueller Steuerung mit dem Simulationsmodell eine ausreichende Abstrakte für alle Steuerungssignale gewährleistet“ [Wün08, S. 33].*

Der Schwerpunkt der VIBN liegt in der Inbetriebnahme der Steuerungssoftware, ist aber nicht auf diese beschränkt. Damit geht die in der vorliegenden Arbeit verwendete Definition weiter als WÜNSCH [Wün08, S. 33] oder HOFFMANN ET AL. [HSM+12, S. 294]. WÜNSCH unterscheidet zwischen der virtuellen Inbetriebsetzung, „die frühe Entwicklung und Überprüfung von Steuerungsabläufen“ [Wün08, S. 32] und der virtuellen Inbetriebnahme, der „abschließende[n] Steuerungstest“ [Wün08, S. 33]. Auch die Definition von HOFFMANN ET AL. besagt, dass die VIBN erst nach der Ausarbeitung erfolgen kann („a realistic VC is not possible until detailed engineering design has been completed“ [HSM+12, S. 294]).

Die VIBN bietet zeitliche und qualitative Vorteile gegenüber dem konventionellen Vorgehen der Inbetriebnahme [ZWH+06a, S. 596ff.], [ZWH+06b, S. 768ff.], [RHL+07, S. 667]. Im Bild 2-12 ist das Grundprinzip der VIBN visualisiert und der zeitliche Vorteil der VIBN ersichtlich. Der Ablauf der VIBN lässt sich in die Phasen *Modellierung*, *Durchführung* und *Auswertung* untergliedern [BKH+09, S. 390].

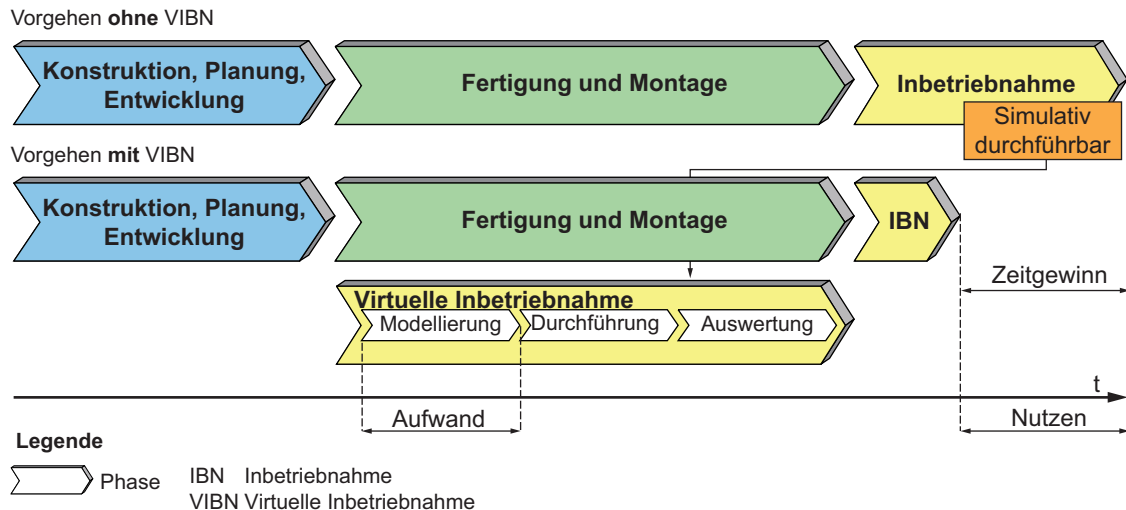


Bild 2-12: Grundprinzip der virtuellen Inbetriebnahme nach [ZW05, S. 700]

Parallel zur Fertigung und Montage erfolgt die Inbetriebnahme der Steuerungssoftware an virtuellen Modellen. So können eine Vielzahl an Fehlern bereits frühzeitig erkannt und beseitigt werden [ZW05, S. 700]. In der anschließenden Inbetriebnahme liegt folglich eine Steuerungssoftware mit höherer Qualität vor. Es sind weniger Iterationsschleifen notwendig damit die Software alle Steuerungsfunktionen korrekt umsetzt [ZWH+06b, S. 770].

Bei der VIBN entstehen Kosten durch die Werkzeuge (z. B. Softwarelizenzen, Simulationsrechner), Arbeitskosten bei der Modellierung sowie Arbeitskosten bei dem Betrieb der Simulation. Demgegenüber steht der Nutzen durch Verkürzung der Durchlaufzeit<sup>10</sup>, durch Synergieeffekte (z. B. Dokumentation der IBN) und durch Qualitätszuwachs der Steuerungssoftware [ZW05, S. 700].

Ein Gesamtsystem zur Durchführung der VIBN setzt sich aus drei Teilsystemen zusammen (vgl. Bild 2-13):

- dem *Simulationsmodell* für den mechanischen Aufbau mit Sensorik, Aktorik und der Verhaltensbeschreibung,
- der *Steuerungstechnik* mit den zugehörigen Ein- und Ausgangssignalen sowie
- der *Schnittstelle* zwischen den beiden [Kie07, S. 42], [VDI3633-8, S. 45].

<sup>10</sup> Insbesondere die Zeit mit der hohen Kapitalbindung in der Schlussphase wird verkürzt [ZW05, S. 700].

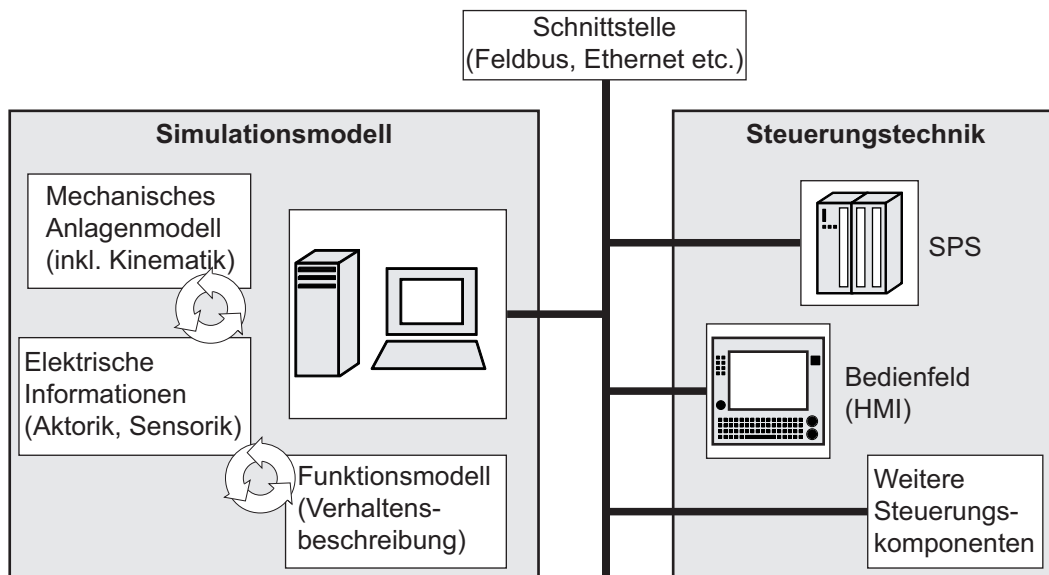


Bild 2-13: Teilsysteme zur Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme [Kie07, S. 43]

Das Simulationsmodell besteht in der Regel aus drei Teilmodellen: einem mechanischen Anlagenmodell, mit dem die Kinematik der Anlage bestimmt wird, einem Modell für die elektrischen Informationen, wie z. B. den Sensoren und Aktoren, sowie einem Funktionsmodell zur Verhaltensbeschreibung des Systems. Die Steuerungstechnik enthält die SPS und das Human Machine Interface (HMI). Darüber hinaus können noch weitere Steuerungskomponenten enthalten sein, wie z. B. Kommunikationsbausteine. Bei der VIBN kann die Steuerungstechnik auch in einem rechnerinternen Modell abgebildet werden, was als Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnet wird. In der VIBN werden häufig reale Steuerungssysteme verwendet. In dem Fall handelt es sich um eine Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL-Simulation).

### 2.5.3 Fazit und Einordnung der zu entwickelnden Systematik

Die Anlageninbetriebnahme ist die letzte Phase des Anlagenentstehungsprozesses. Mit Beendigung der Phase geht die Verantwortung der Anlage vom Hersteller auf den Kunden über. Fehler, die in vorangegangenen Phasen verursacht wurden, werden zu diesem Zeitpunkt identifiziert. Damit ist in dieser Phase eine hohe Unsicherheit vorhanden. Mit der VIBN soll dem entgegengewirkt werden. Sie soll die Softwarequalität erhöhen und die Dauer der Inbetriebnahme verkürzen. Die VIBN bietet viele Vorteile. Der Aufwand für die Modellerstellung steht dem jedoch entgegen. Eine Reduktion des Aufwands für die Modellierung oder eine Steigerung des Nutzens der Modelle würde den Vorteil der VIBN weiter steigern.

Die zu entwickelnde Systematik integriert die bestehenden Methoden zur VIBN in den Anlagenentstehungsprozess. Dazu werden die Aufgaben der VIBN möglichst frühzeitig durchgeführt, insbesondere die Modellerstellung. Es sind Methoden bereitzustellen, die bei der Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe unterstützen. Der Aufwand für die Modellierung soll so gering wie möglich gehalten werden. Die Modelle bilden nur das ab, was zur Anforderungserfüllung notwendig ist. Eine frühzeitige Modellierung ermöglicht die Nutzung der Modelle im gesamten Anlagenentstehungsprozess und nicht nur in der VIBN.

## 2.6 Problemabgrenzung

Produzierende Unternehmen agieren heute in einem turbulenten, hochkomplexen Umfeld. Dies stellt die Unternehmen vor die Herausforderung, komplexe Produktionsanlagen schnell und sicher zu planen und ohne unnötige zeitraubende und kostenintensive Iterationsschleifen in Betrieb zu nehmen. Anstatt einer sequentiellen Vorgehensweise bedarf es eines integrativen Ansatzes, der die gesamten vernetzten Entwicklungs-, Herstellungs- und Inbetriebnahmeaufgaben in den unterschiedlichen Fachdisziplinen beinhaltet. Im Bereich der Steuerungs- und Automatisierungstechnik ergeben sich neue Anforderungen. Die Integration der Steuerungssoftware in der Inbetriebnahme verursacht hohe Kosten und erfordert viel Zeit. Neben den Kosten führen kurzfristige Anpassungen der Steuerungssoftware in der Inbetriebnahme zu unvollständiger Dokumentation und zu einer suboptimalen Softwarequalität [KBB06, S. 682]. Es ist ein ganzheitlicher Verhaltens- und Denkansatz gefordert, der den gesamten Anlagenentstehungsprozess umfasst [AR11, S. 63f.].

Ein Lösungsansatz für die Problematik des sequentiellen Vorgehens besteht in der **integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem**. Die vormals sequentiellen Abläufe in der Produkt- und Prozessentwicklung [Ehr09, S. 188] werden nun, durch interdisziplinäre Entwicklungsteams abgestimmt, bearbeitet. Dabei muss eine Vielzahl von parallelen Aktivitäten koordiniert werden. Die beteiligten Fachbereiche müssen ihre Ergebnisse frühzeitig austauschen und die Vorgehensweise abgleichen [ELP+05, S. 21]. Der Austausch und die Vorgehensweise bedürfen einer systemorientierten Integration der Methoden und Arbeitstechniken aller beteiligten Fachdisziplinen. Ansätze wie das *Simultaneous Engineering* (vgl. Abschnitt 3.1.1) oder das *Systems Engineering* (vgl. Abschnitt 3.1.2) unterstützen dabei [AR11, S. 63f.].

Bei mechatronischen Systemen muss die Abstimmung der Entwicklung schon frühzeitig beginnen. Deshalb hat die Phase der Konzipierung in der Entwicklung von mechatronischen Systemen eine entscheidende Bedeutung. Der grundsätzliche Aufbau und die Funktion der maschinenbaulichen Anlage werden mit der Prinziplösung festgelegt. Sie ist die Grundlage für die Koordination und Kooperation zwischen den Fachdisziplinen und Basis für die weitere fachdisziplinspezifische Konkretisierung sowie Analysen [GFD+09]. Dieser Zeitpunkt ist auch der Ansatzpunkt, um ggf. ein Produktionssystem zu entwickeln. Aus der integrativen Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem

und einer einheitlichen Vorgehensweise ergeben sich Nutzenpotentiale. So können die Wechselwirkungen von Produkt und Produktionssystem von Beginn an berücksichtigt werden [Mic06, S. 2], [VDI2206, S. 43], [Nor12, S. 51]. Durch die Berücksichtigung des Einflusses von Produktionstechnologien auf das Produktkonzept erweitern sich die Möglichkeiten der Produktgestaltung. So können durch den Einsatz innovativer Produktionstechnologien beispielsweise Bauteileigenschaften erzeugt werden, die neuartige Produktfunktionen realisieren oder mehrere in ein Modul integrieren [Nor12, S. 50]. Dies kann durch den Einsatz von innovativen Produktionstechnologien geschehen. Eine frühzeitige Berücksichtigung von produktionstechnischen Anforderungen ist für eine wirtschaftliche Produktgestaltung entscheidend [AR11, S. 63]. Die frühzeitige Abstimmung zwischen den beteiligten Entwicklungsbereichen verhindert auch zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen zu späteren Zeitpunkten des Entwicklungsprozesses. Die frühzeitige Identifikation von Fehlern reduziert auch die Kosten. Nach der *Rule of Ten* erhöhen sich die Kosten für die Beseitigung von Fehlern im Entwicklungsverlauf jeweils um den Faktor zehn [Ehr09, S. 139], [CF92].

Ein Lösungsansatz zur Unterstützung der Inbetriebnahme ist die **virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)**. Bei dieser wird das Verhalten der Anlage in einem Modell (Verhaltensmodell) abgebildet (vgl. Abschnitt 2.5.2) [Wün08, S. 33ff.], [Sau11, S. 959]. Die Steuerungsprogramme können so schon frühzeitig einem Test unterzogen werden. Diese Vorwegnahme des Steuerungsprogrammtests führt zu einer deutlichen Verkürzung der Inbetriebnahmezeit. Gleichzeitig steigt durch die systematischen Tests die Qualität der Steuerungsprogramme, da Fehler frühzeitig identifiziert und behoben werden können [ZWH+06b, S. 768f.]. Weiterhin kann das Maschinenverhalten gezielt auf solche Fehler getestet werden, welche bei der realen Anlage eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Auf diese Weise führt die virtuelle Inbetriebnahme zu Erkenntnissen, die in der weiteren Entwicklung von großem Nutzen sind, insbesondere bei der realen Inbetriebnahme [Köv10, S. 23]. Zusätzlich kann die virtuelle Anlage zur frühzeitigen Schulung des Bedienpersonals eingesetzt werden.

Der Nachteil der VIBN liegt in der aufwändigen Modellerstellung. Häufig kompensiert sie den Zeitvorteil bei der Inbetriebnahme und der kumulierte Zeitaufwand bis zum Produktionsanlauf der Anlage bleibt gleich. Aus diesem Grund ist die Wirtschaftlichkeit einer virtuellen Inbetriebnahme nicht per se gegeben, sondern hängt von den spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Projektes ab [Köv10, S. 35], [KHK10, S. 116]. Ferner können bestehende Modelle in neuen Projekten nur eingeschränkt wiederverwendet werden. Aufbau und Art der Modellierung sind nicht formal beschrieben und daher überaus stark vom Ersteller des Modells abhängig. Eine detaillierte Dokumentation ermöglicht zwar eine Wiederverwendung von Modellen, ohne eine solche Dokumentation ist die nachträgliche Analyse jedoch sehr zeitaufwändig. Die Neumodellierung ist häufig schneller und somit kostengünstiger [WWC+08, S. 157].

Für die VIBN liegen daher große Verbesserungspotentiale in der vereinfachten Modellerstellung und der hohen Wiederverwendbarkeit der Modelle [ZWH+06b, S. 770f.].

Die Wiederverwendung der Modelle setzt dabei eine einheitliche Modularisierung voraus. Verbesserungspotential besteht auch in der Verwendung der Modelle in mehreren Phasen der Anlagenentstehung und nicht nur in der VIBN. Es gibt keine Systematik, die schon in der Anlagenkonzipierung die Erfordernisse für eine VIBN antizipiert. Um auf Basis der integrativen Anlagenherstellung die Nutzenpotentiale zu erschließen, sind folgende **Herausforderungen** zu bewältigen:

- **Modularisierung von maschinenbaulichen Anlagen:** Maschinenbauliche Anlagen sind in der Regel modular aus einzelnen Arbeitsstationen oder Baugruppen (Lösungselementen<sup>11</sup>) aufgebaut. Die Gestaltung der Module ist in großem Maße von der mechanischen Konstruktion geprägt. Auch werden in den anderen Fachdisziplinen (insbesondere Steuerungstechnik) nicht die gleichen Module verwendet. In der VIBN führt dies zu Problemen, da die Verhaltensmodelle jeweils alle Fachdisziplinen berücksichtigen müssen. Eine unterschiedliche Modularisierung macht die Wiederverwendung von Modellen schwierig. Ebenso gibt es integral aufgebaute maschinenbauliche Anlagen. Solche Anlagen zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine hohe Funktionsintegration aufweisen und die Baugruppen mehrere Funktionen bei der Bearbeitung übernehmen. In beiden Fällen bedarf es einer Dekomposition von maschinenbaulichen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der VIBN, so dass die entstehenden Module wiederverwendet werden können.
- **Verbesserung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses der Verhaltensmodelle:** Die Erstellung der Verhaltensmodelle für die VIBN ist ein hoher Aufwand. Für die Modellerstellung werden Experten benötigt [HSM+10, S. 178], die häufig nicht in ausreichender Anzahl im Unternehmen anzutreffen sind. Es gibt mehrere Ansätze, um das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Verhaltensmodelle zu verbessern. Zum einen kann der Aufwand für die Modellerstellung durch eine automatisierte Modellerstellung<sup>12</sup> reduziert werden. Ebenso kann durch eine geeignete Wahl der Modellierungstiefe der Aufwand gering gehalten werden. Die Modelle werden nur so detailliert erstellt, wie es notwendig ist. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzenerhöhung der Verhaltensmodelle. Dies kann zum einen durch die Wiederverwendung von Modellen geschehen, was einen systematischen Modellerstellungsprozess voraussetzt. Zum anderen können die Modelle so aufgebaut werden, dass sie in der Anlagenkonzipierung (vgl. Abschnitt 2.3.2) und ebenfalls in der VIBN genutzt werden. Die Anforderungen an Modelle für den modellbasierten Entwurf und die VIBN sind in großen Teilen gleich. Sie unterscheiden sich jedoch

---

<sup>11</sup> Ein Lösungselement ist ein konkretisiertes Systemelement. Gestaltbehaftete Lösungselemente sind Bauteile [Dum11, S. 38]. Unter Lösungselement wird in einer maschinenbaulichen Anlage ein Zukaufteil (z. B. 3-Finger-Greifer), oder eine Baugruppe (z. B. Platinenwender) verstanden, die in der Vergangenheit schon verwendet wurde.

<sup>12</sup> In dieser Arbeit wird die automatisierte Erstellung von Modellen nicht adressiert. Informationen zur automatischen Generierung von Simulationsmodellen kann z. B. aus BARTH [Bar11] entnommen werden.

in ihrem zentralen Betrachtungsgegenstand. Die Modelle für den modellbasierten Entwurf haben die Funktion eines Moduls im Fokus. Bei der VIBN ist auch die Nichterfüllung einer Funktion wesentlicher Bestandteil des Modells. Das Steuerungsprogramm muss auf solche Ausfälle korrekt reagieren. Durch die VIBN ergeben sich also zusätzliche Modellanforderungen. Werden sie frühzeitig mit berücksichtigt, kann das Modell um diese Aspekte erweitert und auch in der VIBN genutzt werden, was ein geringerer Aufwand ist, als die Modelle später anzupassen.

- **Frühzeitige Integration der VIBN in den Anlagenentstehungsprozesses:** Mit der VIBN wird heute erst in der Anlagenausarbeitung begonnen. Dabei sind die wesentlichen Design-Entscheidungen schon gefallen. Sie sind nicht integraler Teil der Produktionssystemplanung, sondern unterstützen dabei, die Inbetriebnahme zu beschleunigen. Einflüsse aus der Inbetriebnahme auf die Produktionssystemplanung werden nicht berücksichtigt. Eine Integration in der frühen Anlagenkonzeption ermöglicht eine geeignete Modularisierung der Anlage und eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Modelle, womit sich der Nutzen der VIBN erhöht.
- **Steuerung des Anlagenentstehungsprozesses:** Es existiert eine etablierte Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, die gemeinsame Begriffe, Denkweisen, Methoden und Vorgehensmodelle liefert. Dadurch wird ein integriertes, abgestimmtes, ganzheitliches Handeln erleichtert und Zeit und Kosten werden reduziert. Die Entwicklungsmethodik wurde von GAUSEMEIER ET AL. für die Konzipierung detailliert und ein Vorgehensmodell sowie Methoden und Werkzeuge wurden entwickelt. Die Entwicklungsmethodik berücksichtigt jedoch nicht alle Aspekte bei maschinenbaulichen Anlagen, insbesondere die Inbetriebnahme wird nicht adressiert und ist zu ergänzen. Die bestehenden Vorgehensmodelle zur virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigen nicht die Methoden zur Dekomposition und sind nicht in den Entwicklungsprozess integriert. Die Modellerstellung wird nicht besonders betrachtet. Zur Durchführung einer systematischen VIBN muss dem Anwender die Handlungsabfolge und Anwendung der zu erarbeitenden Methoden in Form eines Vorgehensmodells zur Verfügung stehen.

Es besteht somit **Bedarf** für eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*. Sie soll den beteiligten Produktentwickler, Fertigungsplaner und den Inbetriebnehmer bei der Anlagenentstehung unterstützen und den Nutzen von Verhaltensmodellen erhöhen. Die Systematik soll dabei, der Definition aus Abschnitt 2.1 nachkommend, folgende Bestandteile umfassen:

- ein **Vorgehensmodell**, welches die Arbeitsschritte bei der Anlagenentstehung mit VIBN sowie deren Eingangs- und Ausgangsinformationen detailliert beschreibt, den Methodeneinsatz steuert und einen roten Faden darstellt,
- **Methoden und Werkzeuge** zur Nutzenerhöhung der Verhaltensmodelle der VIBN,

- eine **Technik zur Beschreibung des Anlagenentstehungsprozesses**, um den integralen Anlagenentstehungsprozess zu unterstützen.

Die Systematik automatisiert den Anlagenentstehungsprozess nicht. Sie unterstützt jedoch bei der kreativen Tätigkeit und bei der Koordination der Vorgehensweise.

## 2.7 Anforderungen

Auf Basis der Problemanalyse werden die folgenden Anforderungen an eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* gestellt.

**A1) Fachdisziplinenübergreifend einsetzbar:** Bei heutigen maschinenbaulichen Anlagen handelt es sich in der Regel um mechatronische Systeme. Die Systematik sollte für alle beteiligten Fachdisziplinen geeignet sein. Das Vorgehensmodell und die eingesetzten Methoden müssen für alle Fachdisziplinen anwendbar sein oder es sind für die jeweiligen Disziplinen geeignete Vorgehensmodelle und Methoden anzugeben.

**A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme:** Für die Entwicklung von mechatronischen Systemen existiert eine etablierte Methodik (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die geforderte Systematik zur Integration der virtuellen Inbetriebnahme muss diese Methodik nutzen.

**A3) Ganzheitliche Betrachtung des Anlagenentstehungsprozesses:** Der gesamte Anlagenentstehungsprozess von der Anlagenkonzipierung bis zur Anlageninbetriebnahme hat Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme. Die VIBN beginnt heute in der Anlagenausarbeitung. Verhaltensmodelle für den Steuerungstest stehen somit erst nach Abschluss der Produktionssystemplanung zur Verfügung. Eine frühere Berücksichtigung kann bei der Steuerungsprogrammerstellung unterstützen. Verbesserungen können in die Produktionssystemplanung einfließen und fallen nicht erst in der Inbetriebnahme auf. Die Systematik muss deshalb den gesamten Anlagenentstehungsprozess abdecken und schon frühzeitig müssen die Anforderungen, die sich aus der VIBN ergeben, mit berücksichtigt werden.

**A4) Systematische Vorgehensweise:** Das Vorgehen in der Anlagenentstehung ist von Iterationen geprägt und stellt ein Wechselspiel aus Synthese- und Analyseschritten dar. Eine systematische Vorgehensweise stellt sicher, dass die notwendigen Phasen in der richtigen Reihenfolge durchlaufen werden. Die Systematik muss ein Vorgehensmodell enthalten, das die beteiligten Fachleute bei dem zielgerichteten Anlagenentstehungsprozess unterstützt.

**A5) Nutzung eines fachdisziplinenübergreifenden Beschreibungsmittels:** Die Beschreibung der Prinziplösung ist Informationsbasis für die beteiligten Fachleute. Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Anlagenmodulen müssen für Entwickler, Planer, Inbetriebnehmer etc. erkennbar sein. Die Notation über den Anlagenentstehungsprozess soll ähnlich sein und eine Wiedererkennung ermöglichen.



**A6) Nutzung von Erfahrungswissen:** In der Anlagenentstehung sind vollständige Neuentwicklungen eher die Ausnahme. In der Regel handelt es sich um Anpassungs- bzw. Variantenentwicklungen, so dass ähnliche Projekte mit bewährten Teillösungen existieren. Die Systematik soll die beteiligten Fachleute dabei unterstützen, auf bewährte Lösungen zurückzugreifen.

**A7) Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage:** Zur Reduktion der Komplexität im Anlagenentstehungsprozess muss die Anlage in überschaubare Module zerlegt werden. Hierfür muss eine Methode vorhanden sein, die Module erzeugt, die über den gesamten Prozess genutzt werden können. Sie soll für integral wie auch modular aufgebaute Anlagen anwendbar sein. Die Module sollten auch wiederverwendbar sein.

**A8) Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe:** Der Aufwand für die Modellierung von maschinenbaulichen Anlagen ist stark abhängig von der Modellierungstiefe (vgl. Abschnitt 2.6). Sehr detaillierte Modelle erfordern einen hohen Modellierungsaufwand. Wie detailliert ein Modell aufgebaut werden muss, ist abhängig davon, welche Informationen aus der Simulation gewonnen werden sollen. Die Systematik muss den Entwickler bei der Wahl der geeigneten Modellierungstiefe unterstützen.



### 3 Stand der Technik

Aus der Problemanalyse lässt sich ableiten, dass für eine effiziente Anlagenentstehung eine Systematik zur Integration der virtuellen Inbetriebnahme erforderlich ist. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über bestehende Ansätze, mit denen die Anlagenentstehung und die VIBN integriert werden können. In Abschnitt 3.1 werden zunächst die Rahmenwerke und Vorgehensmodelle für die Produktentstehung bzw. zur Produktionssystemplanung und zur Planung der Automatisierung dargelegt. In Abschnitt 3.2 werden die bestehenden Ansätze zur Inbetriebnahme vorgestellt, zunächst die methodischen Ansätze und im Anschluss die Ansätze zur virtuellen Inbetriebnahme und die softwaretechnischen Umsetzungen. Zur Reduktion der Aufwände bei der Modellierung bietet sich eine Wiederverwendung von Modellen an. Aus diesem Grund werden im Abschnitt 3.3 Verfahren zur Produktstrukturierung aufgezeigt. Das Kapitel schließt mit der Analyse und Bewertung der beschriebenen Ansätze anhand der in Abschnitt 2.7 gestellten Anforderungen.

#### 3.1 Rahmenwerke und Vorgehensmodelle

Neben den bereits beschriebenen Methoden zur Anlagenkonzipierung und -ausarbeitung (vgl. Abschnitt 2.3) existieren weitere Konzepte zur integrativen Produktentstehung mit zeitlich parallelen Phasen. In den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.3 werden zunächst übergeordnete Ansätze und Rahmenwerke beschrieben. In den Abschnitten 3.1.4 und 3.1.5 werden Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung erläutert. Die Produktionssystemplanung unterscheidet sich von der Produktentwicklung dahingehend, dass in der Regel keine neuen Lösungen für Funktionen entwickelt werden müssen, sondern bestehende Lösungen den Anforderungen entsprechend angepasst werden. Sind spezielle Lösungen erforderlich, die eine Entwicklung notwendig machen, erfolgt diese meistens an einer anderen Stelle (z. B. Zulieferer). Oft hat die Planung Projektcharakter, da sie einmalig gemäß den Anforderungen vorgenommen wird. Entsprechend sind allgemeine Vorgehensmodelle entwickelt worden, die bei Bedarf projektspezifisch an die Ziele angepasst werden [AFG+03, S. 17]. Der letzte Abschnitt befasst sich mit Vorgehensmodellen zur Planung der Automatisierung.

##### 3.1.1 Simultaneous Engineering

Kern des *Simultaneous Engineering*<sup>13</sup> ist eine zielgerichtete fachdisziplinenübergreifende Zusammen- und Parallelarbeit für den gesamten Produktlebenslauf. Ein straffes Projektmanagement unterstützt bei der gesamten Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung [Alb94], [Ehr09, S. 218], [PBF+07, S. 205]. Das Ziel ist ein früherer Markt-

---

<sup>13</sup> Wird auch als Concurrent Engineering bezeichnet [Rab09, S. 233].

eintritt bei reduzierten Herstellkosten und einer verbesserten Produktqualität [EBL95, S. 2].

Das *Simultaneous Engineering* umfasst eine Vielzahl an Methoden, Werkzeugen und Verfahren. Sie lassen sich nach arbeitsorganisatorischer und arbeitsgestalterischer Sicht unterscheiden. Zur ersten Gruppe gehören die Teamarbeit, die Prozessorientierung sowie das Projektmanagement. Zur Gruppe der arbeitsgestaltenden Hilfsmittel zählen das Frontloading (Verlagerung des Schwerpunktes in der Entwicklung auf die Auftragsklärung bzw. die Konzeptphase) sowie der Einsatz von IT-Werkzeugen (CAD, Virtual Prototyping, Simulation) [Ehr09, S. 218]. Der Einsatz der Methoden wird durch drei Leitsätze und die Gestaltungsfelder beschrieben. Die Leitsätze beschreiben dabei, *wie* die Methoden eingesetzt werden sollen. Den Gestaltungsfeldern wird entnommen, *wo* sie Anwendung finden [VB05, S. 230f.].

Die Leitsätze sind als knappe Handlungsanweisungen formuliert [SB97, S. 15ff.]:

- **Parallelisierung** der Produktentstehungsprozesse durch Erfassung der Abhängigkeiten und Optimierung der Prozesse. Prozesse ohne Abhängigkeiten können zeitgleich ablaufen. Vernetzte Prozesse werden bereits begonnen, bevor der vorangegangene Prozess abgeschlossen ist.
- **Standardisierung** des Produktentstehungsprozesses durch Beschreibung und Regelung verschiedener Aspekte unabhängig von Personen und Ereignissen. Die Standardisierung bezieht sich auf technisch-strukturelle Aspekte (z. B. Bauelemente, Module), auf prozessbezogene Faktoren (z. B. Entwicklungsphasen) und auf ablauf- und aufbauorganisatorische Aspekte (z. B. Schnittstellen zwischen Projekten und Abteilungen).
- **Integration** der einzelnen Teilaktivitäten in den Produktentstehungsprozess zur Verminderung der Schnittstellenverluste. Bildung von interdisziplinären, abteilungsübergreifenden und prozessorientierten SE-Teams.

Die Leitsätze können in den folgenden **Gestaltungsfeldern** genutzt werden: Produkt, Aufbauorganisation, Abläufe und Human- und Sachressourcen. Dem übergelagert bietet sich auch die Unternehmenskultur als Gestaltungsfeld an [SB97, S. 17f.].

Das Kernelement des *Simultaneous Engineering* sind mit allen Beteiligten abgestimmte Entscheidungen in den frühen Entwicklungsphasen. So sollen spätere Änderungen reduziert und der weitere Entwicklungsprozess parallelisiert werden. Voraussetzung dafür ist eine klare Definition der Ziele in einem abgestimmten Lastenheft [EBL95, S. 19ff.]

**Bewertung:** Das *Simultaneous Engineering* umfasst eine Vielzahl von Methoden, Werkzeugen und Verfahren für eine integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem. Der Schwerpunkt liegt auf einer frühzeitigen Auftragsklärung mit dem Ziel, ein gemeinsames Verständnis über die Entwicklungsaufgabe zu erhalten. Hierzu

erfolgt die Dokumentation des Produktkonzeptes im Lastenheft. Der Inbetriebnahmeprozess wird nicht mit berücksichtigt.

### 3.1.2 Model Based Systems Engineering

Beim *Systems Engineering* (SE) stehen multidisziplinäre Systeme im Mittelpunkt. Unter dem Begriff SE werden unterschiedliche Ausprägungen und eine große Anzahl an Definitionen verstanden. Es handelt sich also um einen ganzheitlichen Ansatz bei der Produktentstehung.

SE besteht aus den im Bild 3-1 dargestellten Elementen und erfasst so den gesamten Bereich der Produktentwicklung. Die beiden Grundbausteine sind das *Systemdenken* (vgl. Abschnitt 2.1.3) und die *Vorgehensmodelle* (vgl. Abschnitt 0). Im Zentrum steht der Problemlösungsprozess mit den beiden Hauptbereichen *Systemgestaltung*, in der die eigentliche konstruktive Arbeit für die Lösungsfindung stattfindet, und das *Projektmanagement*, das die Organisation und Koordination des Prozesses übernimmt. Die Techniken zur Systemgestaltung und des Projektmanagements unterstützen dabei.

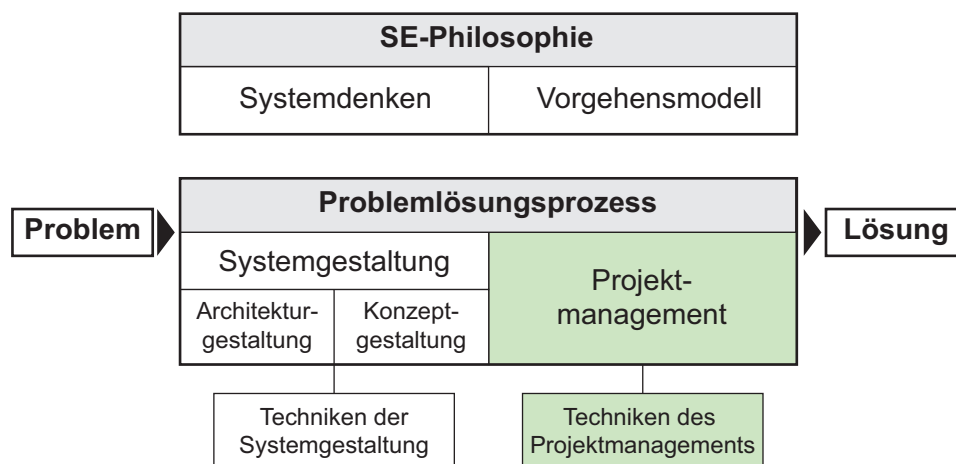


Bild 3-1: Das SE-Konzept [HWF+12, S. 28]

Der vereinfachte Prozess des SE mit den Phasen *Systemspezifikation und Entwurf*, *Systemintegration und Test* sowie bei komplexeren Produkten *Komponentenentwurf, -integration und Test* ist in Bild 3-2 dargestellt.

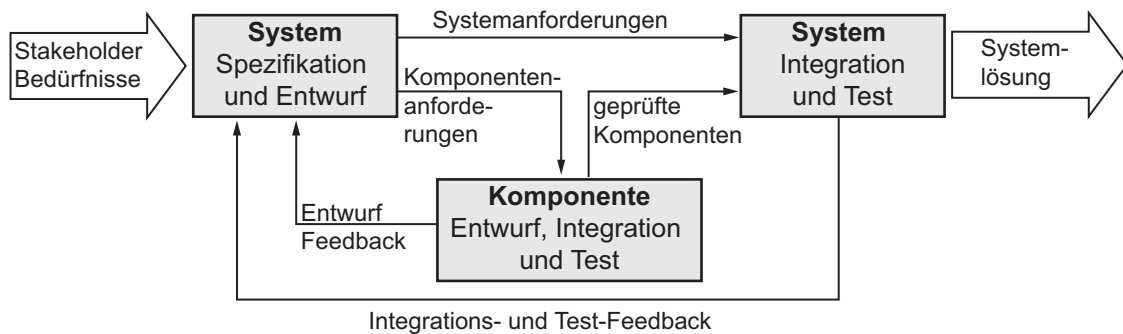


Bild 3-2: Der vereinfachte Prozess des SE nach [FMS08, S. 4]

Die Prozessphase *Systemspezifikation und Entwurf* beinhaltet die folgenden Aufgaben:

**Identifikation und Analyse der Stakeholder-Bedürfnisse:** Die Bedürfnisse werden identifiziert und analysiert, um die Produkteigenschaften zu ermitteln. Die Zielerreichung des Lösungskonzeptes muss messbar gemacht werden.

**Systemspezifikation:** Die Funktionalität, die Schnittstellen und die Eigenschaften des gewünschten Produktes werden spezifiziert, um die Lösungskonzepte bewertbar zu machen.

**Synthese alternativer Lösungskonzepte:** Das Gesamtsystem wird in Module gegliedert. Für diese werden Alternativen entworfen, die die Anforderungen erfüllen.

**Analyse der Lösungskonzepte:** Die Lösungskonzepte werden anhand der Anforderungen aus der Spezifikation und der Stakeholder-Bedürfnisse bewertet und die beste Lösung wird ausgewählt.

**Rückverfolgbarkeit:** Der Entwicklungsprozess muss nachvollziehbar sein. So muss nachvollzogen werden können, aus welchen Bedürfnissen sich die Anforderungen des Systems abgeleitet haben.

Der gesamte Prozess des SE geht dabei von den Bedürfnissen der Stakeholder aus. Auf ihre Zielerfüllung ist der gesamte Prozess ausgerichtet [FMS08, S. 4f.].

Der steigende Anteil an Rechnerunterstützung im SE-Prozess bei der Simulation, Verifikation und Validierung hat Modelle immer wichtiger werden lassen [EGG+12, S. 11f.]. Bedingt durch den ganzheitlichen Ansatz und die Rückverfolgbarkeit des Entwicklungsprozesses hat dies im SE zum **Model Based Systems Engineering (MBSE)** geführt. Dabei ist die Systemmodellierung Teil des SE-Prozesses, wie er oben beschrieben wurde. Zentrales Element des MBSE ist ein kohärentes Systemmodell. Das Systemmodell umfasst die Systemspezifikation sowie Informationen zum Entwurf, zur Analyse und Verifikation. Es besteht aus Elementen zur Repräsentation von Anforderungen, Entwurfselementen, Testszenarien, Entwurfsprinzipien sowie deren Zusammenhänge. Zentrale Aufgabe dieses Systemmodells ist die Zuordnung der Anforderungen zu den Systemelementen beim Entwurfsprozess [FMS08, S. 16f.]. Als Sprache für

die Verbesserung der Prozesse und der Kommunikation in interdisziplinären Entwicklungsteams wird versucht, die Systems Modeling Language (SysML) einzuführen. Die SysML ist die Weiterentwicklung und Anpassung der Standardsprache in der Softwareentwicklung Unified Modeling Language (UML), um eine fachdisziplinenübergreifende Modellierung jedes Systems zu ermöglichen [Wei06, S. 21]. Der MBSE-Ansatz folgt dem Trend weg von dem dokumentenzentrierten Ansatz, wie er bisher beschrieben wurde. Hier waren die Entwicklungsdokumente die Informationsspeicher, mit denen der Fortschritt festgehalten wurde. Dies soll nun durch das beschriebene Systemmodell abgelöst werden [INC07, S. 15].

**Bewertung:** Das MBSE stellt ein interdisziplinäres Rahmenwerk bereit, das den Produktentstehungsprozess mit Prozessen, Methoden und Best Practices unterstützt. Die Bedürfnisse der Stakeholder stehen dabei im Mittelpunkt. Durch ein kohärentes Systemmodell und eine gemeinsame Sprache (SysML) ist eine fachdisziplinenübergreifende Kommunikation möglich. Das MBSE fokussiert auf den Produktentstehungsprozess und deckt die Inbetriebnahme nicht mit ab.

### 3.1.3 Entwurfstechnik intelligente Mechatronik (ENTIME)

Im Projekt *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* (ENTIME) ist ein Entwurfsinstrumentarium entwickelt worden, das auf Basis von semantischen Technologien die Lücke zwischen der funktionsorientierten Sicht der Entwickler und der bauteil- und komponentenorientierten Sicht der Anbieter von Lösungselementen schließt. Dazu sind Methoden entwickelt worden, mit denen die Lösungselemente so aufbereitet werden können, dass sie in unterschiedlichen Konkretisierungsstufen im Entwurf verwendet werden können. Dies geschieht durch adäquate Repräsentationsformen. Diese Repräsentationen umfassen Modelle mit unterschiedlicher Modellierungstiefe für die Aspekte Verhalten und Gestalt. Des Weiteren sind Schnittstellen definiert worden, mit der die Zwischenergebnisse der einzelnen Disziplinen fehlerfrei übernommen werden können [GSA+11, S. 3f.].

Das entwickelte Vorgehensmodell zum Entwurf mechatronischer Systeme gliedert sich in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] in die Phasen *fachgebietsübergreifende Konzipierung* und *fachspezifische Konkretisierung* (vgl. Bild 3-3). Es handelt sich dabei um einen funktionsorientierten Entwurf nach der klassischen Konstruktionslehre<sup>14</sup>. In beiden Phasen werden die Prozessschritte *Zielbestimmung*, *Synthese* und *Analyse* durchlaufen. Das Ergebnis der Konzipierung ist die Prinziplösung. Sie ist Ausgangspunkt für die Konkretisierung.

---

<sup>14</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2221 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* [VDI2221] und Konstruktionsmethodik nach PAHL/BEITZ [PBF+07].

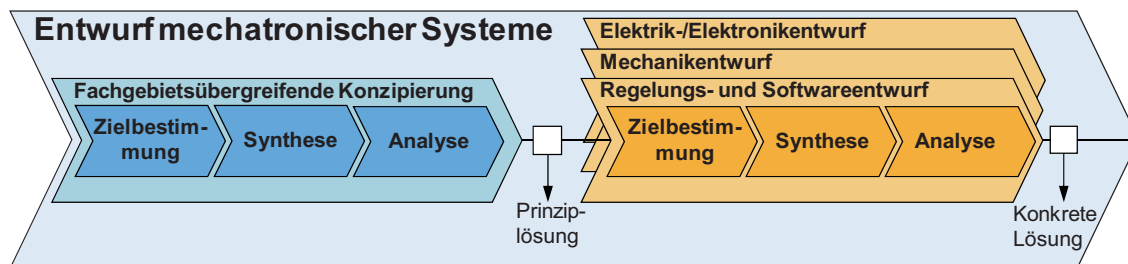


Bild 3-3: Vorgehensmodell zum Entwurf mechatronischer Systeme [GSA+11, S. 4]

In der fachgebietsübergreifenden Konzipierung erfolgt zunächst die Zielbestimmung, in der die Aufgabenstellung abstrahiert und der Kern der Entwicklungsaufgabe identifiziert wird. In der Zielbestimmung wird die Aufgabenstellung detailliert. Es folgen die Umfeldanalyse zur Bestimmung der Randbedingungen und Einflüsse auf das System und die Erstellung der Anwendungsszenarien und der Anforderungsliste. Aus diesen Informationen wird im nächsten Schritt die Funktionshierarchie erstellt. In ihr sind die erforderlichen Funktionalitäten des Gesamtsystems abgelegt [GSA+11, S. 4f.].

Im Anschluss findet die Synthese statt, in der zunächst nach Lösungsmustern gesucht wird. Lösungsmuster beschreiben ein wiederkehrendes Problem in einem speziellen Kontext und den Kern zur Lösung des Problems [AIS77]. Das Lösungsmuster ist eine abstrakte Darstellung einer Klasse von Lösungselementen. Im Anschluss an die Auswahl und Kombination von Lösungsmustern werden die Wirkstruktur, das Systemverhalten und die Grobgestalt erstellt. In der Regel erfolgt im nächsten Schritt eine Dekomposition und Verfeinerung der Module. Im letzten Schritt der Synthese werden die Module zu einem Gesamtsystem integriert [GSA+11, S. 5f.].

Den Abschluss der Konzipierung bildet die Analyse der zuvor synthetisierten Lösung. Diese wird hinsichtlich unterschiedlicher Gesichtspunkte analysiert, u. a. Zuverlässigkeit und zu erwartende Herstellkosten. Werden die in der Zielbestimmung definierten Anforderungen und Funktionen erfüllt, ist die Konzipierung abgeschlossen. Zur fachdisziplinenübergreifenden Konzipierung wird die Spezifikationstechnik CONSENS verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.3) [GSA+11, S. 6].

Der Ausgangspunkt für die fachdisziplinspezifische Konkretisierung ist die Prinziplösung. Im ersten Schritt werden die Partialmodelle in fachdisziplinspezifische Modelle transformiert. Anschließend erfolgt die parallele Entwicklung der Module in den jeweiligen Fachdisziplinen. Dabei kommen fachspezifische Vorgehensweisen und Werkzeuge zum Einsatz [GSA+11, S. 8].

Sowohl bei der Konzipierung als auch der Konkretisierung spielen Lösungselemente und -muster eine entscheidende Rolle. Die Methodik aus dem Projekt ENTIME enthält ein Vorgehen, mit der das Lösungswissen systematisiert wird. Das Vorgehen ermöglicht eine Beschreibung des Lösungswissens, um in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung eingesetzt zu werden. Dies setzt zum einen eine Konkretisierung im funktionsorientierten Entwurf und zum anderen eine Abstrahierung bestehender Lösungselemente



voraus. Die Entwurfstechnik enthält einen semantischen Ansatz, mit dem das Lösungswissen dem Entwickler zur Verfügung gestellt wird [GSA+11, S. 9ff.].

**Bewertung:** Die *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* liefert ein Instrumentarium zur interdisziplinären Entwicklung mechatronischer Systeme. Zentrales Element ist die Bereitstellung von Lösungswissen durch semantische Technologien. Zur Systembeschreibung wird die Spezifikationstechnik CONSENS genutzt. Das Vorgehen orientiert sich an der VDI-Richtlinie 2206. Die fachgebietsübergreifende Konzipierung steht im Fokus der Methodik. Die Montage und Inbetriebnahme werden nicht betrachtet.

### 3.1.4 Integriertes Prozessmodell zur Planung und Entwicklung nach MAUDERER

Ziel des integrierten Prozessmodells von MAUDERER ist es, die Planung und Entwicklung von Produktionssystemen durch ein integriertes Anlagenmodell zu unterstützen. Die Datenmodelle für die Anlage sollen nicht gesondert in den einzelnen Phasen der Planung und Entwicklung erarbeitet werden, sondern sind zentraler Aspekt des Vorgehensmodells. Durch eine prozessbegleitende Modellierung soll der Aufwand geringer gehalten werden. Das Vorgehen beinhaltet die an dem Planungs- und Entwicklungsprozess beteiligten Personen sowie ihre Sicht auf das Anlagenmodell. Die Sicht beschreibt den Blick der Personen auf das gemeinsame Modell. Die zeitlichen und logischen Zusammenhänge der Sicht werden in einem Prozessmodell beschrieben. Schwerpunkte des integrierten Anlagenmodells sind die Aufnahme und Abbildung der Kundenanforderungen sowie die Schnittstelle zwischen der Planungs- und Entwicklungsphase [Mau10, S. 4-40ff.].

Die zentralen Personen beim Entwicklungsprozess sind der Kunde, der Anlagendesigner sowie die Mechanik-, Elektrik- und Softwareentwickler. Kunde und Anlagendesigner erarbeiten in der Planungsphase ein funktionales Anforderungsprofil der Anlage. Die Entwickler konkretisieren das Gesamtkonzept und detaillieren anschließend innerhalb der Teilsysteme. Es wird zwischen maschinenferner und maschinennahe Softwareentwicklung unterschieden. Unter maschinenferner Softwareentwicklung werden Tätigkeiten verstanden, die unabhängig von dem mechanischen und elektrischen Aufbau der Anlage sind, z. B. Kommunikation mit MES-Systemen. Die maschinennahe Softwareentwicklung beinhaltet alle zeit- oder sicherheitsrelevanten Applikationen, z. B. die Ablaufsteuerung und Überwachungsfunktionen der Anlagenkomponenten [Mau10, S. 4-42ff.].

Das Prozessmodell gliedert sich in die Phasen *Planung*, *Gesamtkonzeptentwicklung* und *Teilsystementwicklung* (vgl. Bild 3-4). Die einzelnen Phasen sind in weitere Prozessschritte unterteilt und diesen jeweils Verantwortlichkeiten zugeordnet. Auch werden Spezifikationen genannt, die zu verwenden sind [Mau10, S. 4-46ff.].

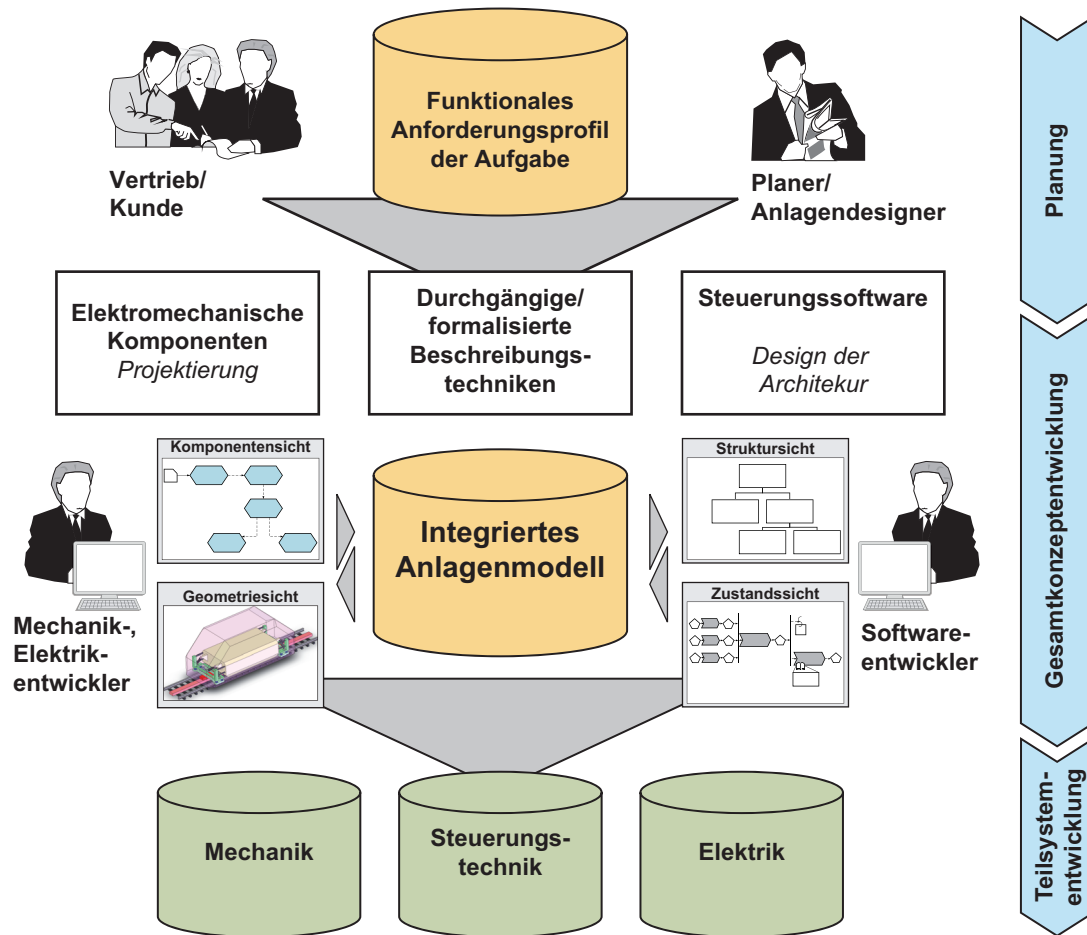


Bild 3-4: Integriertes Prozessmodell zur Planung und Entwicklung von Anlagen nach [Mau10, S. 7-101]

Das Vorgehen von MAUDERER umfasst auch ein Informationsmodell, das die integrierte Planung und Entwicklung unterstützt [Mau10, S. 5-74ff.].

**Bewertung:** Das integrierte Prozessmodell von MAUDERER ist ein modellzentrierter Ansatz zur fachdisziplinenübergreifenden Planung und Entwicklung von Anlagen. Es liefert ein Vorgehensmodell, in dem die zu durchlaufenden Phasen und die beteiligten Fachleute enthalten sind. Das Vorgehensmodell betrachtet jedoch nicht die späteren Phasen im Anlagenentstehungsprozess. Die Modularisierung von Anlagen wird nicht behandelt.

### 3.1.5 Allgemeine Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung

Die Produktionsplanung ist eng mit der Produktentwicklung verknüpft, deren Ergebnisse die Voraussetzung für die Produktion sind. Auf Basis der Produkteigenschaften sind geeignete Produktionssysteme festzulegen. Alternativ zur Produktionsplanung wird der Begriff Fertigungsvorbereitung<sup>15</sup> verwendet, die sich in Arbeitsplanung und -steuerung unterteilt, die Arbeitsplanung wiederum in die Arbeitsablauf- und Arbeitssystemplanung [REF91, S. 63]. In der Arbeitsablaufplanung werden die Reihenfolge der Prozesse und die zugehörigen Ressourcen definiert. Teil der Arbeitssystemplanung ist die Planung des Produktionsmitteleinsatzes, der Produktionsmitteleinsatzinvestition, des Personals, des Lagers und des Transportes [SET+99, S. 10-36ff.]. In der Arbeitsplanung sind die in Tabelle 3-1 beschriebenen Aufgaben zu erfüllen [Eve97, S. 5ff.].

Tabelle 3-1: Aufgaben der Arbeitsplanung nach [Eve97, S. 5ff.]

kurzfristige Planungsaufgaben	mittelfristige Planungsaufgaben	langfristige Planungsaufgaben
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Stücklistenverarbeitung:</b> Erstellung von Montage- und Fertigungsstücklisten, ...</li> <li>● <b>Arbeitsplanerstellung:</b> Arbeitsvorgangsfolgeermittlung, Vorgabezeitbestimmung, ...</li> <li>● <b>NC-Programmierung:</b> Erstellen der Teilprogramme, ...</li> <li>● <b>Sonderfertigungshilfsmittelplanung:</b> Entwicklung, Konstruktion von Sonderfertigungsmitteln, ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Planungsvorbereitung:</b> Konstruktionsberatung, Suche von Planungsunterlagen, ...</li> <li>● <b>Kostenplanung:</b> Vorkalkulation, Wirtschaftlichkeitsrechnung, ...</li> <li>● <b>Qualitätssicherung:</b> Prüfplanung, Qualitätsplanung, ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Materialplanung:</b> Lagersortenplanung, Lagerortplanung, ...</li> <li>● <b>Investitionsplanung:</b> Planung von Fertigungsmitteln, Anlagen, ...</li> <li>● <b>Methoden-/Verfahrenplanung:</b> Entwickeln von Fertigungsmethoden, Planungsmethoden, ...</li> </ul>

Um die beschriebenen Aufgaben durchzuführen, sind zahlreiche Vorgehensmodelle für die Produktionssystemplanung entwickelt worden. Diese sind sich inhaltlich sehr ähnlich und umfassen die vier Teilaufgaben *Analyse von Produkt und Randbedingungen*, *Grob- und Feinplanung des Montageablaufs*, *Auswahl und Detaillierung von Betriebsmitteln* und eine begleitende *Lösungsbewertung und Auswahl*. Exemplarisch sind hier die Modelle nach BULLINGER [Bul86], SCHUSTER [Sch92], LOTTER [Lot92] und KORNOLD/REGER [KR03] zu nennen. Neben diesen enthalten auch Vorgehensmodelle für die

<sup>15</sup> Vgl. Abschnitt 2.4

Fabrikplanung Teile für die Produktionssystemplanung, u. a. nach KETTNER ET AL. [KSG84] und AGGTELEKY [Agg87], [Agg90a], [Agg90b].

Eine ganzheitliche Systematik zur Planung und Einführung von Produktionssystemen wird in [REF90, S. 88ff.] beschrieben. Die Systematik gliedert sich in ein sechsstufiges Vorgehen (vgl. Bild 3-5) und kann durch Rechnersysteme unterstützt werden.

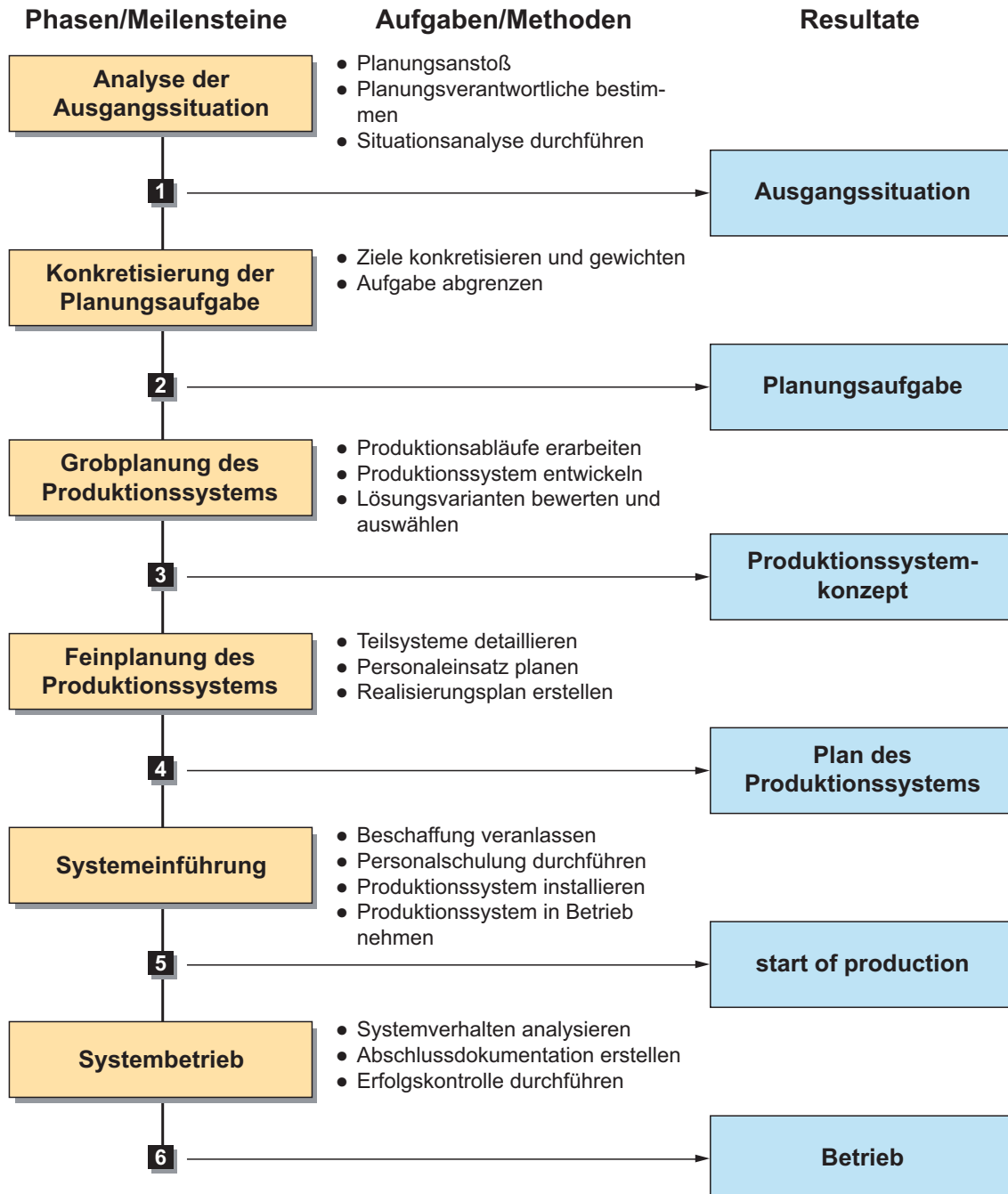


Bild 3-5: Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme nach [REF90, S. 89]

**Bewertung:** Die beschriebenen Vorgehensmodelle haben ein mehrstufiges Vorgehen gemeinsam. Sie umfassen nur die späteren Phasen im Anlagenentstehungsprozess, die Anlagenkonzipierung wird nicht mit betrachtet. Keine der beschriebenen Methoden stellt ein fachdisziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel bereit. Der Einsatz der VIBN erfolgt, wenn überhaupt, sehr spät im Prozess.

### 3.1.6 Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik

Die im Folgenden beschriebenen Vorgehensmodelle zur Automatisierungstechnik fokussieren auf verfahrenstechnische Anlagen. Von der Interessensgemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie NAMUR ist ein Vorgehensmodell für das Engineering von Prozessleittechnik herausgegeben worden. Dieses umfasst die Phasen *Grundlagenermittlung*, *Vorplanung*, *Basisplanung*, *Ausführungsplanung*, *Errichtung*, *Inbetriebsetzung* und *Projektabschluss* [NA35]. In der *Grundlagenermittlung* werden die Projektziele festgelegt und es wird eine erste Abschätzung der Grobkosten vorgenommen. Die *Vorplanung* umfasst die Festlegung des Anlagenkonzeptes und einer detaillierteren Kostenabschätzung mit dem Ziel einer genehmigungsfähigen Anlagenkonzeption. Es folgt die *Basisplanung*, in der die Funktionen der Prozessleittechnik festgelegt werden. Darüber hinaus ist die technische Realisierung festzulegen und die Kosten müssen kalkuliert werden. Dem schließt sich die *Ausführungsplanung* an, in der die Geräte und zentralen Einrichtungen festgelegt und das Leitsystem spezifiziert werden müssen. Stellenpläne, Stellenfunktionspläne und Montageunterlagen sind zu erstellen. Am Ende der Phase ist die Planung der Anlage abgeschlossen. Die nächste Phase besteht in der *Errichtung* der Anlage. Dazu ist die Bestellung zu veranlassen, die Software muss konfiguriert werden und die Montage ist zu überwachen. Nach der Funktionsprüfung folgt die Phase der *Inbetriebsetzung*, in der Personal ausgebildet und die Dokumentation erstellt wird. Am Ende erfolgt der *Projektabschluss* mit der Erstellung des Abschlussberichtes und der Projektabrechnung. Das Vorgehensmodell der NAMUR ist streng sequentiell. Allerdings hat sich in der Praxis eine überwiegend parallele Vorgehensweise etabliert, die ein konsequentes Projektmanagement voraussetzt [Phi04, S. 219].

Neben den NAMUR-Phasen gibt es noch weitere Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik. Dies sind zum einen das Prozess-Industrie-STEP [Vog03, S. 36], das V-Modell XT [BSI12-ol] sowie das Tätigkeitsmodell nach LAUBER UND GÖHNER [LG99, S. 34]. Eine Gegenüberstellung der Vorgehensweisen nach [Vog09a, S. 49ff.] ist in Bild 3-6 dargestellt.

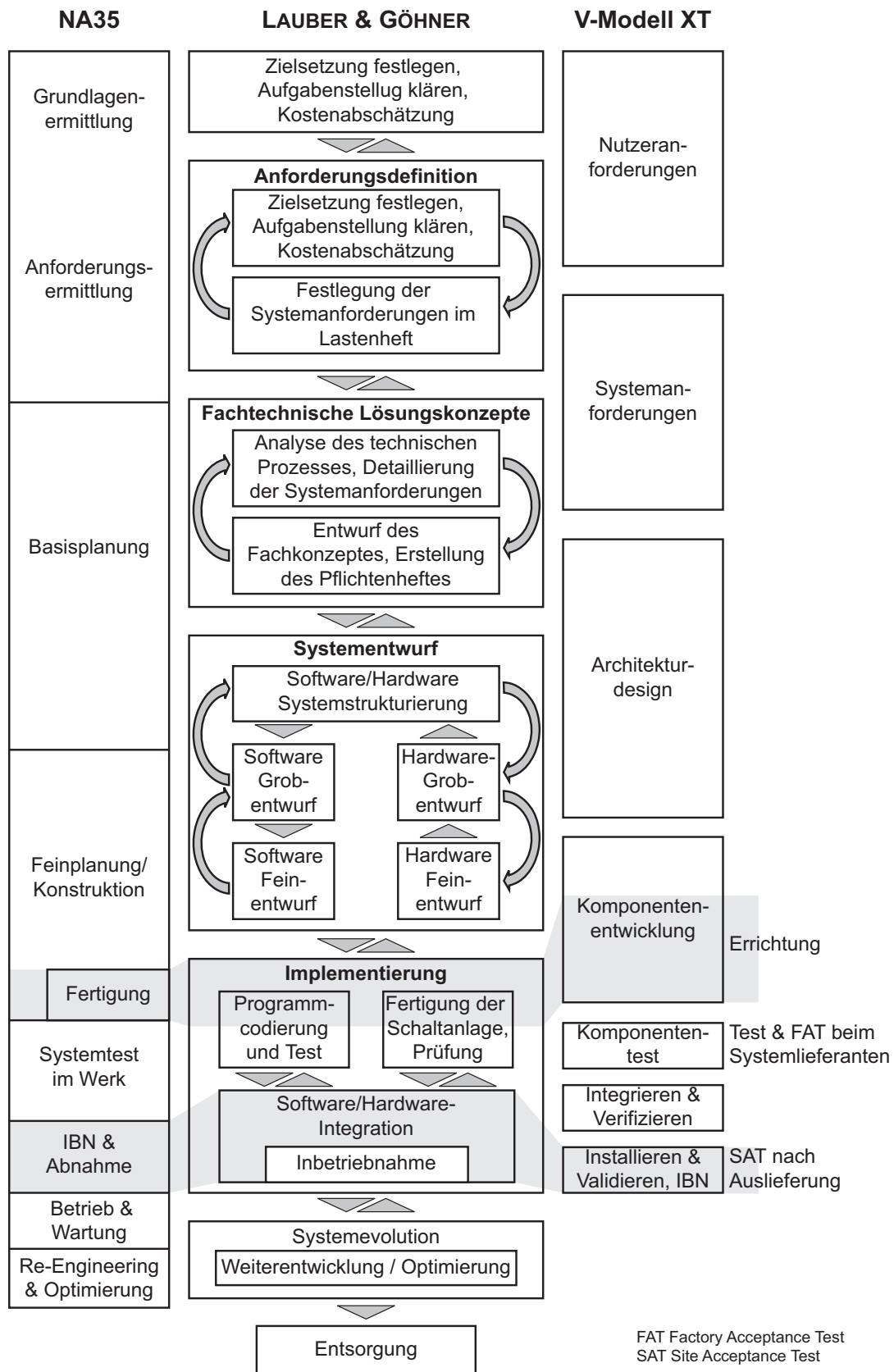


Bild 3-6: Gegenüberstellung von Vorgehensmodellen der Automatisierungstechnik [Vog09b, S. 49ff.], [Bar11, S. 16f.]

Im linken Teil ist das um die IBN detaillierte NA35-Modell nach VOGEL-HEUSER [Vog09b] abgebildet, in der Mitte das Vorgehen von LAUBER UND GÖHNER [LG99, S. 34]. Es umfasst die vier Hauptphasen *Anforderungsfestlegung*, *fachtechnisches Lösungskonzept*, *Software/Hardware-Systementwurf* und die *Implementierung*. Im rechten Teil befindet sich die für die Gegenüberstellung angepasste Darstellung des V-Modells XT [BSI12-ol]. In allen Vorgehensmodellen vollzieht sich die Herstellung und Inbetriebnahme der Anlage in ähnlichen Phasen: zunächst die *Errichtung*, gefolgt von einem *FAT* (factory acceptance test) beim Hersteller der Komponenten, daraufhin die *Integration* und abschließend der *SIT* (site acceptance test) der gesamten Anlage.

**Bewertung:** Die Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik sind in der industriellen Praxis etabliert. Insbesondere das Vorgehensmodell der NAMUR findet in der Verfahrenstechnik breite Anwendung. Sie betrachten den gesamten Anlagenentstehungsprozess. Ein fachdisziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel oder Ansätze zur Modularisierung werden nicht geliefert. Es findet auch eine klassische Inbetriebnahme statt und keine VIBN.

## 3.2 Inbetriebnahme

Im folgenden Abschnitt werden Methoden zur Unterstützung der Inbetriebnahme von maschinenbaulichen Anlagen erläutert. Die Inbetriebnahme ist eine wichtige Phase in der Anlagenherstellung, die einer Unterstützung bedarf. Zunächst werden methodische Ansätze für die Inbetriebnahme beschrieben, im Anschluss daran spezielle Ansätze zur VIBN. Der Abschnitt schließt mit softwaretechnischen Lösungen zur VIBN.

### 3.2.1 Methodische Ansätze

Die Inbetriebnahme ist ein wichtiger Teil der Anlagenherstellung, jedoch gibt es kaum Quellen, die sich explizit mit der späteren Phase in der Anlagenherstellung beschäftigen [Zeu98, S. 46]. Im Folgenden werden nun die wichtigsten Ansätze kurz erläutert und eine abschließende Bewertung der bestehenden methodischen Ansätze geliefert. Eine Aufschlüsselung in einzelne Bereiche wird nicht vorgenommen, da sich diese Arbeit vornehmlich mit der VIBN beschäftigt, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

In einer Untersuchung von WOMACK, JONES und ROSS [WJR94] wird das Vorgehen in der Anlaufphase im Automobilbau in den USA, Europa und Japan verglichen. Die erfolgreichste Strategie mit dem kürzesten Zeitraum bis zum Erreichen der geforderten Produktqualität und Anlageneffizienz wird in Japan verwendet. Dabei werden Probleme und Störungen sofort und endgültig behoben. Es wird keine Rücksicht auf die Reduktion der Produktionsleistung genommen.

Ein Ansatz zur Beherrschung der technologischen Probleme wurde von STRAUSS geliefert [Str86]. Das von ihm entwickelte Verfahren hat das Ziel, NC-Linearachsen bei der

IBN schnell einzustellen und zu parametrisieren. Dazu werden Kennwerte über das dynamische Verhalten der Achsen, der Gütekriterien der Regelkreise sowie der Beurteilung des Bahnverhaltens gebildet. Die Beurteilung der Kennwerte wird unterstützt durch eine automatisierte Fehlerdiagnose der Signale der Maschinensteuerung. Fehler werden mittels Mustererkennung identifiziert. Das Verfahren berücksichtigt hauptsächlich technische Probleme, organisatorische Aspekte werden nicht betrachtet. In eine ähnliche Richtung geht der Ansatz von KELLER, bei dem ein wissensbasiertes System bei der Prozessregelung unterstützt [Kel94, S. 47ff.]. Das System unterstützt bei der Wahl von Parametervariationen durch einen Vergleich der aktuellen Messwerte mit Expertenwissen über Reglertypen.

Die Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen wurde von SOSSENHEIMER [Sos89] und EVERSHEIM [Eve90] untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Anforderungen der IBN in Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen nicht berücksichtigt wurden. Der von SOSSENHEIMER entwickelte Ansatz geht davon aus, dass die Montage und Inbetriebnahme als Fertigungsprozesse betrachtet werden sollen und mit den dafür entwickelten Werkzeugen zu planen und zu steuern sind. Er beschreibt einen Ansatz, bei dem das Erfahrungswissen bei konkreten Tätigkeiten der IBN gespeichert und bei ähnlichen Maschinen wieder abgerufen wird. Die Wissens-elemente werden dabei den Funktionseinheiten der Maschine zugeordnet, so dass sie bei der nächsten Maschine wieder abgerufen werden können [Sos89, S. 62ff.].

WEBER gibt in seinem Buch *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen* [Web06] Handlungsempfehlungen für die Inbetriebnahme. Zunächst werden typische Anforderungen und Probleme bei der IBN herausgearbeitet, zu denen im Folgenden Hinweise, Empfehlungen und Methodenvorschläge geliefert werden. Dabei werden konkrete Auflistungen einzelner Vorgehensschritte zur Inbetriebnahme vorgenommen. Es handelt sich um ein praxisorientiertes Werk. Grundsätzliche methodische Ansätze werden nicht genannt.

Neben den Ansätzen, die auf die reine IBN fokussieren, gibt es auch noch solche Ansätze, die bei dem Produktionsanlauf unterstützen. Der Produktionsanlauf geht über die IBN hinaus und beinhaltet auch die Hochlaufphase bis zum Erreichen der gewünschten Produktivität der Anlage. Bei der Anlaufunterstützung hat sich herausgestellt, dass eine frühzeitige Einbeziehung interdisziplinärer Teams und die Bereitstellung von unternehmensinternem Wissen einen Wettbewerbsvorteil darstellt. Aus diesem Grund ist die Nutzung von Wissen und Erfahrung ein Potential zur Optimierung der Anlaufphase [Lan04, S. 42ff.].

Der Ansatz von BUNGARD lehnt sich an das Prinzip des *Simultaneous Engineering* an und stellt das Innovationsmanagement in das Zentrum. Kern des Innovationsmanagements sind die kundenorientierte Ausrichtung, die Einbeziehung der Zulieferer, die Mitarbeiterintegration sowie die Dokumentation des Wissens und der übergreifende Wissenstransfer. BUNGARD betont, dass neue Managementmethoden eingeführt werden



müssen, bei denen eine Parallelisierung der Prozesse stattfindet. Damit müssen die alten am Taylorismus orientierten Organisationsstrukturen ersetzt werden. Ziel ist eine Verkürzung der Kommunikationswege, eine Vermeidung von Fehlern, zeitliche Einsparungen und eine generelle Optimierung des Produktionsanlaufes [HB96, S. 1085ff.].

Das Ziel des Ansatzes von ZEUGTRÄGER besteht in der Vermeidung von Verschwendung. Unter Verschwendung werden technische und organisatorische Probleme sowie Fehler und Schwächen verstanden, die durch Projektmanagement und ausreichenden Ergebnistransfer vermieden werden könnten. Sein Ansatz basiert auf einem Informationsmodell, in dem die Ereignisinformationen abgebildet werden. Dies ermöglicht die Umsetzung einer lernenden Organisation, was nach ZEUGTRÄGER wesentlich für den Erfolg ist. Darüber hinaus ermöglicht das Wissensmanagementsystem das selektive Bereitstellen der Informationen für die beteiligten Personen. Mit dem Informationsmodell ist durch ein Kennzahlensystem auch die Bewertung des Projektes möglich [Zeu98, S. 55ff.].

**Bewertung:** Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Inbetriebnahme von maschinenbaulichen Anlagen. Alle Ansätze nutzen das Wissen aus vorangegangenen Inbetriebnahmen, um diese schneller durchzuführen. Die Ansätze von STRAUSS und WEBER fokussieren auf die Inbetriebnahme. Bei BUNGARD und ZEUGTRÄGER wird der gesamte Anlagenentstehungsprozess berücksichtigt. Der Ansatz von SOSSENHEIMER enthält auch eine Methode zur Modularisierung von maschinenbaulichen Anlagen unter dem Aspekt der Inbetriebnahme. Ein disziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel enthält keiner der beschriebenen Ansätze.

### 3.2.2 Virtuelle Inbetriebnahme

Der Test von Steuerungen vor der Inbetriebnahme wird schon seit der Einführung von speicherprogrammierbaren Steuerungen vorgenommen. Unter der VIBN wird die Validierung der Steuerungslogik an einem Modell einer maschinenbaulichen Anlage verstanden (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Der Ablauf der VIBN gliedert sich in die drei Phasen *Modellierung*, *Durchführung* und *Auswertung* (vgl. Bild 2-12) [BKH+09, S. 388ff.]. In der *Modellierung* erfolgt die Generierung des mechatronischen Anlagenmodells. Dazu werden zunächst die notwendigen Informationen beschafft, z. B. Spezifikationen der Produktionsanlage und Komponenten [Spi09, S. 12ff.]. Auf dieser Basis wird anschließend das Verhaltensmodell erstellt, das das logische und zeitliche Verhalten der realen Anlage beinhaltet. Bei dem Verhaltensmodell ist das Signalabbild für die Simulation entscheidend, in dem das systeminhärente logische Zusammenspiel der Komponenten beschrieben wird. KUFNER ET AL. haben fünf Modellierungstiefen beschrieben, in denen ein technisches System abgebildet werden kann (vgl. Tabelle 3-2) [KHK10, S. 116].

Tabelle 3-2: Fünf Modellierungstiefen eines technischen Systems [KHK10, S. 119]

Modellierungstiefe	Beschreibung	Beispiel (pneumatischer Zylinder)
1	Logisches Abbild (kommunikationsfähig)	Logische Modellierung: Wenn Eingangssignal, dann Ausgangssignal.
2	Logisches Abbild mit Zeitverhalten	Logische Modellierung: Wenn Eingangssignal, dann zeitverzögertes Ausgangssignal. Die Zeitverzögerung ist immer Identisch.
3	Physikalisches Prinzipabbild (fachdisziplinenübergreifend)	Modellierung von Ventil und Zylinder als Blockschaltbild. Berücksichtigung von Schaltverzögerungen sowie Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Volumenstrom und Zylinderdurchmesser.
4	Physikalisches Konstruktionsabbild (fachdisziplinen-spezifisch)	Modellierungstiefe 3 ergänzt um spezielle Eigenschaften, z. B. das Material oder Reibungseffekte.
5	Physikalisches Zustandsabbild mit Fehlermodellierung	Modellierungstiefe 4 ergänzt um Fehler, z. B. Ausfall eines Näherungssensors.

In der **ersten** Modellierungstiefe wird das technische System über ein Abbild der Ein- und Ausgänge beschrieben. Diese sind so miteinander verbunden, dass die logischen Zusammenhänge der Maschine abgebildet werden. Am Beispiel eines pneumatischen Zylinders würde eine Modellierung auf dieser Modellierungstiefe bedeuten, dass bei anliegendem Eingangssignal ein Ausgangssignal ausgegeben wird. Darauf aufbauend wird in der **zweiten** Modellierungstiefe die Aktionszeit der Komponenten mit modelliert. So schalten Ausgänge erst nach einer bestimmten Verzögerungszeit. Das logische Modell des Zylinders würde um ein Verzögerungsglied erweitert werden. Die Verzögerungszeit ist von den eingesetzten Komponenten und der Umgebung abhängig, sie ist jedoch nicht veränderlich. In der **dritten** Modellierungstiefe werden in dem Modell physikalische Wirkungen mit abgebildet. Es erfolgt die Darstellung der elementaren mechanischen, elektrischen und hydraulischen Wirkketten der Maschine. Dies kann in Anlehnung an Wirkstrukturskizzen [VDI2222-1] geschehen. Die Modellierung erfolgt dabei noch fachdisziplinenübergreifend. Das kann z. B. in Form eines Blockschaltbildes geschehen. Bei dem Zylinder würde das Ventil auch mit berücksichtigt werden. Es werden die Schaltzeiten des Ventils und die Reaktionszeit des Zylinders, in Abhängigkeit von Volumenstrom und Zylinderdurchmesser, mit modelliert. In der **vierten** Ebene wird das fachdisziplinen-spezifische Wissen ergänzt. Die physikalischen Effekte werden ergänzt. Im Beispiel des pneumatischen Zylinders würden z. B. Haftgleit-effekte mit modelliert. Störgrößen und Fehler aus dem Fertigungsprozess werden in der **fünften** Modellierungstiefe mit abgebildet. Das kann z. B. der Ausfall eines Endlagensensors im Zylinder sein. Es erfolgt die Modellierung des Zustands der Maschine zum aktuellen Zeitpunkt [KHK10, S. 119f.]. Die Wahl der Modellierungstiefe ist vom Anwendungsfall abhängig.

Das Simulationsmodell für die VIBN kann neben dem Verhaltensmodell zudem aus einem erweiterten 3-D-Geometriemodell und Skripten für den Materialfluss bestehen. Im erweiterten 3-D-Geometriemodell werden neben der Geometrie z. B. auch Informationen über die Verfahrsachsen und -bewegungen abgelegt. Neben einem erweiterten Geometriemodell kann auch ein Kinematikmodell zur Anwendung kommen. Sind die einzelnen Teile des Simulationsmodells erstellt, werden sie über einen Signalfluss gekoppelt und die Simulation durchgeführt [Lac12, S. 43f.].

Das Simulationsmodell der Anlage wird bei der Durchführung der VIBN mit der Steuerung gekoppelt. Die Steuerungslogik kann dabei auf dem Steuerungssystem implementiert sein oder dieses kann ebenfalls virtuell abgebildet sein. Diese Ausprägungen ermöglichen unterschiedliche Arten der VIBN (vgl. Tabelle 3-3).

*Tabelle 3-3: Arten der virtuellen Inbetriebnahme*

		Anlage	
		real	simuliert
Steuerung	real	Testbetrieb	Hardware-in-the-Loop (HiL)
	simuliert	Steuerungsentwicklung	Software-in-the-Loop (SiL)

Für den Einsatz der realen Steuerungstechnik wird in der Literatur der Begriff Hardware-in-the-Loop (HiL) verwendet. Der Ansatz stammt aus der Evaluierung von embedded systems (vgl. [RSM+99], [Spi01]) und wurde auf maschinenbauliche Anlagen übertragen. Wird sowohl die Steuerungstechnik als auch die Anlage durch ein Modell beschrieben, handelt es sich um eine Software-in-the-Loop-Simulation (SiL). In der Tabelle sind auch der Testbetrieb und die Steuerungsentwicklung mit aufgeführt. Der Testbetrieb stellt die klassische Inbetriebnahme dar. Die Steuerungsentwicklung kommt bei maschinenbaulichen Anlagen nicht zur Anwendung, da in der Regel kommerzielle Steuerungen eingesetzt werden. Neben der HiL- und SiL-Simulation gibt es auch noch die hybride Inbetriebnahme. Diese beginnt mit einer SiL- oder HiL-Simulation und geht in den Testbetrieb über. Im Folgenden werden die Arten der virtuellen Inbetriebnahme beschrieben und die Vor- und Nachteile aufgezählt.

### 3.2.2.1 Hardware-in-the-Loop-Simulation

Die Hardware-in-the-Loop-Simulation (HiL-Simulation) wird in der Praxis und Wissenschaft am häufigsten zur VIBN genutzt. Bei der HiL-Simulation wird ein reales Steuerungssystem an ein digitales Anlagenmodell gekoppelt [Osm98, S. 93ff.],

[BKC+08, S. 141ff.]. Bei der HiL werden Teile des Systems durch mathematische Modelle ersetzt. Diese sind in einem geschlossenen Regelkreis mit elektrischen und mechanischen Komponenten verbunden [VDI3633-8, S. 6]. Dabei handelt es sich bei der VIBN meistens um reale Steuerungssysteme. Bei der HiL-Simulation wird „*der Betrieb der realen Steuerung eines technischen Systems im Verbund mit einer in Echtzeit laufenden Umgebungssimulation, welche über die realen Schnittstellen an die Hardware gekoppelt ist* [BDK+05, S. 370]“ simuliert. Mit der HiL-Simulation soll das Schnittstellenverhalten der Steuerung getestet werden. Die zu testende Steuerung soll in Verbindung mit dem virtuellen Anlagenmodell das gleiche Verhalten aufweisen wie später in der realen Anlage [Dom07, S. 37]. Bei der Kopplung werden häufig Feldbussysteme verwendet. Diese kommen auch bei der realen Anlage zur Anwendung und bieten sich deshalb dafür an [SMD05, S. 13], [Xu03, S. 21].

Die HiL-Simulation findet in der industriellen Praxis bereits Anwendung. Das Vorgehen ist für spezielle Anwendungsfälle adaptiert worden. So wurden beispielsweise Systeme implementiert, mit denen die Steuerung für Kaltwalzanlagen [BKC+08, S. 141ff.] und Steuerungssysteme in der Automobilindustrie sowie Robotersysteme [BD08, S. 61ff.], [BKH+09, S. 388ff.] simuliert werden können. Erfolgt die Kopplung über den später genutzten Feldbus, kann die getestete Steuerung direkt in die reale Anlage eingebaut werden. Hierin liegt auch der große Vorteil in der HiL-Simulation. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Steuerungshardware mit getestet wird, z. B. die Busauslastung oder die minimalen Zykluszeiten. Des Weiteren können auch Systeme mit unterschiedlichen Steuerungen gemeinsam getestet werden, z. B. NC, SPS und HMIs [SMD05, S. 13].

Neben den zahlreichen Vorteilen der HiL-Simulation gibt es jedoch auch eine Reihe von Nachteilen. So sind die hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Steuerungsdatenverarbeitung und des Anlagenmodells ein wesentlicher Nachteil. Hieraus ergeben sich hohe zeitliche und monetäre Aufwände [DH07, S. 55ff.]. Durch Modularisierung und Standardisierung lassen sich diese Aufwände verringern [WBS+12, S. 1]. Eine Anpassung der Modelle ist jedoch immer noch notwendig. Auch die Schnittstelle zwischen Hardware und Modell muss bereitgestellt werden, was ein weiterer Kostentreiber ist. Auch setzt die HiL-Simulation eine reale Steuerung voraus, auf der schon die korrekte Steuerungslogik implementiert ist. Dies ist normalerweise erst später im Entwicklungsprozess gegeben. Die Eignung der Steuerungshardware wird durch eine HiL-Simulation erst spät geprüft, da meistens nur eine Steuerung zur Verfügung steht. Fehler im Steuerungskonzept führen dann zu hohen Änderungskosten [Lac12, S. 46].

### 3.2.2.2 Software-in-the-Loop-Simulation

Im Gegensatz zur HiL-Simulation wird bei der Software-in-the-Loop-Simulation (SiL-Simulation) das Steuerungssystem mit der Steuerungslogik und das Anlagenmodell in einer Simulationsumgebung ausgeführt [BDK+05, S. 277ff.]. Es wird nicht die reale

Steuerung eingesetzt, sondern eine Emulation von dieser. So kann eine hardwareunabhängige Steuerungsprojektierung erfolgen.

Das ist auch ein Vorteil der SiL-Simulation. Während der Entwicklung ist noch keine Auswahl der Steuerungshardware notwendig. Dies geschieht zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt. Das wirkt sich auch auf die Kosten der Simulationsumgebung aus, da sie nicht speziell an eine Hardware angepasst werden muss, sondern für alle Projekte allgemein bleiben kann. Auch können bei der SiL-Simulation schon frühzeitig Logiktests durchgeführt werden. Darüber hinaus können auch sehr detaillierte Anlagenmodelle mit hoher Komplexität simuliert werden, da die Berechnungen nicht in Echtzeit erfolgen müssen. Dies ermöglicht zum einen die Simulation von Vorgängen, die in der Simulation langsamer als in der Realität ablaufen, beispielsweise bei komplexen Bewegungen mit Reibung zwischen den bewegten Teilen [Her10, S. 32]. Zum anderen können auch Simulationen durchgeführt werden, bei der die virtuelle Zeit schneller abläuft als die Realzeit.

Der größte Nachteil bei der SiL-Simulation besteht in dem Verzicht auf die reale Steuerungshardware. Bei der Übertragung auf die reale Steuerung ist durch zusätzliche Tests sicherzustellen, dass dies korrekt erfolgt. Insbesondere das zeitliche Zusammenspiel der Komponenten ist zu überprüfen. Hier können Kosten durch eine fehlende automatische Codegenerierung oder evtl. notwendige Anpassungen entstehen [Lac12, S. 47].

### 3.2.2.3 Hybride Inbetriebnahme

Neben der HiL- und SiL-Simulation gibt es noch die hybride Inbetriebnahme von DOMINKA als Mischform. Bei dieser werden parallel zu realen Anlagenteilen weitere Anlagenkomponenten simuliert. Während der Inbetriebnahme werden die simulierten Anlagenkomponenten nacheinander durch die entsprechenden realen Komponenten ersetzt. Es handelt sich um ein Verfahren, bei dem schrittweise von der VIBN zur IBN vorgegangen wird [Dom07, S. 45ff.], [Lac12, S. 47].

Vorteil der hybriden Inbetriebnahme besteht in der Vermeidung von Beschädigungen an der Anlage, da die Aktoren nacheinander in Betrieb genommen werden und zunächst auf Prozessgut verzichtet wird. Auch der Ausschuss wird durch den späteren Einsatz von Prozessgut reduziert. Für die hybride Inbetriebnahme gelten die gleichen Vor- und Nachteile wie bei der VIBN. Ein zusätzlicher Nachteil ergibt sich aus dem höheren Aufwand für das Simulationsmodell, da es so aufgebaut werden muss, dass es schrittweise durch ein reales System ersetzt wird. Vorteilhaft ist, dass ggf. auf die Modellierung von einzelnen Anlagenkomponenten verzichtet werden kann und die realen Komponenten direkt eingesetzt werden können. Dies bietet sich beispielsweise bei Standardkomponenten an [Lac12, S. 47f.].

**Bewertung:** Alle Vorgehensmodelle zur VIBN weisen die drei Phasen Modellierung, Durchführung und Auswertung auf. Sie setzen erst spät im Anlagenentstehungsprozess

ein und berücksichtigen nur die VIBN. Es gibt unterschiedliche Ansätze im Hinblick darauf, was alles simuliert wird (SiL, HiL, hybride Inbetriebnahme). Diese haben spezifische Vor- und Nachteile. Die in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Probleme werden durch keines der Vorgehensmodelle gelöst. Es gibt auch kein gemeinsames Beschreibungsmittel, das die Entwickler unterstützt. KUFNER ET AL. haben eine Methode zur Auswahl der geeigneten Modellierungstiefe beschrieben. Der Ansatz von DOMINKA enthält Methoden, um die Erfahrungen vorangegangener Inbetriebnahmen zu nutzen.

### 3.2.3 Softwaretechnische Realisationen

Zur Durchführung der VIBN gibt es eine Vielzahl an softwaretechnischen Produkten, beispielsweise die kommerziellen Lösungen WinMOD von Mewes & Partner, Experior von Xcelgo A/S, ISG-virtuos von ISG, Technomatix und SIMIT von Siemens, SimulationX von ITI, Emulate3D von Emulate3D und Delmia von 3ds. Diese bieten die Möglichkeit, eine VIBN durchzuführen. Sie fokussieren dabei hauptsächlich auf die Bereitstellung von Schnittstellen zwischen der Steuerung und dem Anlagenmodell.

Die VIBN hat ihre Wurzeln in der Simulation von Werkzeugmaschinen. Dabei war es ausreichend, den Materialfluss innerhalb der Maschinen nur abstrakt zu simulieren. Diese Fähigkeiten besitzen alle am Markt verfügbaren Tools. Materialflussintensive Produktionsanlagen sind erst später in den Fokus der VIBN gekommen. Die Funktion des Materialtransportes ist hier eine Hauptfunktion und es reicht nicht mehr aus, diese abstrakt zu modellieren. Eine Validierung der Materialflusslogik muss möglich sein. So muss das Modell das Auslösen eines Sensors durch das Fördergut und die Ansteuerung eines Aktors, z. B. Förderband, unterstützen. Zur Modellierung dieses Sachverhaltes gibt es zwei Ansätze. Das Verhalten kann auf Basis eines **logischen Ersatzmodells** oder eines **Physikmodells** modelliert werden.

#### 3.2.3.1 Logisches Ersatzmodell

Bei der Modellierung des Materialflusses über logische Ersatzmodelle wird das Verhaltensmodell erweitert [BKH+09, S. 388ff.], [Dom07, S. 45ff.], [Wün08, S. 106ff.]. Es besteht aus einer Vereinfachung von Konstruktionsdaten kombiniert mit einer logischen Beschreibung des Materialflusses. Die Logik des Materialflusses wird durch zusätzliche Skripte repräsentiert.

Für die Modellierung wird zunächst die Geometrie der Anlage aufgearbeitet. Dazu wird auf das 3-D-CAD-Modell zurückgegriffen oder es wird aus Grundprimitiven neu erstellt. Im Anschluss wird die Geometrie kinematisiert, indem z. B. Achsen und Bewegungsbahnen spezifiziert werden. Die Ansteuerung der Kinematik erfolgt durch ein Verhaltensmodell [Spi09, S. 20]. Zur Verhaltensbeschreibung können z. B. hybride Automaten genutzt werden. Diese können automatisch in Verhaltensmodelle übersetzt werden [BH09, S. 273ff.], [RHL+07, S. 663ff.]. Das Verhaltensmodell kann auch durch

eine automatische Transformation von bestehenden Anlagenmodellen aufgebaut werden. In einem Ansatz von NEUGEBAUER & SCHOB [NS11, S. 539ff.] werden z. B. mechanische Konstruktionsdaten, Elektro- und Fluidpläne genutzt.

Der Vorteil von logischen Ersatzmodellen besteht in der Möglichkeit, kommerzielle Softwaretools zu nutzen. Die bestehenden Möglichkeiten zur Verhaltensmodellierung müssen lediglich um Materialflusssysteme ergänzt werden. Nachteilig ist, dass der Aufwand für die Modellerstellung sehr hoch ist. Erfolgt die Modellierung mit Grundprimitiven, ist der Aufwand hoch und muss bei jeder Veränderung wiederholt werden. Werden im Gegensatz dazu die 3-D-CAD-Modelle unverändert verwendet, ist der Simulationsaufwand sehr hoch. Werden die Modelle manuell reduziert, ist der Aufwand dafür ebenfalls hoch. Dabei stellt die Hierarchie des Szenengraphen eine weitere Schwierigkeit dar. So muss beim Erstellen der Konstruktionszeichnungen schon darauf ausgerichtet sein, dass die Szenengraphen die Kinematik der Anlage entsprechen. Bei Stau- und Rutschvorgängen ist ein hoher manueller Aufwand nötig, da das Verhalten aller Materialflusselemente durch einzelne Skripte beschrieben werden muss. Logische Ersatzmodelle sind deshalb für maschinenbauliche Anlagen mit geringem Anteil an Materialfluss, z. B. Werkzeugmaschinen, geeignet.

### 3.2.3.2 Physikmodell

Ein neuerer Ansatz bei der VIBN von materialflussintensiven Anlagen besteht in der Verwendung von Physikmodellen zur Simulation des Materialflusses. Dabei wird das Geometriemodell um physikalische Parameter angereichert, z. B. Massen und Massenschwerpunkte. Dieses wird mit der Hilfe einer Physik-Engine in Echtzeit ausgewertet und zur VIBN verwendet. Die Umsetzung wird beispielsweise von RÖCK [Röc11, S. 329ff.] für Anlagenteile gezeigt und von WISCHNEWSKI & FREUND [WF04, S. 5171ff.] am Beispiel eines Fördersystems unter Berücksichtigung von Reibung.

Ausgangspunkt bei der Erstellung der Physikmodelle ist ein CAD-Modell der Anlage. Dieses wird nach dem Export in ein polygonales Modell und anschließend durch Tessellierung in ein trianguliertes Modell überführt. Das so entstandene Modell ist zu umfangreich, um es in Echtzeit verarbeiten zu können. Der nächste Schritt besteht in der Simplifizierung des Modells und anschließend werden die physikalischen Eigenschaften angereichert. Im letzten Schritt wird das Physikmodell noch kinematisiert und man erhält das Physik- und Kinematikmodell, das im Anschluss zur Simulation in einer Physik-Engine genutzt wird [Spi09, S. 71ff.]. Das Physikmodell wird in der Simulation u. a. für die Kollisionserkennung genutzt. Dies ermöglicht die Berechnung des Verhaltens des Transportgutes.

Die Kinematik wird bei physikalischen Modellen über Gelenke und Motoren beschrieben. Gelenke schränken die sechs möglichen Freiheitsgrade von Bauteilen ein, so dass z. B. nur rotatorische oder lineare Bewegungen möglich sind. Darin liegt auch der Unterschied zur logischen Modellierung. Hier muss jede mögliche Bewegung durch ein

Skript beschrieben werden, während bei der Modellierung in einem Physikmodell die Bauteile zunächst alle Freiheitsgrade besitzen und ihre Freiheiten eingeschränkt werden. Die Physik-Engine stellt bei der Simulation die Einhaltung der Beschränkung sicher [Spi09, S. 74]. Werden den Gelenken noch Antriebseigenschaften mitgegeben, handelt es sich um Motoren. Es können zusätzlich noch Sollgeschwindigkeit oder eine Zielstellung vorgegeben werden. Auch bei den physikbasierten Modellen gibt es bereits kommerzielle Softwaretools am Markt, z. B. Demo3D von Emulate3D, Experior von Xcelgo A/S und WinMOD von Mewes & Partner. Vorteil der Physikmodelle ist die Möglichkeit, materialflussintensive Produktionsanlagen zu simulieren, insbesondere Stau- und Rutschvorgänge mit vielen Objekten. Es können auch Fehlerzustände der Anlage simuliert werden, z. B. Rückstau oder Verstopfungen durch Fördergüter. Solche Zustände müssen bei der Modellierung nicht explizit mit berücksichtigt werden, im Gegensatz dazu jedoch bei logischen Modellen. Nachteil bei den Physikmodellen ist, dass die Modellierung häufig nicht durch geeignete Editoren unterstützt wird und noch per Hand eingegeben werden muss. Die Modelle können bei einer hohen Anzahl an Kontakten sehr langsam werden und die Echtzeitfähigkeit ist dann nicht mehr gewährleistet.

**Bewertung:** Es existiert eine Vielzahl von kommerzieller und prototypischer Software für die VIBN. Es handelt sich dabei überwiegend um fachspezifische Software, die an Entwicklungsumgebungen für die Steuerungsprogrammentwicklung angepasst ist. Sie lässt sich auch nicht im gesamten Anlagenentstehungsprozess nutzen, sondern bietet nur Schnittstellen, um die Daten aus vorangegangenen Phasen zu übernehmen. Die Software ist für die klassischen Vorgehensmodelle der VIBN ausgelegt. Sie enthält Möglichkeiten, um Erfahrungswissen aus vorangegangenen Inbetriebnahmen zu nutzen.

### 3.3 Verfahren zur Produktmodularisierung

Eine durchgängige Verwendung von Modellen in der Anlagenentstehung setzt eine einheitliche Strukturierung voraus. Die Strukturierung muss fachdisziplinenübergreifend und im gesamten Entstehungsprozess, von der Konzipierung bis zur VIBN, verwendbar sein. Auch sollen bestehende Anlagen dekomponiert werden können, unabhängig davon, ob sie modular oder integral aufgebaut sind. Des Weiteren sollen die Module in Folgeprojekten weiterverwendet werden können. Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Vorgehensmodelle beinhalten zum größten Teil eine Phase, in der Module gebildet werden. Es wird dabei jedoch nicht explizit auf bestimmte Methoden zur Modularisierung verwiesen. Im Folgenden werden Ansätze und Methoden zur Produktmodularisierung beschrieben, die sich für den Einsatz in der Anlagenentstehung eignen bzw. anpassen lassen.



### 3.3.1 Modular Function Deployment

Die Methode *Modular Function Deployment* (MFD) wurde 1996 von ERIXON entwickelt und gemeinsam mit NILSON und ERICSSON weiterentwickelt [Eri96], [NE98], [EE99, S. 29ff.]. Es handelt sich um ein systematisches Vorgehen zur Entwicklung modularer Produktstrukturen. Es basiert auf zwölf identifizierten Modultreibern, die zu einer Bildung von eigenständigen Modulen führen. Die so gebildeten Module sollen eine hohe Eigenständigkeit aufweisen. Das generelle Vorgehen der Methode ist in Bild 3-7 dargestellt.

**Identifikation der Kundenanforderungen:** Im ersten Schritt werden die Kunden- und Marktanforderungen identifiziert. Hierzu kann das *Quality Function Deployment* (QFD) nach AKAO [Aka04] verwendet werden. Dabei wird die Modularität als Produkteigenschaft mit aufgenommen, um sie mit den Kundenanforderungen abzugleichen. Ergebnis der Phase sind Kunden- und Marktanforderungen an das zu entwickelnde Produkt [EE99, S. 31f.].

**Auswahl technischer Lösungen:** In der nächsten Phase werden die Anforderungen in technische Funktionen überführt. Es erfolgt eine funktionale Dekomposition der Produkteigenschaften. Die Funktionen werden so lange in Unterfunktionen zerlegt, bis mehrere alternative Komponenten zur Funktionserfüllung gefunden werden. Zur Auswahl der technischen Lösungen für das Produktkonzept wird die *Bewertungsmatrix* nach PUGH [Pug81, S. 479ff.] eingesetzt. Dabei werden die potentiellen Lösungen mit einer Referenzlösung ins Verhältnis gesetzt. Ein Expertenteam wählt eine geeignete Kombination von Lösungen für das Produktkonzept aus. Das Ergebnis sind technische Gestaltungsalternativen bestehend aus Komponenten zur Funktionserfüllung [EE99, S. 33f.].

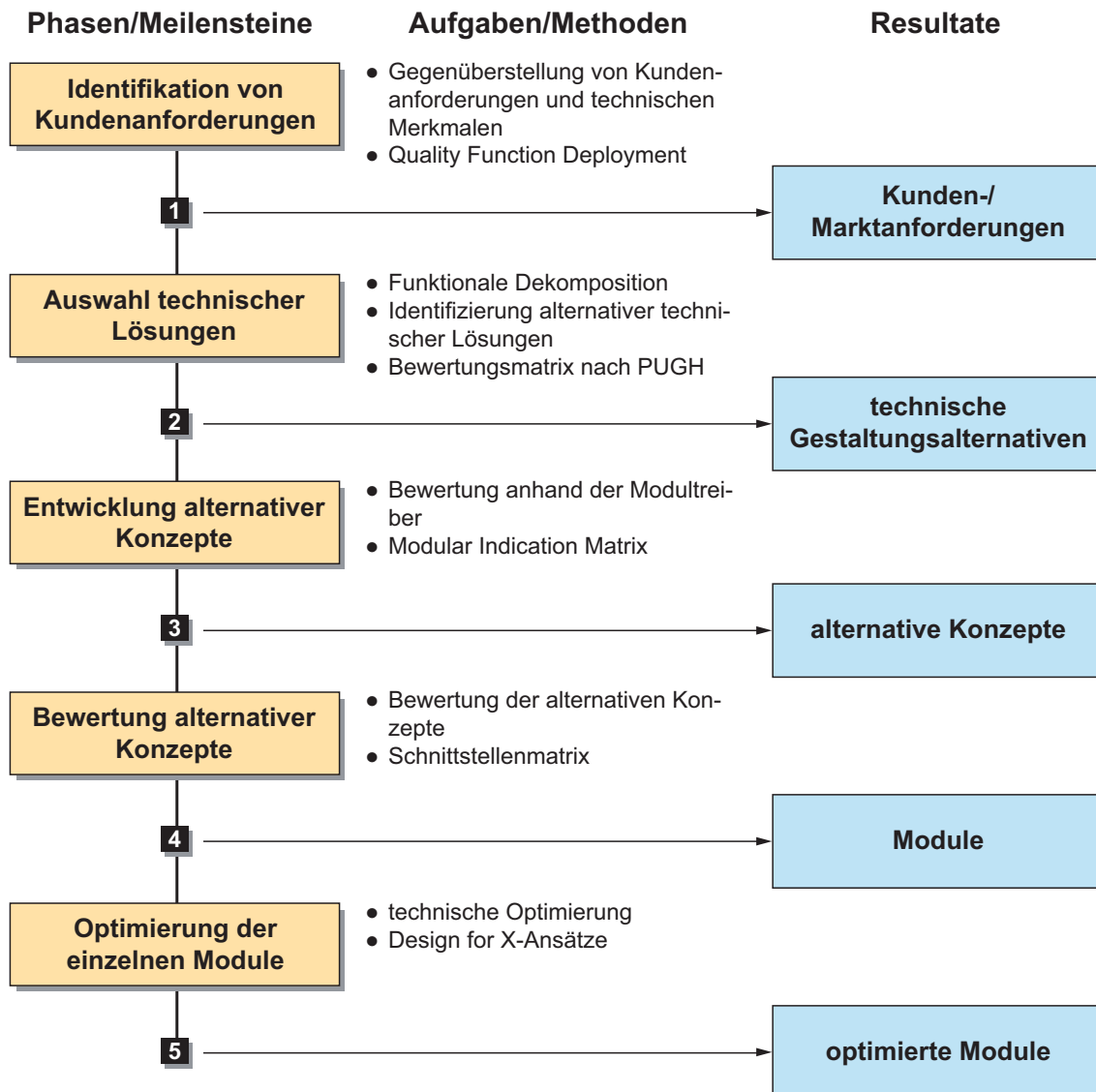


Bild 3-7: Vorgehen des Modular Function Deployment [EE99, S. 29ff.]

**Entwicklung alternativer Konzepte:** Diese Phase stellt den Kern des *Modular Function Deployment* dar. ERIXON hat zwölf Modultreiber identifiziert, die ein Grund dafür sein könnten, warum eine Komponente ein eigenes Modul bildet. Sie teilen sich entsprechend des Produktlebenszyklus in sechs Gruppen auf und sind aus Fallstudien der schwedischen Industrie erarbeitet worden (vgl. Tabelle 3-4).

Die Komponenten werden in der sog. *Modular Indication Matrix* (MIM) hinsichtlich ihrer Modultauglichkeit bewertet. In der MIM werden die Komponenten den Modultreibern gegenübergestellt und dahingehend bewertet, ob eine Komponente bezüglich des Modultreibers einen *schwachen*, *mittleren* oder *starken* Treiber darstellt. Die Bewertung erfolgt dabei mit 1 (schwach), 3 (mittel) und 9 (stark). Komponenten mit den höchsten Bewertungssummen sind geeignete Modulkandidaten. Solche Komponenten sollten ein Modul bilden bzw. als Basis für ein Modul dienen. Die restlichen Kompo-

menten werden anschließend den Modulkandidaten zugeordnet oder bilden in Gruppen eigene Module.

Tabelle 3-4: *Modultreiber [EE99, S. 21]*

	Modultreiber	Erläuterung
Produktentwicklung	Carry Over	Der Funktionsträger soll in verschiedenen Produktgenerationen eingesetzt werden
	Technology Push	Der Funktionsträger wird mit hoher Wahrscheinlichkeit im Laufe der Zeit technisch verändert werden
	Planned Design Changes	Veränderungen an dem Funktionsträger sind im Laufe der Zeit geplant
Varianten	Different Specification	Technische Varianten des Funktionsträgers sind vorgesehen
	Styling	Der Funktionsträger wird von Trends beeinflusst und wird so wahrscheinlich in Form und Farbe variieren
Produktion	Common Unit	Der Funktionsträger kann in verschiedenen Varianten oder sogar Produkten verwendet werden
	Process / Organisation	Für die Herstellung des Funktionsträgers werden spezifische Prozesse oder Organisationsformen benötigt
Qualität	Separate Testing	Eine Prüfung der Qualität ist bereits vor dem Verbau möglich
Einkauf	Black-Box-Engineering	Der Funktionsträger kann komplett von einem Zulieferer als Einheit beschafft werden
After Sales	Service / Maintenance	Der Funktionsträger kann leicht und schnell gewartet werden
	Upgrading	Der Austausch des Funktionsträgers durch eine neuere Version soll möglich sein
	Recycling	Der Funktionsträger muss gesondert entsorgt werden

Dabei werden die Module unter Berücksichtigung der Bewertung in der MIM gebildet. Aus der MIM lassen sich nur Kandidaten für ein Modul identifizieren, die Modulbil-

dung ist jedoch noch subjektiv. Die Gruppierung ist ein kreativer Prozess, der erfahrene Entwickler voraussetzt, um räumliche und technische Restriktionen zu berücksichtigen. Als optimale Anzahl von Modulen hat sich die Quadratwurzel aus der Anzahl der Montagevorgänge des gesamten Produktes herausgestellt [EE99, S. 34ff.], [Eri96].

**Bewertung alternativer Konzepte:** Die Modulkandidaten werden in dieser Phase hinsichtlich der Entwicklungszeit, -kapazitäten, -kosten, Produktionskosten, Durchlaufzeit, Qualität und Flexibilität bewertet. Besondere Berücksichtigung muss dabei die Schnittstellengestaltung finden. In einer Schnittstellenmatrix werden die Modulkandidaten und ihre Schnittstellen untereinander eingetragen. Dabei wird zwischen räumlichen und energieübertragenden Schnittstellen unterschieden (vgl. Bild 3-8). Aus der Schnittstellenmatrix wird ein bevorzugtes Montagekonzept identifiziert. Liegen die Schnittstellen hauptsächlich auf der Vertikalen, ist ein *Hamburger* Montagekonzept angebracht. Dabei werden die einzelnen Module aufeinandergestapelt. Alternativ ist ein *base-part*-Konzept angebracht, bei dem die Montage weiterer Komponenten an einem Basismodul geschieht. Die Gestaltung der Module wird dem Montagekonzept angepasst [EE99, S. 38ff.].

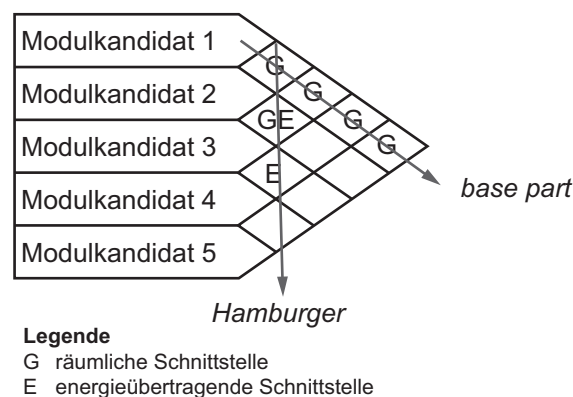


Bild 3-8: Schnittstellenmatrix [EE99, S. 39]

Ergebnis der Phase sind Module, die hinsichtlich der beschriebenen Merkmale bewertet wurden und deren Schnittstellen angepasst wurden.

**Optimierung der einzelnen Module:** Im letzten Schritt werden die Module und die enthaltenen Komponenten optimiert. Die MIM gibt dabei Hinweise darauf, welche Eigenschaften für ein Modul relevant sein könnten. Bei der Optimierung kann auf die *Design-for-X-Ansätze* von HUANG [KH96] zurückgegriffen werden.

**Bewertung:** Das *Modular Function Deployment* bezieht die Kundenanforderungen mit in die Entwicklung von modularen Produktstrukturen ein. Anhand von Modultreibern wird entschieden, ob eine Komponente ein Modul werden soll. Es ist ein systematisches Vorgehen, das für die Entwicklung neuer Produkte angewendet wird. Bestehende Anlagen lassen sich damit schlecht modularisieren. Es berücksichtigt auch nicht mechatronische Module und die VIBN.

### 3.3.2 Design Structure Matrix

Die *Design Structure Matrix* (DSM) wurde maßgeblich von STEWARD, EPPINGER und PIMMLER entwickelt [Ste81], [EWS+94, S. 1ff.], [PE94], [UE08], [Mau07, S. 53f.]. Sie wird zur Strukturierung von technischen Systemen verwendet. Ziel ist die Identifikation von Systemelementgruppen, die spezifische Beziehungsaspekte aufweisen. Die Gruppen sollen innerhalb der Gruppe viele und zu anderen Gruppen möglichst wenige Beziehungen besitzen. Das Vorgehen zur Strukturierung ist in Bild 3-9 dargestellt.

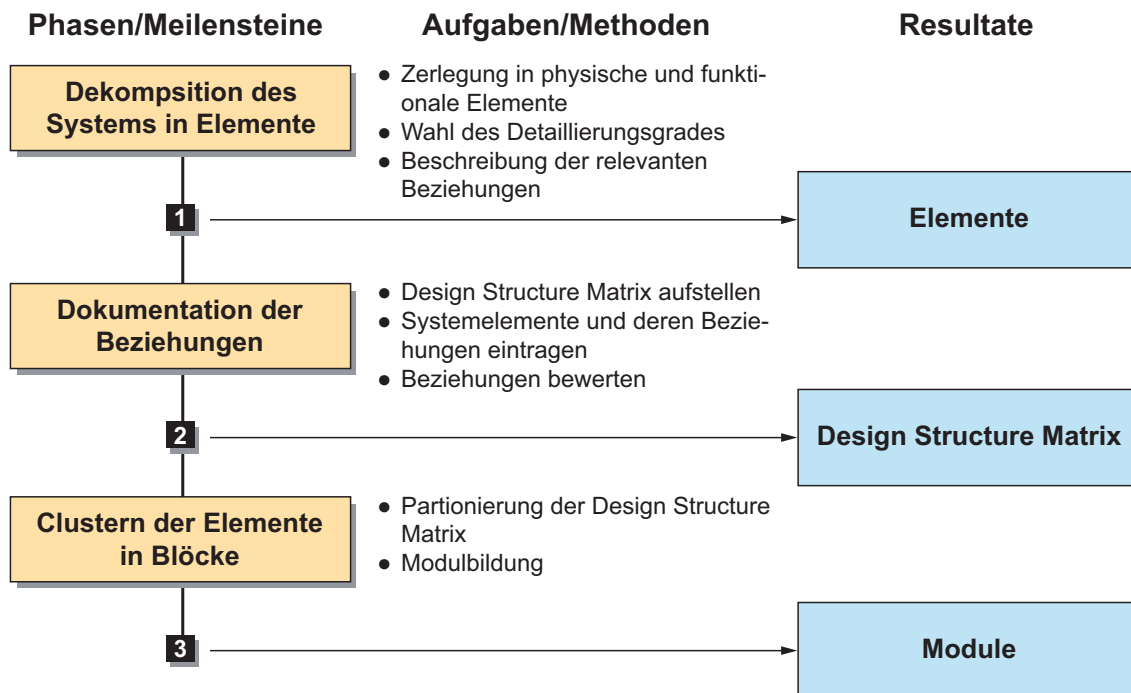


Bild 3-9: Vorgehen bei der Strukturierung mittels DSM nach [PE94, S. 3]

**Dekomposition des Systems in Elemente:** Der erste Schritt besteht in der Dekomposition des Untersuchungsgegenstands in seine Elemente. Dabei ist die Methode bei unterschiedlichen Konkretisierungsstufen anwendbar. Anschließend werden die relevanten Beziehungen zwischen den Systemelementen beschrieben. PIMMLER und EPPINGER schlagen vor, Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sowie räumliche Verbindungen als Beziehungen zu verwenden [PE94, S. 3].

**Dokumentation der Beziehungen:** Die in der vorangegangenen Phase ermittelten Systemelemente und ihre Beziehungen werden in eine Matrix übertragen, die sog. DSM. Es handelt sich um eine symmetrische Matrix, in der in den Zeilen und Spalten die Systemelemente aufgetragen werden. Die Beziehungen zwischen den Systemelementen werden bewertet und in dem Matrixfeld eingetragen. Es wird eine Skala von stark positiv (starke Verbindung notwendig) bis stark negativ (Verbindung vermeiden) verwendet (vgl. Bild 3-10 links).

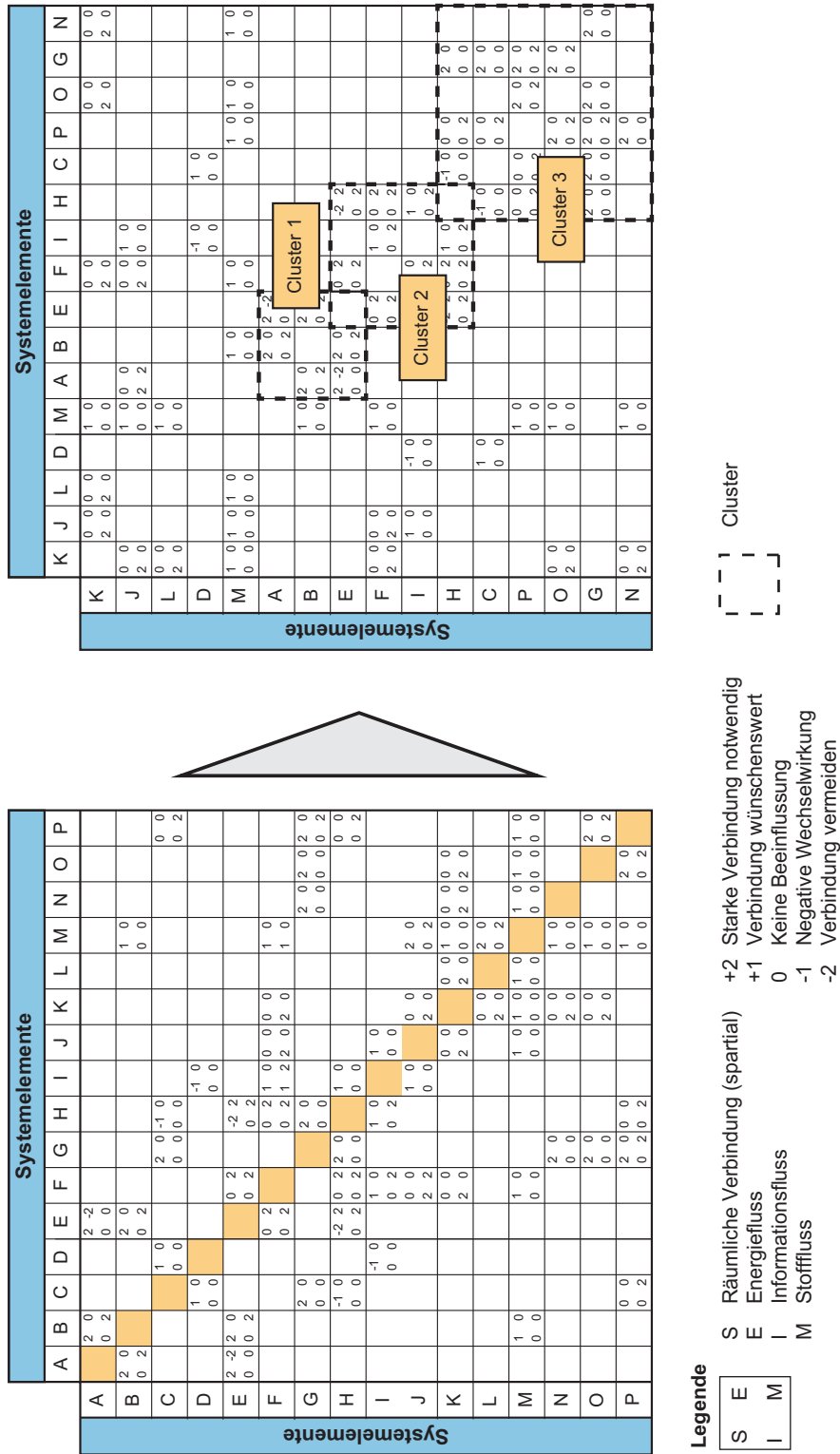


Bild 3-10: Funktionsweise der DSM nach [PE94, S. 6f.]

**Clustern der Elemente in Blöcke:** In der nächsten Phase erfolgt die Partitionierung der Matrix zu Clustern (vgl. Bild 3-10). Hierzu werden die Zeilen und Spalten gleichgerichtet verschoben. Die Sortierung wird so lange vorgenommen, bis Systemelemente mit positiven Beziehungen nahe beieinanderstehen, d. h., sie werden entlang der Diagonalen

angeordnet. Elemente, die Verbindungen aufweisen, die vermieden werden sollen, werden möglichst weit entfernt voneinander angeordnet. Entlang der Diagonalen bilden sich im Idealfall Cluster aus. Diese besitzen starke interne Beziehungen und lediglich schwache Beziehungen außerhalb ihrer Grenzen [PE94, S. 5f.].

**Bewertung:** Die *Design Structure Matrix* ist gut geeignet, um die Abhängigkeiten innerhalb eines technischen Systems darzustellen. Es liefert Anhaltspunkte, um das System so zu modularisieren, dass die Module möglichst unabhängig sind. Bei sehr stark vernetzten Systemen liefert der Algorithmus jedoch keine Module. Bei der Modularisierung werden die späteren Phasen der Anlagenentstehung nicht mit berücksichtigt.

### 3.3.3 Produktstrukturierung nach STEFFEN

Das von STEFFEN entwickelte *Verfahren zur Produktstrukturierung von fortschrittlichen mechatronischen Systemen* ist auf die frühe Phase der Produktentstehung ausgerichtet. Ziel ist eine entwicklungsorientierte Struktur des Systems, um die notwendigen Abstimmungsaufwände in der folgenden Konkretisierung zu reduzieren [Ste07, S. 3]. Das Vorgehen gliedert sich in vier Phasen (vgl. Bild 3-11). Zur vereinfachten Darstellung sind die erlaubten Iterationsschleifen nicht dargestellt [Ste07, S. 89].

**Analyse der Entwicklungsaufgabe:** Das Verfahren nach STEFFEN basiert auf neun Grundtypen von Entwicklungsaufgaben. Die Grundtypen sind *Miniaturisiertes Produkt*, *Kostenoptimiertes Massenprodukt*, *Leistungsoptimiertes Einzelprodukt*, *Komplexes miniaturisiertes System*, *Variantenreiches Serienprodukt*, *Komplexes System mit spezifizierten Modulen*, *Mechatronisches Funktionsmodul*, *Sicherheitskritisches System* und *Rekonfigurierbares System* [Ste07, S. 96]. Diesen sind Empfehlungen und Hinweise für die Produktstrukturierung zugeordnet. Im ersten Schritt erfolgen nun die Bestimmung der vorliegenden Entwicklungsaufgabe und die Zuordnung des Grundtyps. Aus diesem ergibt sich der anzustrebende Produktstrukturtyp [Ste07, S. 90].

**Bestimmung relevanter Entwurfsregeln:** Zur Unterstützung der beteiligten Entwickler sind 27 allgemeine Entwurfsregeln bestimmt worden, die die Besonderheiten bei fortschrittlichen mechatronischen Systemen berücksichtigen. Entsprechend des ermittelten Grundtyps des Systems werden die für den vorliegenden Fall relevanten Entwurfsregeln bestimmt [Ste07, S. 90].

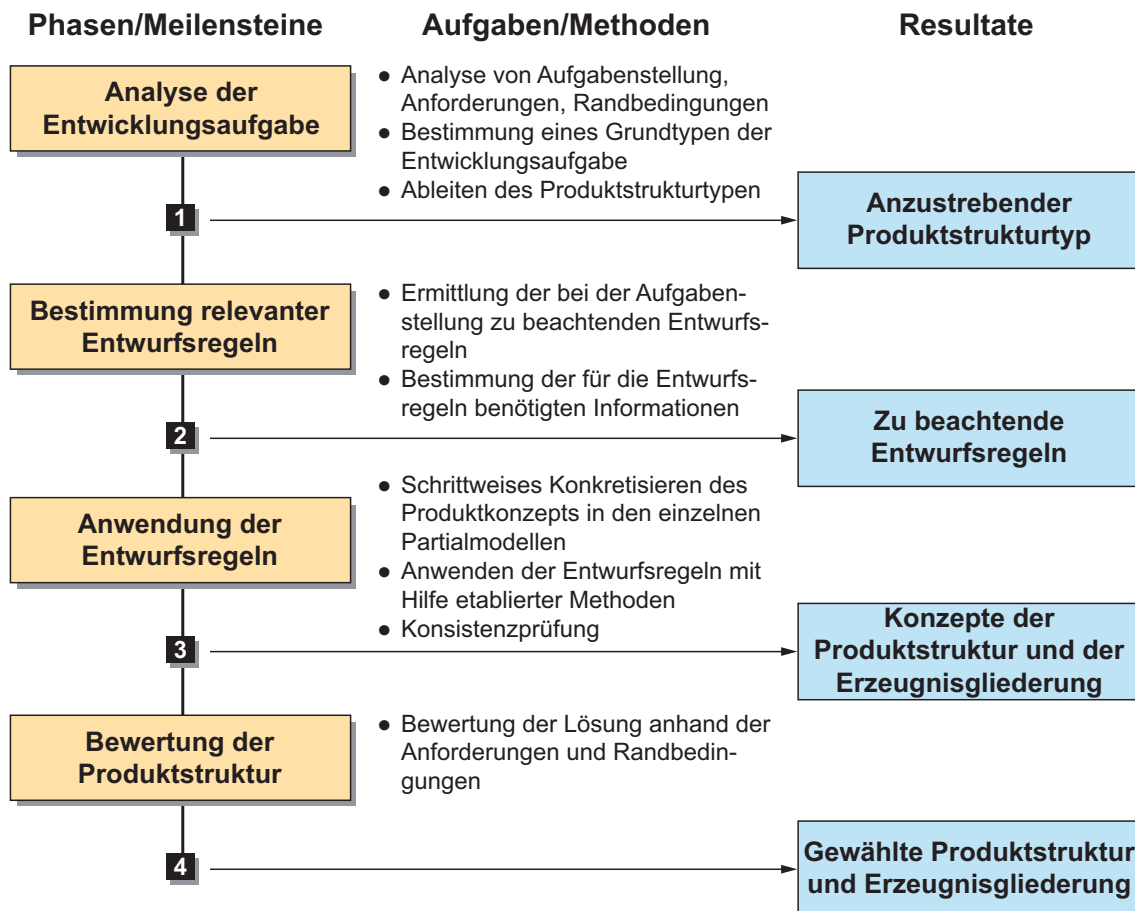


Bild 3-11: Verfahren zur Produktstrukturierung nach STEFFEN [Ste07, S. 89]

**Anwendung der Entwurfsregeln:** Die identifizierten Entwurfsregeln dienen der Strukturierung der Prinziplösung. Aus den Partialmodellen der Prinziplösung werden die strukturelevanten Informationen entnommen. Der Wirkstruktur können z. B. die Beziehungen zwischen den Systemelementen entnommen werden. Auf Grundlage dieser Informationen erfolgt nun die Strukturierung. Dabei kommen etablierte Methoden zum Einsatz. Mittels DSM (vgl. Abschnitt 3.3.2) werden die Beziehungen zwischen den Systemelementen strukturiert. Über die MIM (vgl. Abschnitt 0) werden zusätzliche Eigenschaften wie Produktleistung, Qualität oder Recyclingfähigkeit berücksichtigt [Ste07, S. 111f.]. Dem Aspekt der Selbstoptimierung wird in der Reconfiguration Structure Matrix Rechnung getragen. Das Resultat der Phase ist ein erster Entwurf der Produktstruktur sowie eine Erzeugnisgliederung. Diese ist entwicklungsorientiert strukturiert und stellt funktionsorientierte und gestalterorientierte Struktur gegenüber [Ste07, S. 113ff.].

**Bewertung der Produktstruktur:** In der letzten Phase wird die Konzeption der Produktstruktur im Hinblick auf ihre Anforderungserfüllung und die Einhaltung der Rahmenbedingungen bewertet. Es werden wirtschaftliche und technische Gesichtspunkte untersucht [Ste07, S. 91].



**Bewertung:** Das Verfahren von STEFFEN liefert einen guten Ansatz zur frühzeitigen Strukturierung von mechatronischen Systemen. Es ist ein systematisches Vorgehen, das den Anwendern ein disziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel an die Hand gibt. Die enthaltenen Entwurfsregeln sind auf mechatronische Produkte ausgerichtet und berücksichtigen die Anforderungen maschinenbaulicher Anlagen nicht. Spätere Phasen wie die Anlagenherstellung und -inbetriebnahme werden nicht berücksichtigt.

### 3.3.4 Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS)

Die *Methodische Unterstützung der Systembildung* (METUS) von GÖPPFERT modularisiert Systeme unter technischen und entwicklungsorganisatorischen Gesichtspunkten. Ziel sind funktional und physisch unabhängige Module, die von verschiedenen Organisationseinheiten möglichst eigenständig entwickelt werden können. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Phasen (vgl. Bild 3-12) [GS00, S. 20ff.].

**Definition der Prämissen:** Ziel der ersten Phase sind die Prämissen des Prozesses. Es erfolgt eine Analyse der Aufgabenstellung und die Festlegung der technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen. Der Anwender wird durch einen Fragenkatalog unterstützt [Göp98, S. 228f.].

**Bildung technischer Gestaltungsalternativen:** Die Phase beginnt mit der Aufstellung der Funktionsstruktur. Das zu entwickelnde Produkt wird in seine Teilfunktionen untergliedert. Dies geschieht so lange, bis Komponenten gefunden werden können, die die Teilfunktionen erfüllen. Im nächsten Schritt werden die Komponenten zu Baugruppen zusammengefasst, so dass die Baustruktur entsteht (vgl. Bild 3-13). Sowohl bei der Dekomposition in Teilfunktionen als auch bei der Modulbildung werden im Prozess Gestaltungsalternativen entwickelt [Göp98, S. 229f.].

**Bewertung und Auswahl technischer Gestaltungsalternativen:** Die Gestaltungsalternativen werden in dieser Phase mittels Nutzwertanalyse bewertet. Es werden nur technische Kriterien (z. B. Kompatibilität, Plattformkonzept, Recyclingfähigkeit) zur Bewertung herangezogen. Die Alternative mit der höchsten Bewertung wird ausgewählt [Göp98, S. 230f.].

**Bildung organisatorischer Gestaltungsalternativen:** Die gewählte Gestaltungsalternative wird in der nächsten Phase unter organisatorischen Gesichtspunkten strukturiert. Es werden organisatorische Einheiten gebildet, in denen Funktionen, Komponenten und Baugruppen zusammengefasst werden [Göp98, S. 231f.].

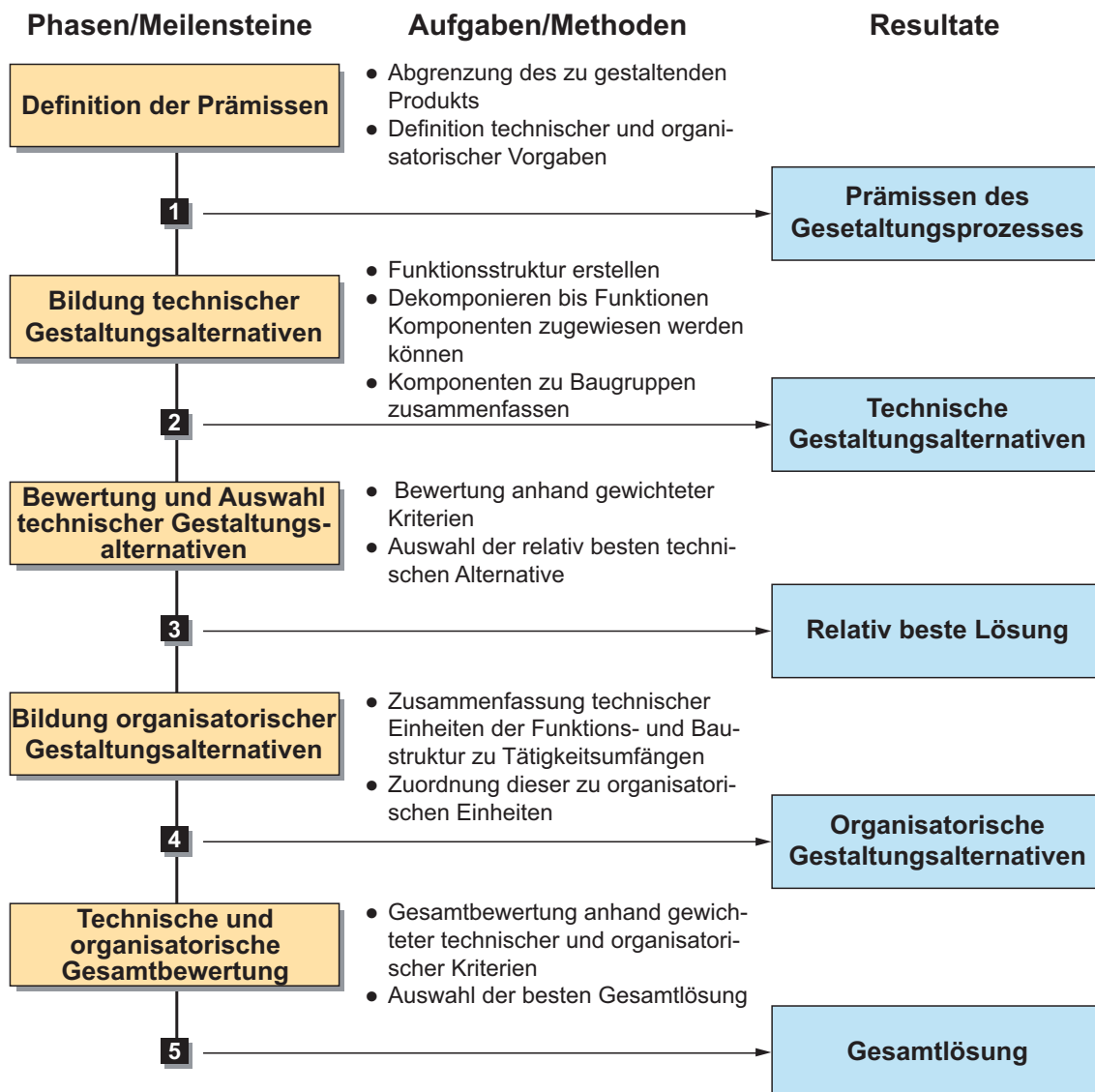


Bild 3-12: Vorgehen der Methode zur technischen und organisatorischen Gestaltung (METUS) [Göp98, S. 233]

**Technische und organisatorische Gesamtbewertung:** In der letzten Phase wird noch einmal eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Dieses Mal werden technische und organisatorische Aspekte berücksichtigt. So fließen z. B. die eigenen Kernkompetenzen und Geschäftsstrategien mit in die Bewertung ein [Göp98, S. 232].

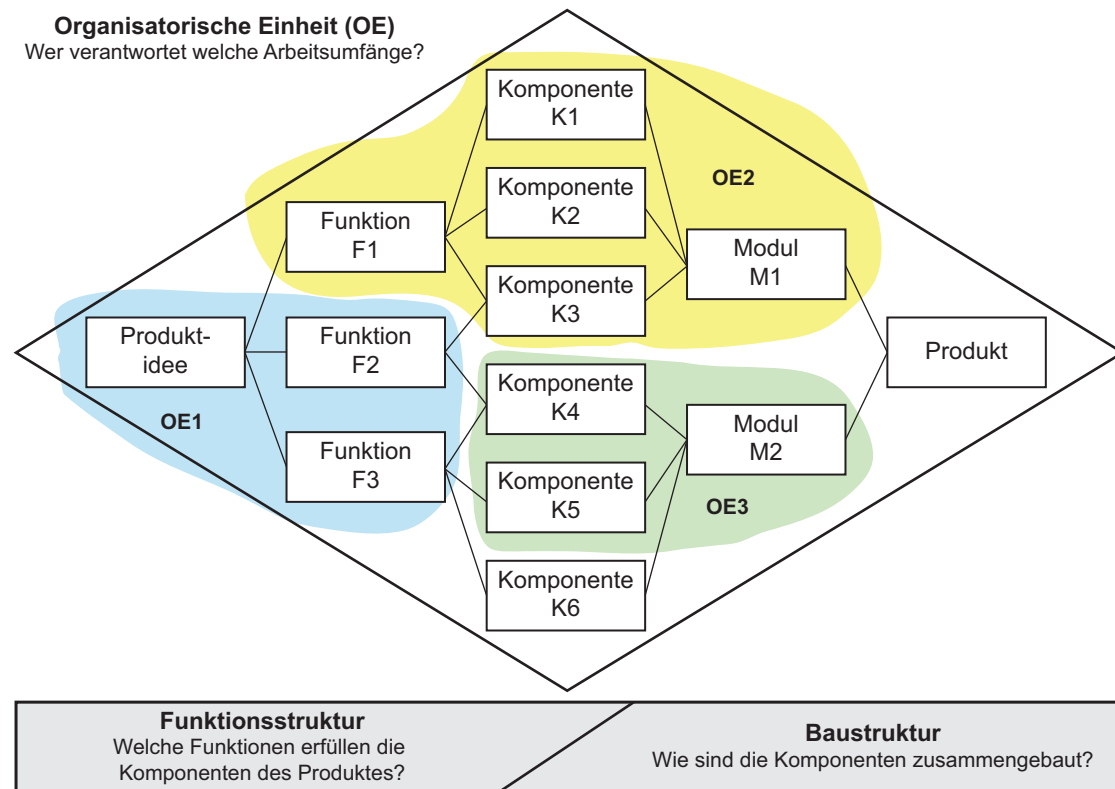


Bild 3-13: Darstellung von Produktarchitektur und Projektorganisation in METUS [GS00, S. 25]

Das Vorgehen ist durch Iterationen geprägt. Ist das Ergebnis der Bewertung nicht zufriedenstellend, erfolgt ein Rücksprung in eine vorangegangene Phase. Ist die *Bewertung und Auswahl technischer Gestaltungsalternativen* nicht zufriedenstellend, wird die Phase der *Bildung technischer Gestaltungsalternativen* erneut durchlaufen. Aus der *Technischen und organisatorischen Gesamtbewertung* kann ein Rücksprung in die Phasen *Bildung technischer/organisatorischer Gestaltungsalternativen* erfolgen [Göp98, S. 232].

**Bewertung:** Die methodische Unterstützung der Systembildung nach GÖPPFERT liefert ein systematisches Vorgehen zur Produktmodularisierung. Es können technische und organisatorische Aspekte berücksichtigt werden. Der Fokus liegt auf der Produktentstehung, spätere Phasen werden nicht berücksichtigt. Die Methode stellt einen Leitfaden bereit, liefert jedoch keine konkreten Regeln. Sie lässt sich durch das diskursive Vorgehen leicht an neue Gegebenheiten anpassen.

### 3.3.5 Modularisierung komplexer Produkte nach KOEPPEN

Das Verfahren zur *Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen* von KOEPPEN basiert auf dem Vorgehen zur Modularisierung von PIMMLER und EPPINGER. Ausgangspunkt sind die Kopplungen

zwischen den Komponenten und projektspezifische Modularisierungsziele. Es gliedert sich in fünf Phasen (vgl. Bild 3-14).

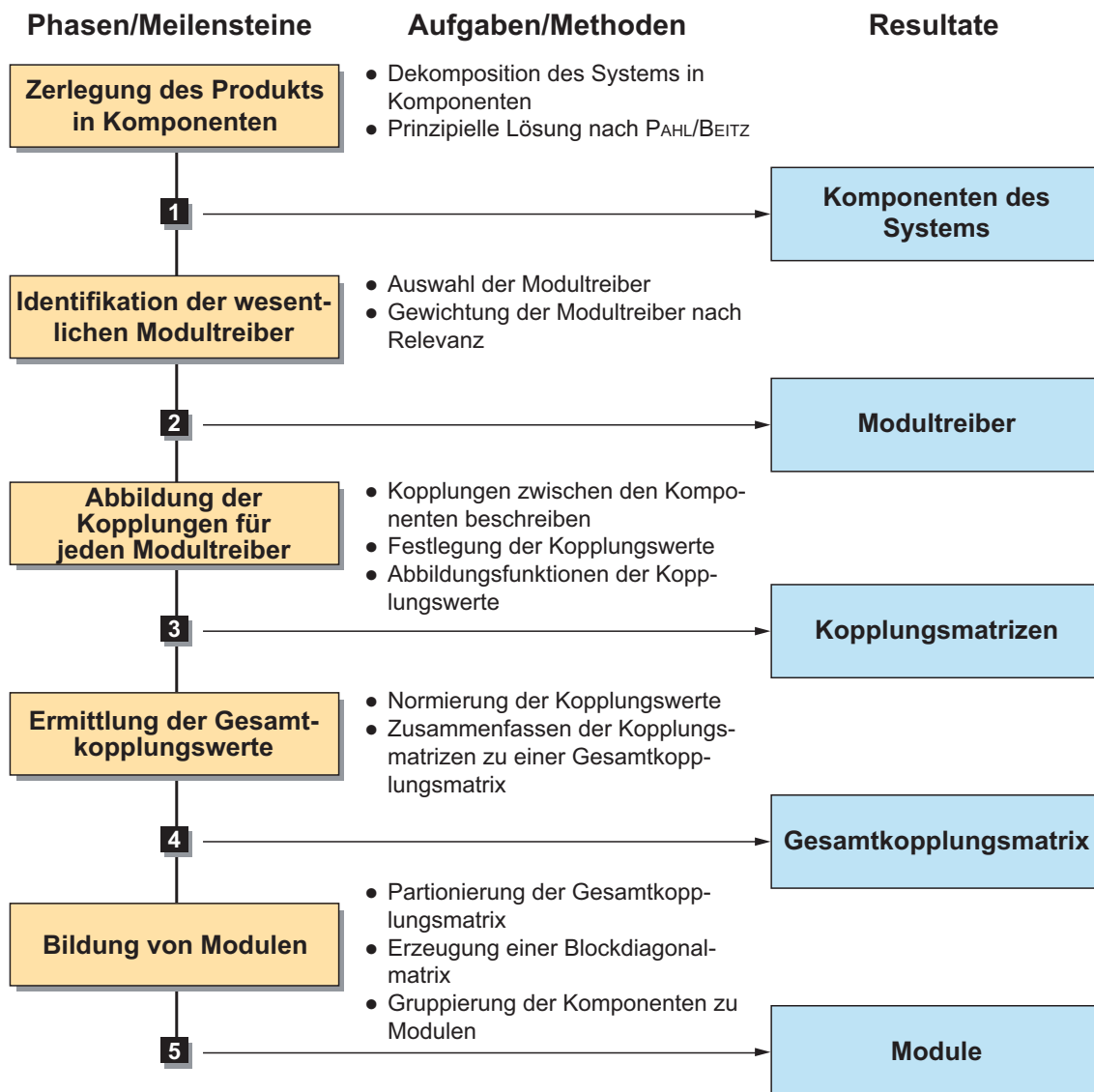


Bild 3-14: Vorgehen zur Modularisierung komplexer Produkte anhand Komponentenkopplung nach KOEPPEN [Koe07, S. 60]

**Zerlegung des Produkts in Komponenten:** Zu Beginn muss das Produkt in seine Komponenten zerlegt werden. Die Zerlegung erfolgt dabei normalerweise so lange, bis die Bauteilebene erreicht wird. Es ist darauf zu achten, dass die zerlegten Komponenten die gleiche Hierarchiestufe im Gesamtsystem aufweisen. Handelt es sich um eine Neuentwicklung, wird auf die Funktionen und Komponenten der prinzipiellen Lösung nach PAHL/BEITZ zurückgegriffen [Koe07, S. 28f.].

**Identifikation der wesentlichen Modultreiber:** In dieser Phase werden die Modultreiber für den spezifischen Anwendungsfall ermittelt. Zur Unterstützung hat KOEPPEN einen Katalog von Modultreibern bereitgestellt, aus denen gewählt werden kann, und es

können ggf. eigene Modultreiber ergänzt werden. Die Modultreiber stammen dabei aus den sieben Bereichen des Produktlebenszyklus (*Konzeptentwicklung, Detailentwicklung, Beschaffung, Produktion, Logistik, Vertrieb* und *After Sales*). Für die *Konzeptentwicklung* sind dies z. B. geometrische Abhängigkeiten wie *Art, Form, Größe* und *Lage*. Nach der Auswahl der Modultreiber erfolgt ihre Gewichtung [Koe07, S. 60f.].

**Abbildung der Kopplungen für jeden Modultreiber:** Für jeden identifizierten Modultreiber werden in dieser Phase die Kopplungswerte ermittelt. Dazu wird je Modultreiber eine DSM erstellt, in der die Kopplung zwischen den Komponenten eingetragen wird. Um die Kopplungswerte der einzelnen Modultreiber zu einem Gesamtkopplungswert zusammenfassen zu können, sind die Kopplungswerte zu normieren. Die Kopplungswerte bewegen sich im Bereich zwischen null und eins. Entsprechend der Kopplungsart sind Abbildungsfunktionen zu identifizieren, mit denen die Stärke der Kopplung in den Wertebereich überführt werden kann. So wird bei dem Modultreiber Kraftschluss z. B. die Fläche der Verbindung herangezogen, um den Kopplungswert zu bestimmen. Am Ende der Phase liegt dann für jeden Modultreiber eine DSM mit den normierten Kopplungswerten vor [Koe07, S. 62f.].

**Ermittlung der Gesamtkopplungswerte:** Die Kopplungswerte der einzelnen Modultreiber werden in diesem Schritt in einer Matrix zusammengefasst. Dazu werden die Elemente der Kopplungswerte der einzelnen Modultreiber mit der in der Phase *Identifikation der wesentlichen Modultreiber* ermittelten Gewichtung multipliziert und in einer Gesamtmatrix eingetragen. Diese entspricht wiederum einer normierten DSM [Koe07, S. 65f.].

**Bildung von Modulen:** In der letzten Phase wird die Gruppierung der Komponenten zu Modulen vorgenommen. Dabei wird das Vorgehen von PIMMLER und EPPINGER angewendet (vgl. Abschnitt 3.3.2). Ziel ist eine Blockdiagrammmatrix mit hohen Kopplungswerten innerhalb der Module [Koe07, S. 30f.].

**Bewertung:** Mit der von KOEPPEN entwickelten Methode können komplexe Produkte unter technischen und strategischen Gesichtspunkten modularisiert werden. Durch die Modultreiber wird Einfluss auf die Produktstruktur genommen werden. Diese Einflussnahme ist jedoch stark subjektiv und abhängig von den beteiligten Personen. Die Methode kann bereits in der Konzipierung angewendet werden. Sie beschränkt sich auf die Produktentwicklung, spätere Phasen der Anlagenherstellung werden nicht mit berücksichtigt. Der Aufwand für die Ermittlung der Kopplungswerte ist überaus hoch.

### 3.4 Handlungsbedarf

Der Stand der Technik wurde mit den in Abschnitt 2.7 beschriebenen Anforderungen verglichen. Eine Zusammenfassung der Bewertung je Anforderung ist im Folgenden beschrieben. In Bild 3-15 erfolgt die Visualisierung der Bewertung.

**A1) Fachdisziplinenübergreifend einsetzbar:** Die Mehrheit der Rahmenwerke für die Produktentstehung und der Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung erfüllt diese Anforderung in vollem Umfang. Vorgehensmodelle zur Planung der Automatisierung und Methoden zur Inbetriebnahme erfüllen sie nicht. Sie sind meistens auf einzelne Fachdisziplinen beschränkt.

**A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme:** Nur die Ansätze *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* und die Produktstrukturierung nach STEFFEN erfüllen diese Anforderung. Alle anderen Ansätze setzen zeitlich erst nach der Konzipierung an.

**A3) Ganzheitliche Betrachtung des Anlagenentstehungsprozesses:** Die meisten Ansätze berücksichtigen nicht den gesamten Anlagenentstehungsprozess. Sie behandeln entweder die Produktionssystemplanung oder die Anlageninbetriebnahme. Nur die Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik behandeln den gesamten Prozess. Das *Integrierte Prozessmodell* nach MAUDERER und die methodischen Ansätze zur Inbetriebnahme betrachten den gesamten Anlagenentstehungsprozess, lassen jedoch einzelne Aspekte dabei aus.

**A4) Systematische Vorgehensweise:** Die meisten der untersuchten Ansätze liefern ein systematisches Vorgehen. Sie berücksichtigen dabei jedoch überwiegend nur Teilaspekte des Anlagenentstehungsprozesses.

**A5) Nutzung eines disziplinenübergreifenden Beschreibungsmittels:** Ein disziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel liefern einige untersuchte Ansätze. Die *Entwicklungsmethodik intelligente Mechatronik* nutzt dafür die Spezifikationstechnik CONSENS. Das Model Based Systems Engineering liefert mit SysML ebenfalls ein Beschreibungsmittel.

**A6) Nutzung von Erfahrungswissen:** Auf Erfahrungswissen greifen die Ansätze zur Inbetriebnahme zurück. Sie erfüllen alle diese Anforderungen. Ebenso wird bei der *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* auf Lösungen aus vorangegangenen Projekten und von Zulieferern zurückgegriffen. Weitere Ansätze erfüllen die Anforderung nur teilweise, da die Erfahrungssicherung nicht ausführlich behandelt wird.

**A7) Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage:** Die Anforderung wird von den Ansätzen zur Produktmodularisierung erfüllt. Bei den methodischen Ansätzen zur Inbetriebnahme wird dies zum Teil berücksichtigt.

**A8) Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe:** Eine Methode zur Wahl der geeigneten Modellierungstiefe ist nur bei den Ansätzen zur virtuellen Inbetriebnahme enthalten.






































































































<b>Bewertung</b> der untersuchten Ansätze hinsichtlich der gestellten Anforderungen.  <b>Bewertungsskala:</b>  = nicht erfüllt  = teilweise erfüllt  = voll erfüllt		Anforderungen (A)							
		Fachdisziplinenübergreifend einsetzbar	Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik	Ganzheitliche Betrachtung	Systematische Vorgehensweise	Disziplinenübergreifendes Beschreibungsmittel	Nutzung von Erfahrungswissen	Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage	Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Rahmenwerke und Vorgehensmodelle	Simultaneous Engineering								
	Model Based System Engineering								
	Entwurfstechnik intelligente Mechatronik (ENTIME)								
	Integriertes Prozessmodell zur Planung und Entwicklung nach MAUDERER								
	Allgemeine Vorgehensmodelle zur Produktionssystemplanung								
	Vorgehensmodelle der Automatisierungstechnik								
Inbetriebnahme	Methodische Ansätze								
	Virtuelle Inbetriebnahme								
	Softwaretechnische Realisationen								
Verfahren zur Produktmodularisierung	Modular Function Deployment								
	Design Structure Matrix								
	Produktstrukturierung nach STEFFEN								
	Methodische Unterstützung der Systembildung (METUS)								
	Modularisierung komplexer Produkte nach KOEPPEN								

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

Der Vergleich zeigt, dass einige der untersuchten Ansätze viele der Anforderungen erfüllen. Sie weisen jedoch auch ausgeprägte Defizite auf. Die *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* und der Ansatz von NORDSIEK (vgl. Abschnitt 2.3.2) erfüllen viele der Anforderungen, sie betrachten jedoch nur die ersten Phasen des Anlagenentstehungsprozesses, die Produktionssystemplanung. Defizite liegen darüber hinaus bei der Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage und bei der Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe vor. Es besteht somit Handlungsbedarf, eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* zu entwickeln.





## 4 Einführung in die Systematik

Im Rahmen dieser Arbeit soll die virtuelle Inbetriebnahme in den Prozess der Anlagenentstehung integriert werden. Entwicklern, Planern und Inbetriebnehmern sollen ein Leitfaden und die Methoden geliefert werden, um bei dem Anlagenentstehungsprozess und insbesondere der Inbetriebnahme zu unterstützen.

Die Grundidee wird dabei in Abschnitt 4.1 vorgestellt und die Systematik in bestehende Entwicklungsprozesse eingeordnet. Die Elemente der Systematik werden in Abschnitt 4.2 kurz geschildert. In Abschnitt 4.3 werden die Ausgangssituation der Validierung und der Demonstrator beschrieben.

### 4.1 Grundidee

Die Vorteile der virtuellen Inbetriebnahme sind vielfältig und der Nutzen ist in der Literatur ausführlich dargelegt (vgl. Abschnitt 2.5.2 und 3.2.2). Der Aufwand für die Modellerstellung ist jedoch sehr hoch. Die Grundidee der entwickelten Systematik besteht darin, die VIBN in die Anlagenentstehung zu integrieren. Der steigenden Komplexität von Produktionssystemen, bedingt durch die Zunahme an mechatronischen Komponenten, kann in der Entwicklung durch Model Based Systems Engineering entgegengewirkt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2). In der Produkt- und Produktionssystementwicklung werden in zunehmendem Maße Modelle beim Entwurf eingesetzt. Der Ansatz dieser Arbeit besteht in einer Systematik, die auf dem modellbasierten Entwurf aufsetzt und die virtuelle Inbetriebnahme frühzeitig in den Anlagenentstehungsprozess integriert. Bedingt durch diese Maßnahme soll der Nutzen der Modelle gesteigert werden. Sie sollen während des gesamten Prozesses genutzt werden – in der Konzipierung, in der Ausarbeitung und in der VIBN. Eine frühzeitige Berücksichtigung der Modelle für die gemeinsame Nutzung verringert die Modellanpassungen oder notwendige Neumodellierungen in den späteren Phasen.

Im Projekt *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik – ENTIME* (vgl. Abschnitt 3.1.3) ist ein Entwurfsinstrumentarium entwickelt worden, das auf Basis semantischer Technologien bei der Identifikation von Lösungselementen unterstützt. Die semantischen Technologien schließen dabei die Lücke zwischen der Sicht des Entwicklers (funktionsorientiert) und dem Anbieter von Lösungselementen (bauteil-/komponentenorientiert). Modelle spielen in dieser Entwurfstechnik eine zentrale Rolle. Sie unterstützen den Entwickler bei der Auswahl von geeigneten Lösungselementen und ermöglichen den frühzeitigen Test von Komponenten. An dieser Entwurfstechnik lehnt sich die entwickelte Systematik an.

Das generelle Vorgehen ist in Bild 4-1 dargestellt. Es orientiert sich an der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (vgl. Abschnitt 2.3.1) sowie an den Erkenntnissen aus dem Projekt ENTIME [TOS11] und ist für die Anwendung bei maschi-

nenbaulichen Anlagen angepasst. Die Hauptphasen der Produktionssystemplanung gliedern sich in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] in die Anlagenkonzipierung und die Anlagenausarbeitung. Das Vorgehen entspricht einem funktionsorientierten Entwurf, wie er von PAHL/BEITZ in der klassischen Konstruktionslehre beschrieben wurde [PBF+07, S. 198]. In beiden Phasen werden jeweils die Prozessschritte Zielbestimmung, Synthese und Analyse durchlaufen. Ergebnis der Anlagenkonzipierung ist die Prinziplösung, auf Basis derer die fachspezifische Konkretisierung in der Anlagenausarbeitung beginnt. Parallel wird bereits mit der Modellerstellung für die VIBN begonnen. Im Anschluss an die Produktionssystemplanung erfolgt die Anlagenherstellung. Bei der VIBN wird zu dieser Zeit bereits das Steuerungsprogramm getestet, so dass im Anschluss an die VIBN und die Anlagenherstellung der Aufbau und ein getestetes Steuerungsprogramm vorliegen. Dieses wird anschließend bei der Anlageninbetriebnahme aufgespielt.

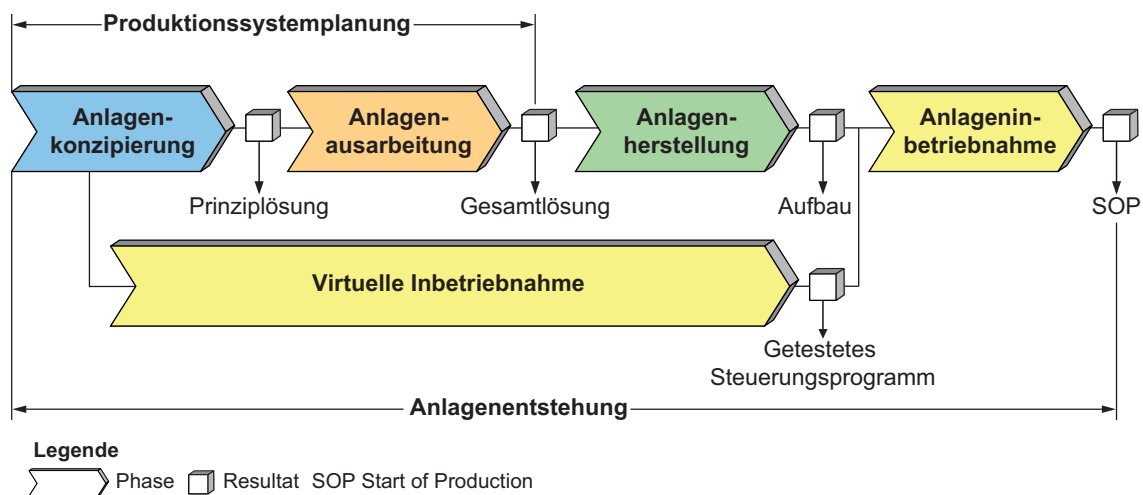


Bild 4-1: Generelles Vorgehensmodell für die Anlagentstehung und der virtuellen Inbetriebnahme

Die frühe Integration der VIBN ermöglicht es, die Verhaltensmodelle so auszulegen, dass sie zum einen in der Produktionssystemplanung und zum anderen in der VIBN genutzt werden können. Damit wird das Problem umgangen, dass für die VIBN gesonderte Modelle aufgebaut werden müssen. Die frühzeitige Berücksichtigung der Inbetriebnahme gestattet es, dass die Erfahrungen aus diesem Bereich in die Anlagenkonzipierung einfließen können. Zum anderen können die Verhaltensmodelle direkt so aufgebaut werden, dass sie auch in der VIBN genutzt werden können. Sie unterscheiden sich von den Modellen in der Produktionssystemplanung dahingehend, dass sie auch das Fehlverhalten mit abbilden müssen. Ein Modell eines elektrischen Antriebs muss für die VIBN z. B. nicht nur die Leistungswerte und das zeitliche Verhalten aufweisen, sondern auch die Möglichkeit besitzen, die *falsche* Drehrichtung zu liefern. Nur durch solch ein Fehlverhalten der Komponenten kann das Steuerungsprogramm getestet wer-

den. Die Berücksichtigung von solchen Anforderungen an die Modelle ist einfacher direkt zu implementieren als eine spätere Anpassung.

Ein weiteres Element der Systematik ist die Modularisierung der Anlage. Die Berücksichtigung der VIBN in der Anlagenkonzipierung ermöglicht es, die Modularisierung der Anlage vorzunehmen und dabei die Anforderungen der VIBN zu beachten. Dadurch wird der Einfluss des Steuerungsprogramms auf die Modularisierung erhöht und die so gebildeten mechatronischen Module eignen sich besser für die VIBN, als wenn die Modularisierung nur unter Gesichtspunkten der Herstellung gewählt wird. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass Modellbibliotheken angelegt werden können und somit die Simulationsmodelle aus bestehenden Modellen aufgebaut werden. Die Systematik enthält aus diesem Grund eine Methode zur Dekomposition von maschinenbaulichen Anlagen. Sie berücksichtigt die Anforderungen aus der VIBN und ist sowohl bei Neukonstruktionen als auch bei Anpassungskonstruktionen anwendbar.

Das systematische Vorgehen, die Modularisierung der Anlage und die Dokumentation des Anlagenentstehungsprozesses mit Hilfe der Spezifikationstechnik ermöglichen die Erfahrungssicherung. Auf die gesammelten Erfahrungen wird in späteren Projekten zurückgegriffen. So können z. B. Aspekte der Spezifikation aus alten Projekten übernommen werden. Unterstützt wird dies durch die Lösungsmustersuche.

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen integriert auch eine Methode zur Wahl der geeigneten Modellierungstiefe. Sie hilft den Aufwand für die Modellierung so niedrig wie möglich zu halten, in dem sie dem Modellierer ein Werkzeug an die Hand gibt, um zu entscheiden, wie detailliert die Modelle aufgebaut werden müssen. Die Wahl der Modellierungstiefe ist von den Anforderungen an die Modelle und dem Fortschritt im Anlagenentstehungsprozess abhängig. Der Einsatz dieser Methode löst das Problem, dass der Entwickler nicht weiß, wie er das Problem modellieren soll, und stellt sicher, dass die Laufzeit des Modells möglichst gering ist, um für die VIBN echtzeitfähig zu sein.

## 4.2 Bestandteile der Systematik

Die Systematik soll Entwicklern, Planern und Inbetriebnehmern als Rahmenwerk dienen und sie befähigen, die virtuelle Inbetriebnahme in der Anlagenherstellung effizient durchzuführen. Sie automatisiert den Anlagenentstehungsprozess nicht und ersetzt auch nicht die kreative Leistung des Anwenders. Sie umfasst ein **Vorgehensmodell**, eine **Spezifikationstechnik** und **Methoden**.

## **Vorgehensmodell**

Das Vorgehensmodell detailliert das generelle Vorgehen bei der Anlagenentstehung und der virtuellen Inbetriebnahme. Die einzelnen Arbeitsschritte der Phasen werden beschrieben. Hilfsmittel zur Lösung der jeweiligen Teilaufgaben werden ihnen zugeordnet. Das Vorgehensmodell gibt somit Orientierung für die an dem Anlagenentstehungsprozess beteiligten Personen.

Das Vorgehen wird zur besseren Übersichtlichkeit als sequentielle Abfolge von Arbeitsschritten beschrieben. Bei der Anwendung des Verfahrens treten jedoch Iterationen auf, was sich durch das Vorgehen beim Problemlösen ergibt.

## **Spezifikationstechnik**

Bei dem fachdisziplinenübergreifenden Vorgehen zur Anlagenerstellung, insbesondere der Phase der Anlagenkonzipierung, ist eine Spezifikationstechnik zur Beschreibung des Anlagenkonzeptes notwendig. Sie ist Grundlage für die Kommunikation und die Kooperation der Fachleute und der beteiligten Fachdisziplinen und Ausgangspunkt für die weitere Konkretisierung. Die von GAUSEMEIER ET AL. entwickelte Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Abschnitt 2.3.3) ermöglicht die Beschreibung der Prinzipiellösung fortschrittlicher mechatronischer Systeme und des zugehörigen Produktionssystems.

Die wesentlichen Aspekte für die VIBN sind die Anforderungen, die Funktionen, die Wirkstruktur, das Verhalten und die Anwendungsszenarien. Das Ergebnis der VIBN muss mit den Anforderungen abgeglichen werden. Sie stellen das Ziel dar, das erreicht werden muss. Aus den Funktionen und der Wirkstruktur lässt sich der grundsätzliche Aufbau der Anlage ableiten. Hiernach richtet sich auch die Modularisierung der Verhaltensmodelle für die VIBN. Durch die einheitliche Verwendung von Funktionen und Wirkstruktur können auch Lösungsmuster identifiziert und somit bestehende Konzepte übernommen werden. Aus dem Verhalten der Anlage wird in der späteren Anlagenausarbeitung das Konzept für das Steuerungsprogramm abgeleitet. Die Anwendungsszenarien werden in der VIBN dazu genutzt, um das geplante Verhalten im Störfall bereits in der Anlagenkonzipierung zu dokumentieren. Das geplante Verhalten im Störfall ist für den Test des Steuerungsprogramms wichtig.

Die Spezifikationstechnik verbessert die Kommunikation zwischen den beteiligten Fachdisziplinen durch eine fachdisziplinenübergreifende Beschreibung des Systems. Bedingt durch die einheitlichen Konstrukte können die Zusammenhänge und Wechselwirkungen verdeutlicht werden [Nor12, S. 104] und ein gemeinsames Verständnis des Gesamtsystems und des Zusammenwirkens der einzelnen Komponenten gewonnen werden. Die Spezifikationstechnik CONSENS wird aus diesem Grund in der Systematik verwendet.

## Methoden

Bei der Anlagenentstehung mit integrierter VIBN gibt es im Wesentlichen folgende Teilaufgaben zu lösen: Die Anlage ist zu modularisieren, für die Module sind Lösungselemente zu identifizieren, die Testszenarien sind zu beschreiben, es sind Verhaltensmodelle mit angepasster Modellierungstiefe zu erstellen und die Erkenntnisse aus der Analyse der VIBN müssen zurückgespielt werden. In der Analyse des Stands der Technik wurde eine Reihe von Methoden identifiziert, die Teilaufgaben lösen. Sie sind jedoch noch nicht in ein durchgängiges, systematisches Vorgehen zur Anlagenentstehung mit VIBN eingebettet oder auf die Verwendung mit der Spezifikationstechnik abgestimmt.

Die Zuordnung geeigneter Methoden zu den Arbeitsschritten im Vorgehensmodell ist weiterer Bestandteil der Systematik. Wenn möglich werden bewährte Methoden eingesetzt. Wenn nötig sind diese für die Systematik angepasst worden.

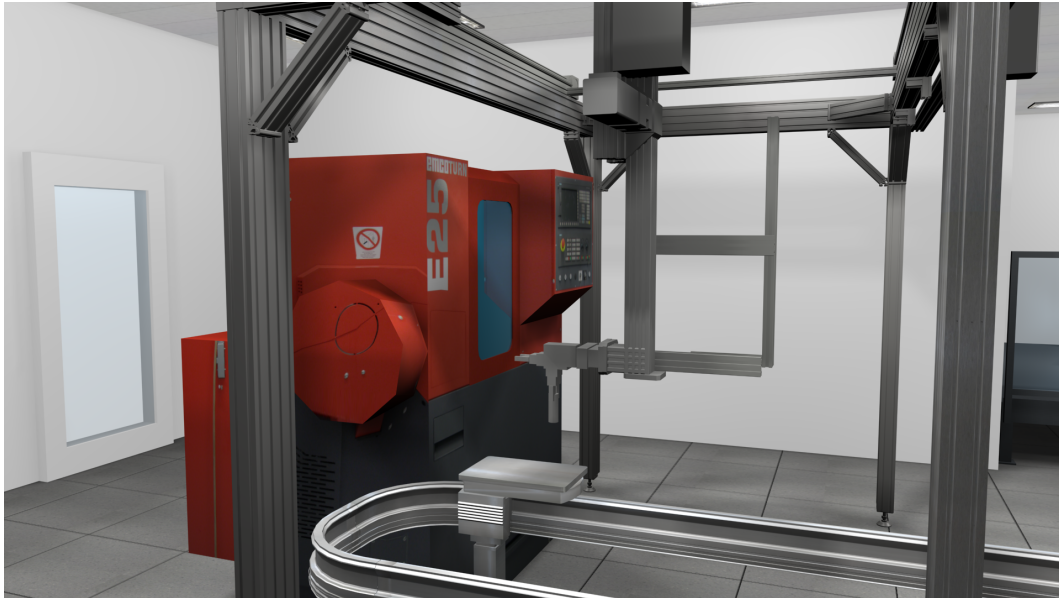
### 4.3 Validierungsbeispiel

Das Vorgehen der entwickelten Systematik, die Anwendung der einzelnen Methoden sowie der Einsatz der Spezifikationstechnik werden am Beispiel eines flexiblen Materialflusssystems vom Typ Montrac<sup>16</sup> dargestellt und erläutert. Es ist Teil einer Miniaturfertigungsanlage. Ihr Konzept besteht aus einem Fräszentrum EMCO E350, einem Drehzentrum EMCO E25 mit einem 3-Achsen-Portalroboter, zwei 6-Achsen-Robotern (ABB, KUKA) sowie einer Montagestation (vgl. Anhang A1.1).

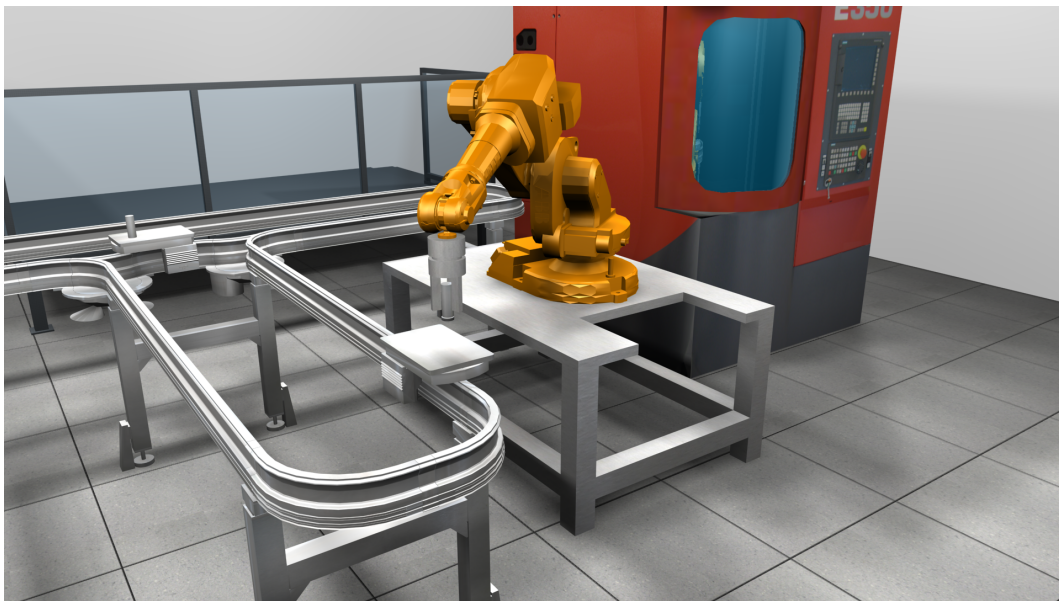
Das Materialflusssystem besteht aus einer Einschienenbahn und selbstfahrenden Shuttles. Die Bahn der Anlage wird individuell aus Geraden, Kurven und Weichen aufgebaut. Die Shuttles besitzen Abstandssensoren, um eine Kollision zu vermeiden. Die Identifikation der Shuttles erfolgt durch Radio Frequency Identification (RFID). Die Steuerung der Weichen wird zentral vorgenommen. Entlang der Strecke gibt es die im Konzept beschriebenen Bearbeitungsstationen. An der Drehmaschine wird beispielsweise die Beladung und Entladung des Shuttles mit Material durch einen 3-Achsen-Portalroboter durchgeführt (vgl. Bild 4-2). Die Be- und Entladung der Montagestation sowie der Fräsmaschine erfolgt durch 6-Achsen-Roboter (vgl. Bild 4-3 und 4-4).

---

<sup>16</sup> Fa. Montratech [www.montratec.com](http://www.montratec.com)



*Bild 4-2: Be- und Entladung der Drehmaschine mit einem 3-Achsen-Portalroboter*



*Bild 4-3: Be- und Entladung der Fräsmaschine mit einem 6-Achsen-Roboter*

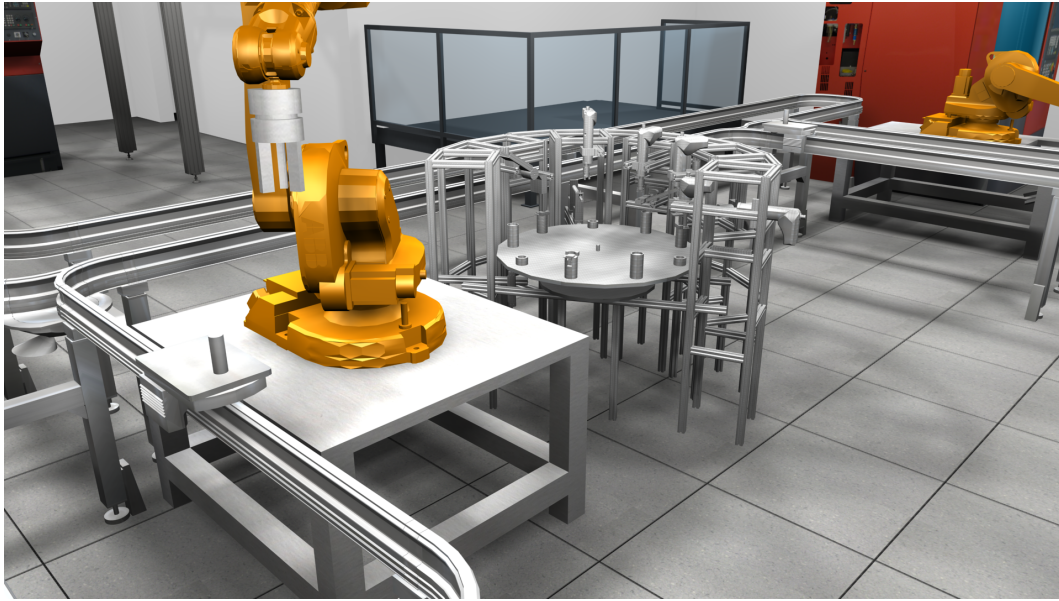


Bild 4-4: Be- und Entladung der Montagestation mit einem 6-Achsen-Roboter

Das zu fertigende Produkt ist eine Taschenlampe. Diese besteht aus mehreren Komponenten, welche z. T. spanend gefertigt werden sollen, und aus Zukaufteilen (vgl. Anhang A1.2). Im Anschluss findet die Montage der Teile in einer Montagestation statt.

Die entwickelte Systematik wird an dem beschriebenen *flexiblen Materialflusssystem* angewendet. Das *flexible Materialflusssystem* ist Teil einer maschinenbaulichen Anlage zur Herstellung von Taschenlampen<sup>17</sup>. Es übernimmt den Materialtransport zwischen den einzelnen Bearbeitungsstationen. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Anlagenentstehungsprozess für das *flexible Materialflusssystem* durchlaufen werden. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Phasen der Systematik aus Bild 4-1 im Detail erläutert.

---

<sup>17</sup> Vgl. Anhang A1.2





## 5 Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen

Das vorliegende Kapitel erläutert das Vorgehen der entwickelten Systematik, den Einsatz der Spezifikationstechnik sowie die Anwendung der Methoden am Beispiel des flexiblen Materialflusssystems. Das Kapitel schließt mit der Bewertung der Systematik anhand der in Abschnitt 2.7 aufgestellten Anforderungen. Die Abschnitte sind in der Regel wie folgt aufgebaut: Zunächst wird die Phase in den Anlagenentstehungsprozess eingeordnet, daraufhin werden die Phasen und Unterphasen mit den jeweiligen Methoden detailliert beschrieben.

### 5.1 Anlagenkonzipierung

Die *Anlagenkonzipierung* ist fachgebietsübergreifend und hat die Prinziplösung der Anlage als Ergebnis. Die Phase besteht aus den Unterphasen *Zielbestimmung*, *Synthese* und *Analyse* (vgl. Bild 5-1). In dieser Phase wird ein Konzept für die Anlage erstellt, das in der anschließenden Phase konkretisiert wird. Dabei werden alle beteiligten Fachdisziplinen mit einbezogen. Dazu gehören neben der mechanischen, elektrischen, regelungstechnischen und softwaretechnischen Konstruktion auch Beteiligte aus der Instandhaltung, Bedienpersonal und Produktentwickler, die das zu fertigende Produkt entwickelt haben. Das gemeinsame Vorgehen ermöglicht ein einheitliches Verständnis für die spätere Ausarbeitung und Inbetriebnahme.

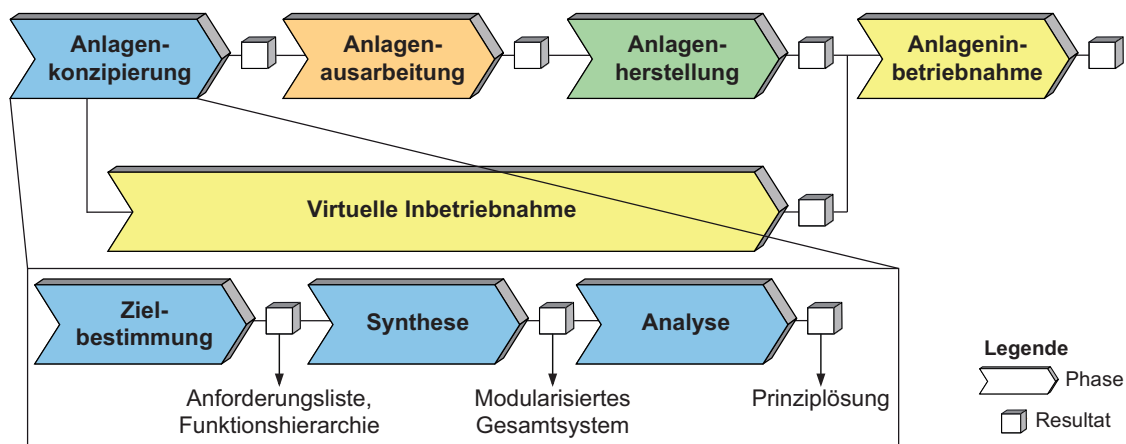


Bild 5-1: Phasen der Anlagenkonzipierung im Anlagenentstehungsprozess

#### 5.1.1 Zielbestimmung

Die Zielbestimmung gliedert sich in die Phasen *Aufgabenanalyse durchführen*, *Umfeldanalyse durchführen*, *Anwendungsszenarien definieren*, *Testszenarien definieren*, *Anforderungsliste erstellen* und *Funktionshierarchie erstellen* (vgl. Bild 5-2).

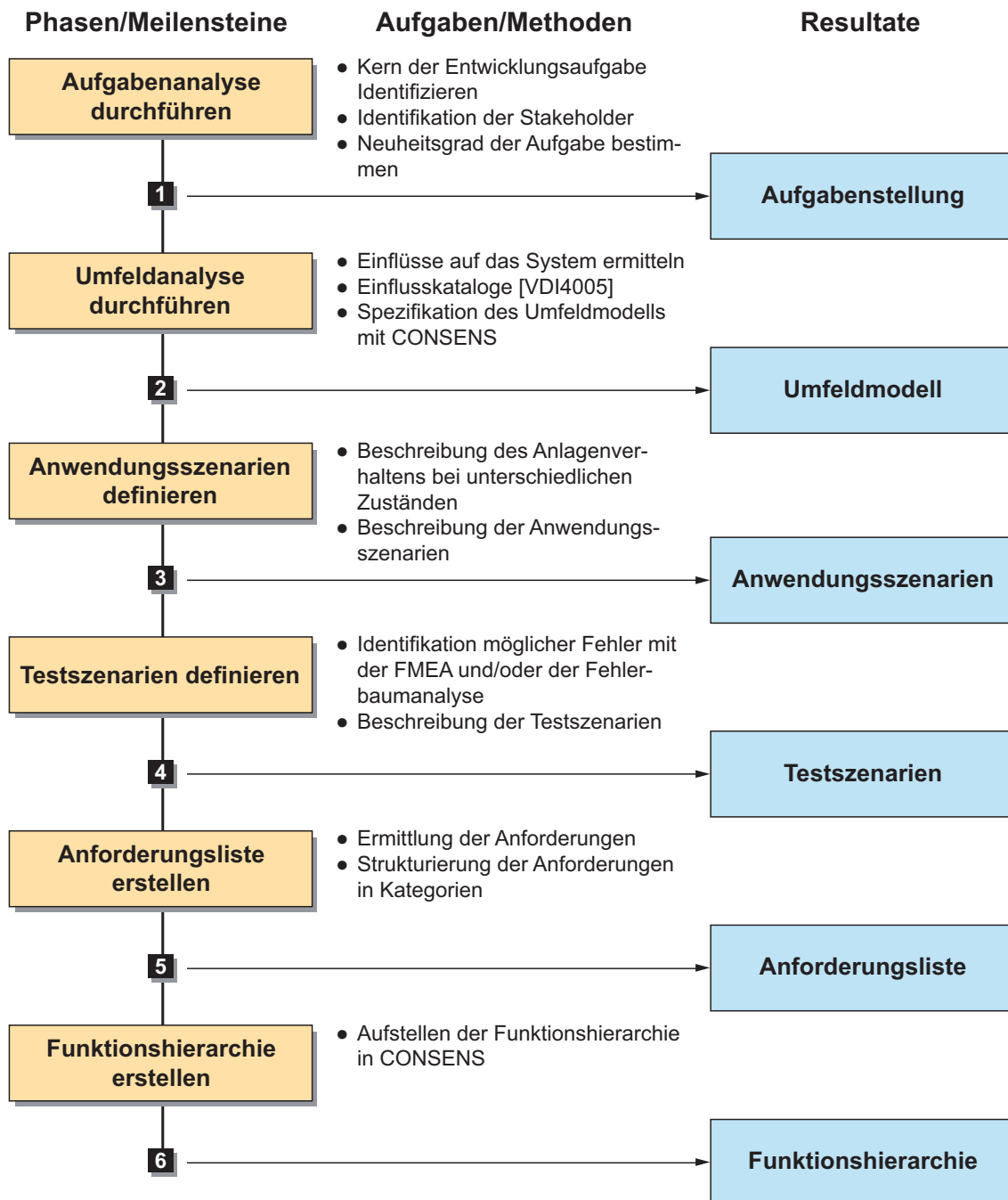


Bild 5-2: Anlagenkonzipierung – Zielbestimmung nach [GSA+11, S. 11]

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen und die Ergebnisse der Phasen beschrieben.

#### 5.1.1.1 Aufgabenanalyse durchführen

In der Aufgabenanalyse wird der Kern der Entwicklungsaufgabe identifiziert. Ein erstes Unterscheidungsmerkmal besteht zwischen internen oder externen Entwicklungsaufträgen. Des Weiteren wird zwischen einer Einzelfertigung und einem Serienprodukt unter-

schieden. Der nächste Punkt betrifft den Neuheitsgrad der Anlage, d. h., ob es sich um eine Neuentwicklung, eine Weiterentwicklung oder um eine Anpassungskonstruktion handelt [VDI2221, S. 6]. In dem jeweiligen Fall wird auf bestehende Informationen zurückgegriffen und der Anlagenentstehungsprozess beschleunigt. In dieser Phase sind auch die Stakeholder zu identifizieren und an dem weiteren Vorgehen zu beteiligen. In die Anlagenkonzipierung sind alle Fachdisziplinen mit einzubeziehen, dazu gehören z. B. der Vertrieb, das Marketing, die Konstruktion, die Fertigung, Montage. Ergebnis ist die zu bearbeitende Aufgabenstellung.

### 5.1.1.2 Umfeldanalyse durchführen

Der nächste Schritt besteht in der Durchführung einer Umfeldanalyse. Das System wird als Black Box betrachtet und die relevanten Einflussbereiche und Einflüsse (z. B. Temperatur, mechanische Belastungen, übergeordnete Systeme, Störungen), die auf das System wirken, werden ermittelt. Einflüsse, die nicht dem Systemzweck dienen, werden als Störgrößen gekennzeichnet. Als Beschreibungsmittel wird das Partialmodell *Umfeld* der Spezifikationstechnik CONSENS verwendet [Fra06].

Bild 5-3 zeigt einen Ausschnitt des Umfeldes des Demonstrators. Elemente des Umfeldes des Montrac sind der *Bediener*, die *Umgebung*, die *Energieversorgung*, das *Programmiergerät* und das *Werkstück*. Darüber hinaus wirken noch weitere mechatronische Systeme auf das Montrac, wie z. B. die *Roboter*. Schon in dieser frühen Phase können Störgrößen, die auf das System wirken, identifiziert werden.

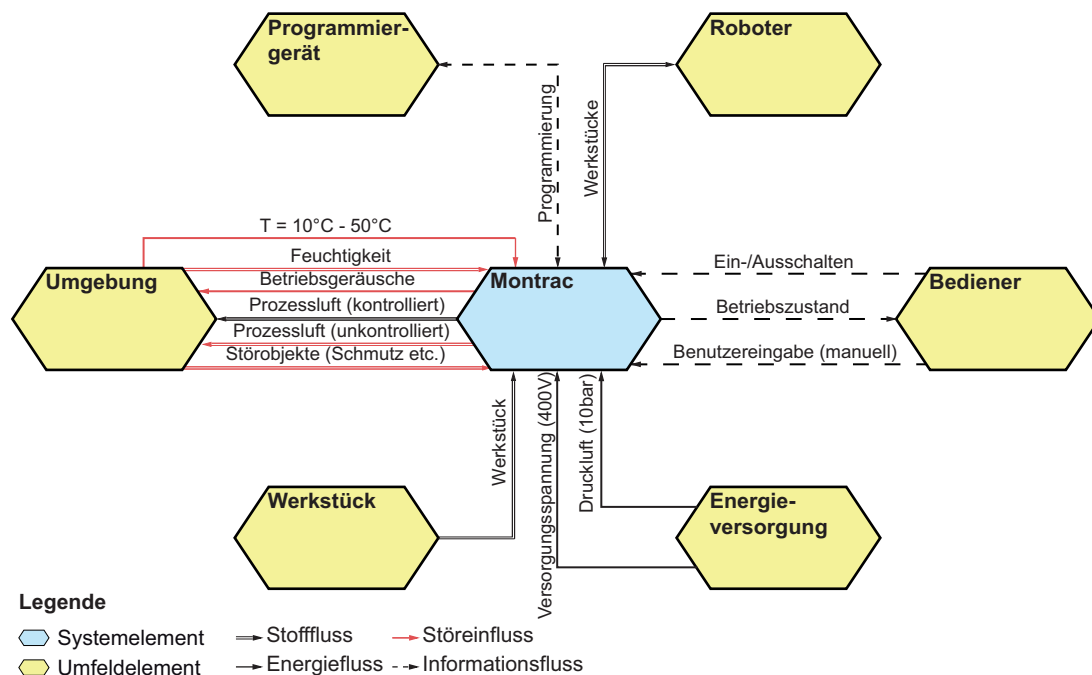


Bild 5-3: Umfeldmodell des Materialflussesystems Montrac (Ausschnitt)

Mögliche Störeinflüsse, die auf das System wirken, sind z. B. Störobjekte, die sich auf der Schiene befinden und so die Shuttles blockieren. Ebenso kann die Prozessluft ein Störeinfluss sein. Tritt sie infolge einer Leckage unkontrolliert in die Umwelt ab, wird dies zu einem Druckverlust im System führen. Daraufhin können Komponenten nicht mehr korrekt arbeiten. Solche Störeinflüsse müssen mit im Steuerungsprogramm für das Montrac beachtet werden und sind später in der VIBN zu berücksichtigen. Sie sind Grundlage für die im späteren Verlauf erstellten Testszenarien.

Die Modellierung der Einflüsse und Störgrößen wird durch Einflusskataloge wie [VDI4005-2], [VDI4005-3], [VDI4005-4], [VDI4005-5] oder [VDI3822-5] unterstützt.

Für die VIBN sind in dieser Phase die Informationen über die Schnittstellen zu weiteren Systemen wichtig. Aus dem Umfeldmodell können externe Einflüsse auf das System abgeleitet werden. Eine Auswahl von Sensoren zur Erfassung der Umwelt wird ermöglicht. So lässt sich aus den Störobjekten auf der Schiene ableiten, dass ein Sensor zur Detektion dieser vorhanden sein muss. Auch Anforderungen an die Steuerungstechnik können abgeleitet werden. So ist ein Zustand im Betriebsprogramm vorzusehen, der auf Objekte auf den Schienen reagiert. Zudem enthält das Umfeldmodell Informationen für die Inbetriebnahme wie bspw. Schnittstellen zur Energieversorgung.

### 5.1.1.3 Anwendungsszenarien definieren

Durch die *Anwendungsszenarien* wird die Komplexität der Entwicklungsaufgabe reduziert. Es erfolgt eine Fokussierung auf einen Ausschnitt der Anlage und das zugehörige Umfeld. Ausgangspunkt für die Beschreibung der Anwendungsszenarien bilden die Umfeldelemente sowie deren Interaktion mit der zu entwickelnden Anlage. In einem Anwendungsszenario werden der betrachtete Systemausschnitt und der Systemaufbau sowie die Lösung zusammengefasst. In ihnen werden grundlegende Betriebszustände beschrieben. Sie spezifizieren, in welcher Art und Weise sich die Anlage in Abhängigkeit von dem Zustand und der Situation des Systems verhalten soll. Ein Anwendungsszenario charakterisiert, wie sich die Anlage in einem bestimmten Fall zu verhalten hat. Es unterstützt bei der Aufnahme von Anforderungen und der Identifikation von Betriebsmodi.

Die *Anwendungsszenarien* werden in Steckbriefen dargestellt. In Bild 5-4 ist das *Anwendungsszenario* für das *Hochlaufen des Systems* abgebildet.

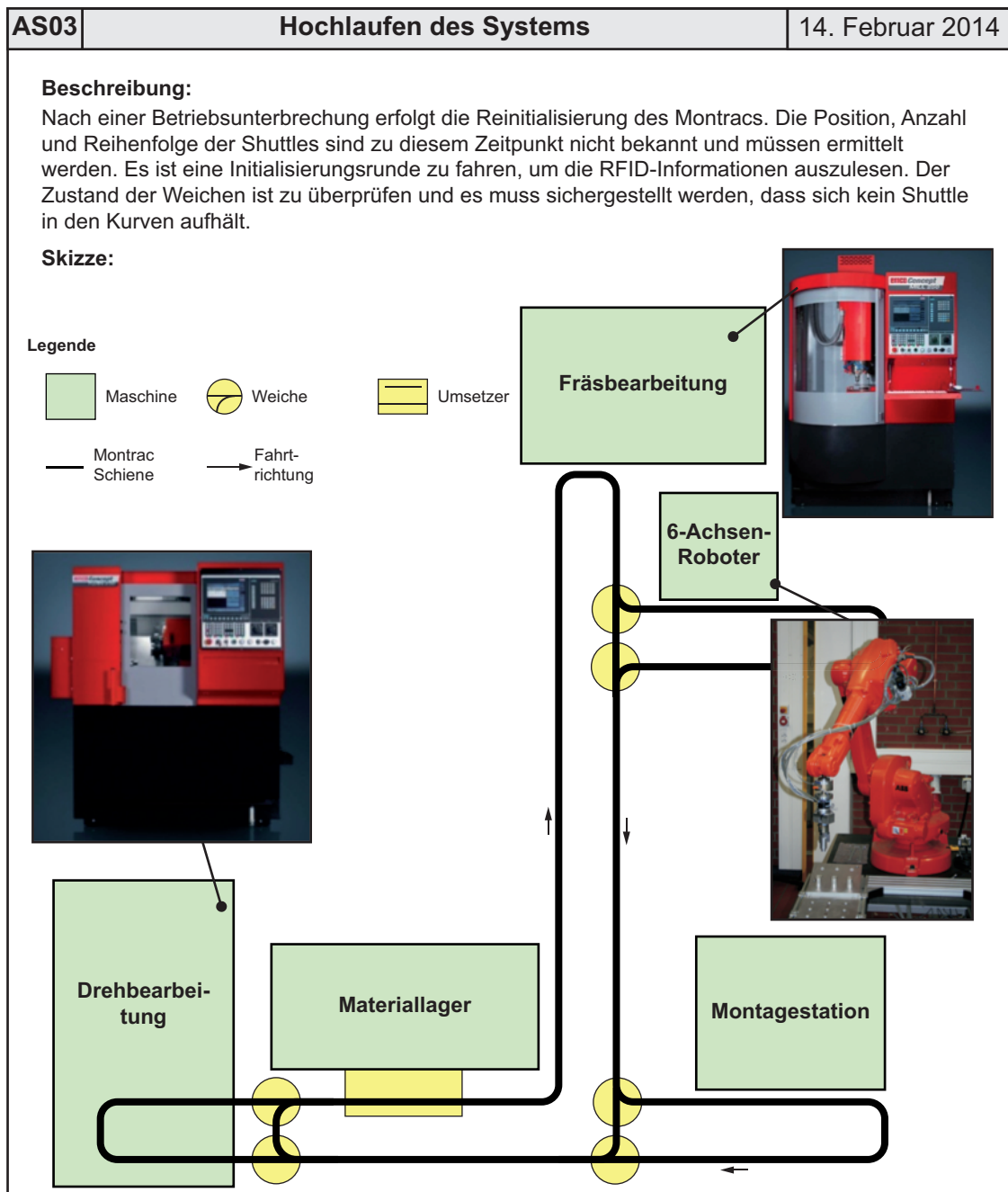


Bild 5-4: Anwendungsszenario – Hochlaufen des Systems

#### 5.1.1.4 Testsznarien definieren

Während der VIBN wird das Steuerungsprogramm anhand von Testfällen verifiziert. Die Testfälle werden aus den beschriebenen Anwendungs- und zusätzlichen Störszenarien abgeleitet. Die *Anwendungsszenarien* umfassen das Betriebsverhalten der Anlage bzw. der Anlagenmodule sowie gewünschte Sonderbetriebsarten (z. B. Wartung, Maschinenhochlauf, Handbedienung etc.). Zu den Sonderbetriebsarten gehört auch das Verhalten der Anlage im Störfall. Der gewünschte Zustand im Störfall wird u. a. durch

das Steuerungsprogramm sichergestellt. Zur Absicherung des Steuerungsprogramms in der VIBN müssen Störfälle simuliert werden. Hierdurch ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Verhaltensmodelle, die normalerweise im modellbasierten Entwurf nicht explizit berücksichtigt werden [Her10, S. 81].

Zur Identifikation möglicher Fehler können die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) [DIN60812] und/oder die Fehlerbaumanalyse [DIN61025] verwendet werden. Aus den identifizierten Fehlern sind anschließend Fehlerszenarien zu generieren. Die zusätzlichen Anforderungen an die Verhaltensmodelle werden aus den Fehlerszenarien abgeleitet. Die Beschreibung der Testsznarien erfolgt analog zur Beschreibung der Anwendungsszenarien.

Im Bild 5-5 ist der Fehlerzustandsbaum für das Entgleisen eines Shuttles dargestellt. Dies kann zum einen durch ein Hindernis auf der Schiene passieren (vgl. Ereignisse 1.2). Zum anderen kann es im Betrieb geschehen, wenn eine Weiche offen ist und das Shuttle nicht vor der offenen Weiche stoppt (vgl. Ereignisse 1.1). Im Falle, dass der Abschnitt vor einer Weiche nicht gesperrt ist oder dass sich ein Shuttle in dem Bereich direkt vor einer Weiche befindet, ist das Fahrverhalten des Shuttles unkontrolliert. Solche Zustände sind durch das Steuerungsprogramm abzufangen.

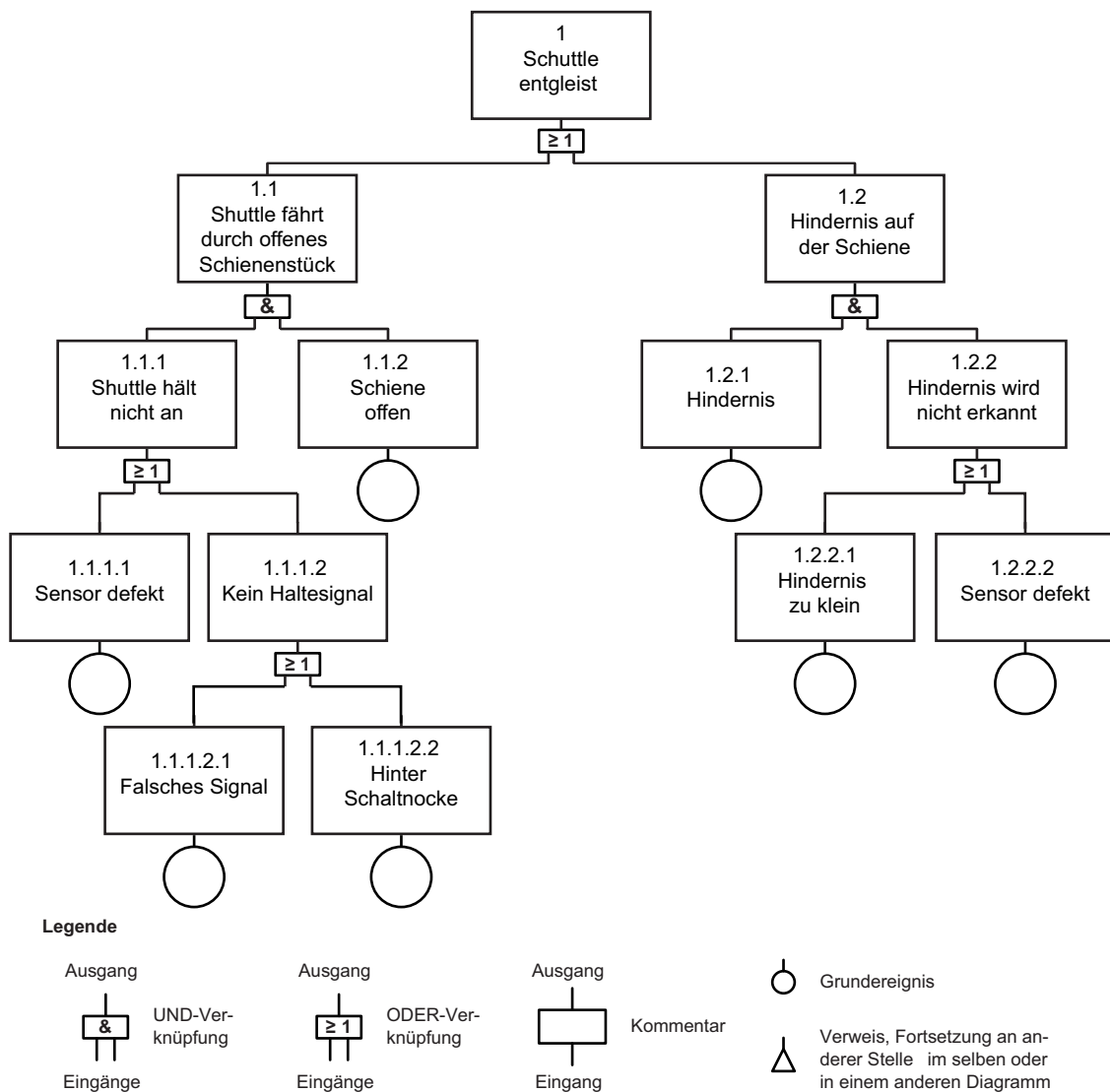


Bild 5-5: Fehlerzustandsbaum für das Entgleisen eines Shuttles

Der Fehlerzustandsbaum für das Entgleisen des Shuttles und das in Bild 5-4 beschriebene Anwendungsszenario wird nun als Testszenario (vgl. Bild 5-6) beschrieben. Die Beschreibung erfolgt dabei analog zu den Anwendungsszenarien. Eingesetzte Hilfsmittel zur Identifikation von Fehlerzuständen, wie z. B. eine FMEA oder ein Fehlerbaum, können in dem Steckbrief festgehalten werden.

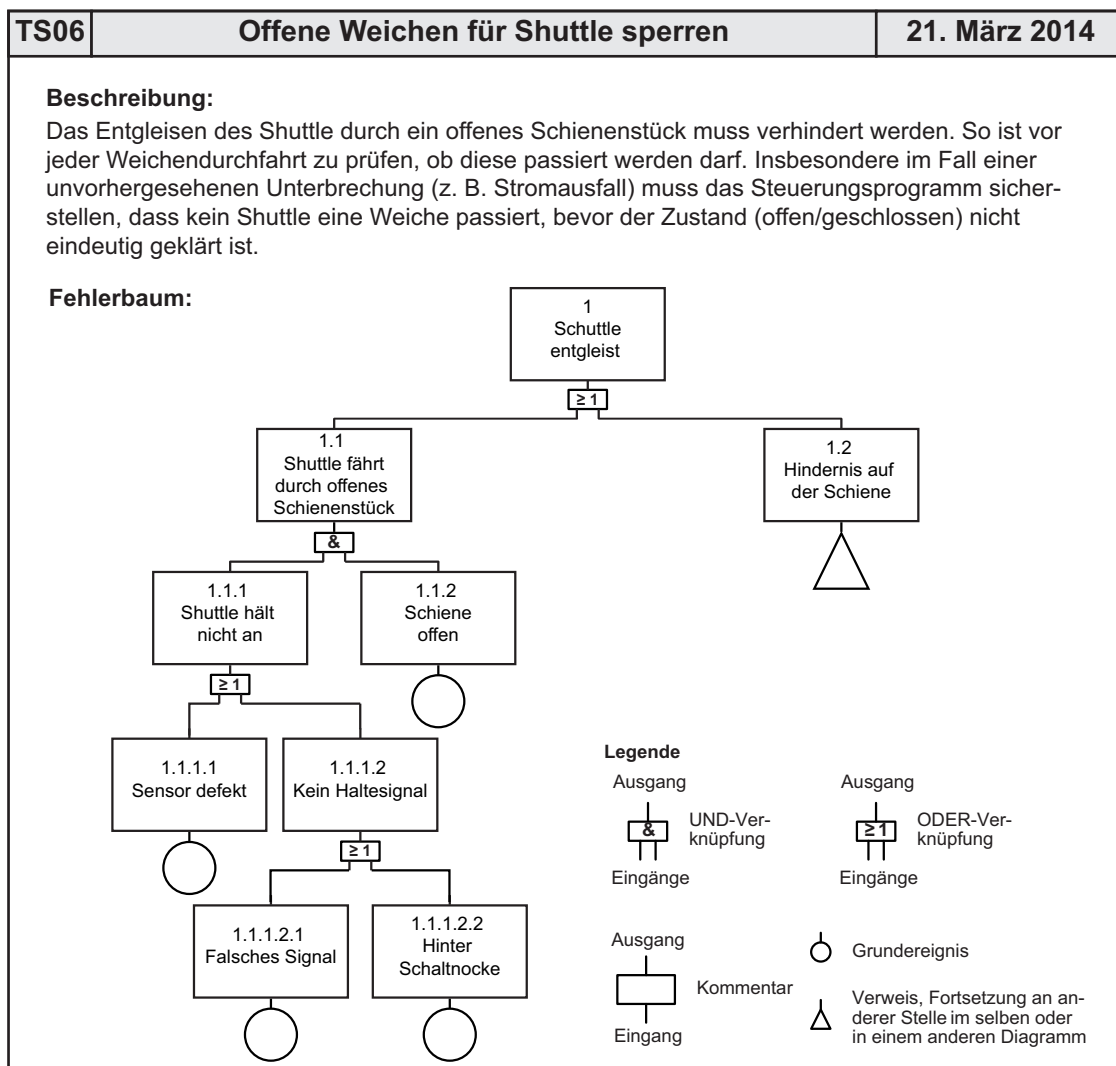


Bild 5-6: Testszenario— Offene Weichen für Shuttle sperren

In dem Testszenario *Offene Weichen für Shuttle sperren* ist beschrieben, welches Verhalten des Systems nicht auftreten darf. Es können auch schon erste Hinweise für das Steuerungsprogramm enthalten sein, wodurch solche ungewollten Zustände verhindert werden. In dem beschriebenen Fall lässt sich das Fehlverhalten dadurch verhindern, dass die Weiterfahrt der Shuttles unterbunden wird und die Weichen in eine Position gebracht werden, dass die Shuttles nicht entgleisen.

Für die VIBN lässt sich aus solch einem Testszenario beispielsweise ableiten, dass die Modelle ein Entgleisen der Shuttles ermöglichen müssen. Dies wäre für eine Simulation der Anwendungsszenarien nicht notwendig. Es ist folglich auch das Entgleisen in den Modellen vorzusehen. Dies könnte in den Verhaltensmodellen beispielsweise durch die Bewegung außerhalb einer Ebene abgebildet werden. Für die Anwendungsszenarien reicht die Bewegungssimulation der Shuttles in einer Ebene aus. Es handelt sich um ein zweidimensionales Problem. Für die Entgleisung könnte die Simulation um eine dritte Dimension erweitert werden.



### 5.1.1.5 Anforderungsliste erstellen

Aus den Partialmodellen *Umfeld*, *Anwendungsszenarien*, *Fehlerszenarien* und der Aufgabenstellung werden die Anforderungen an das System ermittelt. Die *Anforderungsliste* ist eine strukturierte Sammlung der Anforderungen an das System. Während der gesamten Anlagenentstehung wird anhand dieser Liste die Zielerreichung gemessen. Bei den Anforderungen wird zwischen Wunsch- und Festanforderungen unterschieden. Die Anforderungen werden durch Attribute und deren Ausprägungen konkretisiert. Dabei sollten die Anforderungen möglichst quantifizierbar sein. Bild 5-7 zeigt einen Ausschnitt der Anforderungsliste für das Montrac.

Stand: 4. April 2014 ersetzt:		<b>Anforderungsliste Montrac</b>			Blatt 1	Seite 1
Änderung	F/W		Anforderungen	Änderung	Bear.	
		<b>1</b>	<b>Geometrie</b>			
	F	1.1	Werkstückgewicht bis 2 kg			
	F	1.2	Werkstückabmessungen < 200 x 300 mm			
	F	1.3	Arbeitshöhe ca. 900 mm			
	F	1.4	...			
	F	<b>4</b>	<b>Flexibilität</b>			
	F	4.1	Keine feste Bearbeitungsreihenfolge der Werkstücke			
	F	4.2	Transport von unterschiedlichen Werkstücken			
	F	4.3	Transportzeit (Anzahl Shuttle)			

Bild 5-7: Anforderungsliste des Materialflusssystems Montrac (Ausschnitt)

### 5.1.1.6 Funktionshierarchie erstellen

Aus den Anforderungen werden die Funktionen abgeleitet. In der *Funktionshierarchie* werden die Funktionen, die die Anlage erfüllen soll, beschrieben, gegliedert und grafisch dargestellt. Sie wird als Kreativitätstechnik eingesetzt, um die Gesamtfunktion des Systems zu strukturieren und in Teilfunktionen zu untergliedern. Eine Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen. Eine Untergliederung der Funktionen erfolgt so lange, bis zu den Funktionen sinnvolle Lösungen gefunden werden. Bild 5-8 zeigt einen Ausschnitt der Funktionshierarchie des Materialflusssystems<sup>18</sup>.

Die Hauptfunktion des Materialflusssystems ist das Bereitstellen von Material. Untergeordnete Funktionen sind die Be- und Entlademöglichkeit, das Führen der Bewegung, der Materialtransport, die Steuerung des Systems, die Möglichkeit für die Interaktion mit dem Benutzer, die Gewährleistung der Energieversorgung sowie die Gewährleistung der Druckluftversorgung und der Sicherheit. Diesen Funktionen können weitere Unterfunktionen zugeordnet werden. Beispielsweise ist die Fixierung des Transportmittels eine Unterfunktion der Be- und Entlademöglichkeit.

<sup>18</sup> Für die gesamte Funktionshierarchie siehe Anhang A1.3

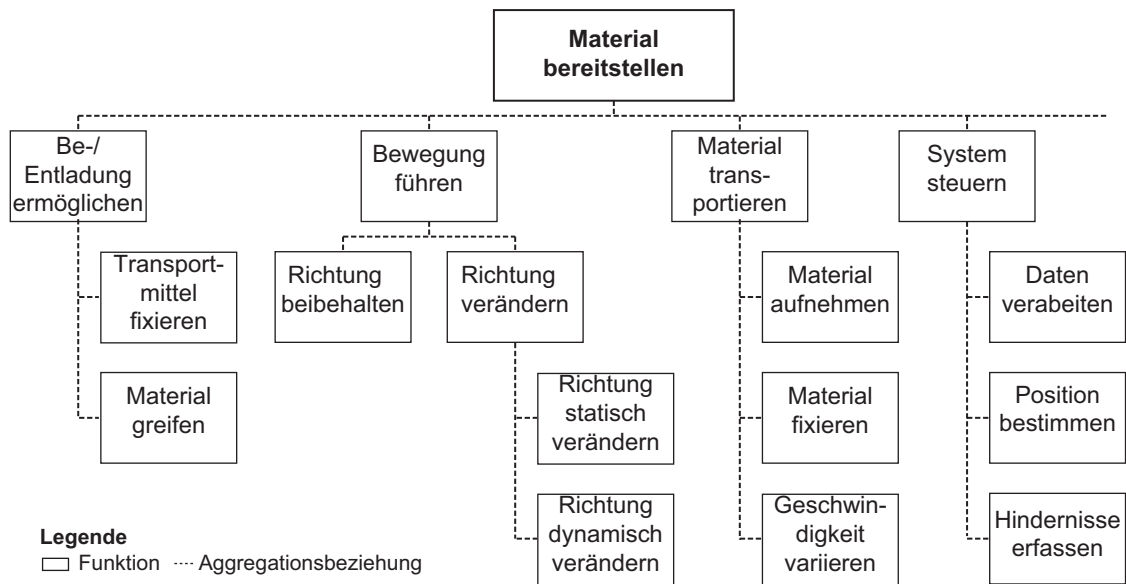


Bild 5-8: Funktionshierarchie des Materialflusssystems Montrac (Ausschnitt)

In dem beschriebenen funktionsorientierten Ansatz nach PAHL/BEITZ werden die Funktionen des Systems aufgestellt. Dabei ist die Funktionserfüllung noch unabhängig von der Fachdisziplin, die sie erfüllt. Dennoch bilden sich häufig Funktionsblöcke aus, die eindeutig einer Fachdisziplin zugeschrieben werden können. Im beschriebenen Beispiel wird *System steuern* als ein Funktionsblock aufgestellt. Für den mechatronischen Entwurf und die VIBN sind solche Module jedoch nicht gut geeignet. Das Potential eines mechatronischen Systems wird so nicht vollständig genutzt. Ebenso ist die Wiederverwendbarkeit von solchen Modulen eingeschränkt. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt eine Methode beschrieben, die die Anlage nach mechatronischen Gesichtspunkten modularisiert und dabei fachdisziplinenübergreifend vorgeht (vgl. Abschnitt 5.1.2.4).

### 5.1.2 Synthese

Mit der Aufstellung der *Funktionshierarchie* ist die Zielbestimmung abgeschlossen. Im nächsten Schritt erfolgt nun die Synthese eines ersten Konzeptes für die maschinenbauliche Anlage (vgl. Bild 5-9). Dabei werden die Schritte *Prozessfolge aufstellen*, *Lösungsmuster suchen*, *Wirkstruktur erstellen*, *System modularisieren*, *Verhaltensmodelle erstellen*, *Grobgestalt erstellen*, *Module konzipieren* und *Module integrieren* durchlaufen. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte detaillierter beschrieben.

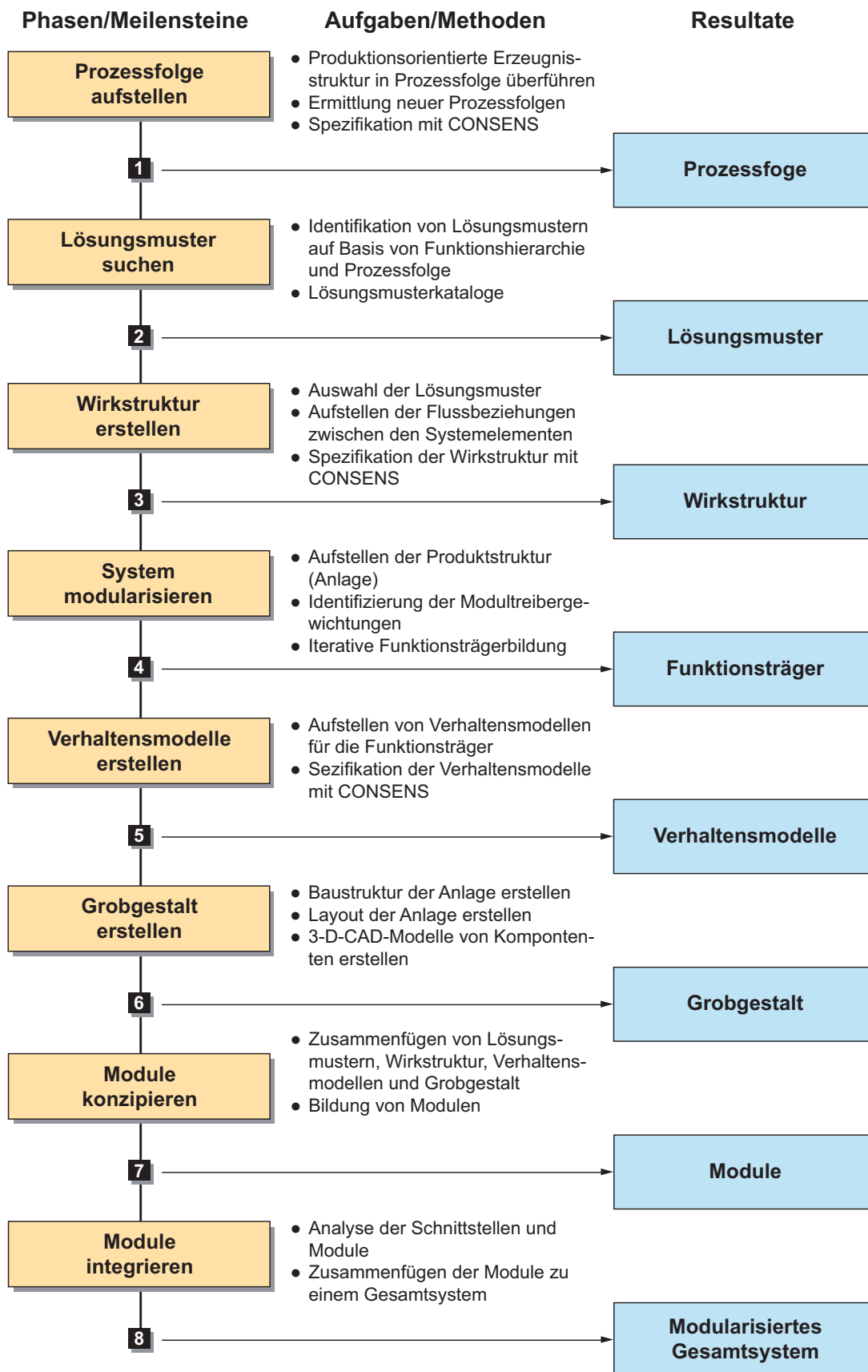


Bild 5-9: Anlagenkonzipierung – Synthese

### 5.1.2.1 Prozessfolge aufstellen

In Abgrenzung zur Produktentwicklung ist eine funktionale Sicht auf eine maschinenbauliche Anlage nicht ausreichend. Die bestehenden Entwicklungssystematiken für Produktionssysteme enthalten auch immer eine prozessorientierte Sicht auf das System. Aus diesem Grund ist neben der Funktionshierarchie noch die Prozessfolge aufzustellen. Sie ist die erste Phase der Synthese, da die Reihenfolge der Prozesse evtl. nicht im ersten Durchlauf festgelegt ist, sondern im Zuge der Synthese definiert wird. Bei flexiblen Fertigungssystemen werden z. B. nur Prozessabschnitte definiert, die Reihenfolge der Prozesse bleibt offen.

Für das Aufstellen der Prozessfolge wird das Verfahren nach NORDSIEK angewendet<sup>19</sup>. Voraussetzung dafür ist eine produktionsorientierte Erzeugnisstruktur des zu fertigenden Produktes<sup>20</sup>. Die produktionsorientierte Erzeugnisstruktur wird in eine erste Prozessfolge überführt. Dazu werden zwischen den gestaltbehafteten Systemelementen des Produktes (Bauteile und Baugruppen) Füge- bzw. Montagevorgänge eingeführt. Im Bild 5-10 ist eine erste Prozessfolge für das Produkt Taschenlampe abgebildet, bei dessen Fertigung der Demonstrator *flexibles Materialflusssystem* genutzt wird.

In der Phase *Bestimmung der zu fertigenden Elemente* wird die Entscheidung getroffen, ob ein Systemelement hergestellt oder zugekauft werden soll. Bei der Anlagenkonzipierung ist diese Entscheidung schon gefallen und in den Anforderungen an die Anlage enthalten. Die *Ergänzung bekannter Produktionsprozesse* ist für das weitere Vorgehen von großer Bedeutung. Auf Basis der bekannten Prozessfolgen können in der nächsten Phase (*Lösungsmuster suchen*)<sup>21</sup> Lösungsmuster identifiziert werden. Ist ein Rückgriff auf bekannte Prozessfolgen nicht möglich, werden diese in der Phase *Ermitteln neuer Produktionsprozesse* bestimmt. Dabei können ggf. alternative Prozessfolgen erarbeitet werden. Im Gegensatz zu dem Vorgehen nach NORDSIEK ist es im Anlagenentstehungsprozess an dieser Stelle noch nicht notwendig, dass eine konkrete Prozessfolge ausgewählt wird. Es können noch konstruktive Änderungen an der Anlage vorgenommen werden, so dass eine Bewertung noch nicht möglich ist. Die Auswahl erfolgt in der Analysephase<sup>22</sup>, wenn alle Informationen für das Anlagenkonzept vorhanden sind.

---

<sup>19</sup> Vgl. Abschnitt 2.3.2 und [Nor12, S. 113ff.]

<sup>20</sup> Das Verfahren zur Erstellung der produktionsorientierten Erzeugnisstruktur wird in [Nor12, S. 107f.] beschrieben.

<sup>21</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.2

<sup>22</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.1

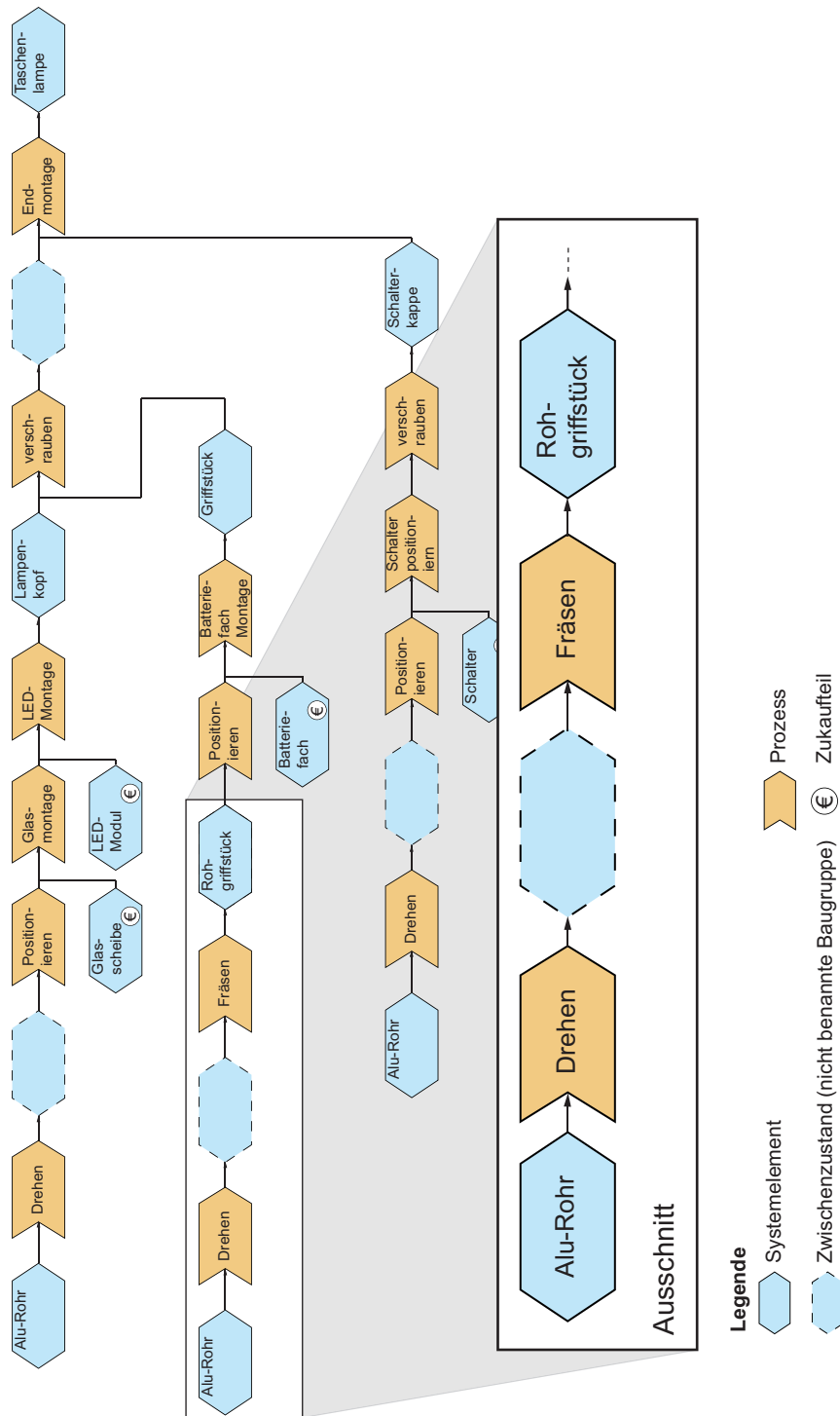


Bild 5-10: Erste Prozessfolge mit Füge- und Montagevorgängen für die Taschenlampe nach [Nor12, S. 114]

Ausgehend von dieser ersten Prozessfolge sind nach NORDSIEK noch die Prozesse *Bestimmung der zu fertigenden Elemente*, *Ergänzung bekannter Produktionsprozesse*, *Ermittlung von Produktionsprozessen* und die *Spezifikation der Prozessfolge* zu durchlaufen.

Im letzten Schritt erfolgt die *Spezifikation des Produktionsprozesses* mit der Spezifikationstechnik CONSENS<sup>23</sup>. Mit den Informationen aus den vorangegangenen Phasen wird das Partialmodell *Prozessfolge* um die entsprechenden Prozesse und Systemelemente ergänzt. Die Informationen fließen in die weitere Anlagenkonzipierung ein und im nächsten Schritt können die Lösungsmuster auf Basis der Funktionen und Prozesse gesucht werden.

#### 5.1.2.2 Lösungsmuster suchen

Ausgehend von der Funktionshierarchie und der Prozessfolge sind in dieser Phase Lösungsmuster bzw. die Konkretisierung Lösungselemente zu suchen. Lösungselemente sind realisierte und bewährte Lösungen zur Erfüllung einer Funktion oder eines Prozesses in der Anlage. Es wird zwischen materiellen (Bauteilen, Baugruppen etc.) und immateriellen (Reglern, Steuerungsbausteinen etc.) Lösungselementen unterschieden. Die Lösungselemente werden mit der Spezifikationstechnik CONSENS beschrieben, wobei Lösungselemente in unterschiedlichen Konkretisierungsstufen vorliegen, den jeweiligen Entwicklungsstufen entsprechend.

Maschinenbauliche Anlagen werden hauptsächlich aus bestehenden Lösungselementen zusammengesetzt. Meist sind nur für einzelne Teilfunktionen oder Prozessfolgen neue Lösungen zu entwickeln. Jedoch ist die Integration der Teilsysteme mit einer übergeordneten Steuerung bei jeder Anlage eine neue Herausforderung. Die Verifikation der Steuerung erfolgt im Anschluss mit der VIBN.

In den Lösungsmustern bzw. -elementen ist das gesamte vorhandene Wissen enthalten. So sind in ihnen auch Informationen von Experten abgelegt. Die Experten besitzen über den Teil des Systems, an dem sie beteiligt sind, ein hohes Maß an Wissen. Dabei handelt es sich z. T. um implizites Wissen. So sind den Experten Zusammenhänge oder negative Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen bekannt. Diese Informationen sind in den Lösungsmustern abzulegen, da sie bei der Auswahl notwendig sind.

Zur Überführung des kontextbezogenen Wissens in explizites Wissen wurde von NONAKA/TAKEUCHI das sog. SECI-Modell (Socialisation, Externalization, Combination, Internalization) entwickelt [NT12, S. 79ff.]. Für die erfolgreiche Externalisierung des Lösungswissens ist eine nachvollziehbare allgemeine Beschreibung Voraussetzung. Die allgemeine Beschreibung in unterschiedlichen Fachdisziplinen kann auf Basis der Spezifikationstechnik CONSENS geschehen, wie es z. B. im Projekt ENTIME<sup>24</sup> (Entwurfstechnik intelligente Mechatronik) genutzt wird. Für den Einsatz in der Anlagengestaltung und der VIBN sind die Lösungsmuster um die Partialmodelle für die

---

<sup>23</sup> Vgl. Abschnitt 2.3.2

<sup>24</sup> Vgl. [GSA+11, S. 16f.]

Testszenarien und die Prozessfolgen<sup>25</sup> zu erweitern. So wird auch auf diese Informationen in der Anlagenkonzipierung zurückgegriffen.

Die Suche nach geeigneten Lösungsmustern wird z. B. durch morphologische Kästen [PBF+07, S. 159] oder Konstruktionskataloge [Rot00] unterstützt. Im Projekt ENTIME ist eine Methode entwickelt worden, die den fachgebietsübergreifenden Austausch von Modellen unterstützt. Dabei werden semantische Technologien eingesetzt, um den Entwickler mit seiner funktionsorientierten Sicht und den Anbieter von Lösungen (z. B. Motoren) mit der lösungsorientierten Sicht zusammenzubringen. Das Softwaretool Mechatronic Modeller bietet eine softwaretechnische Unterstützung der Spezifikationstechnik CONSENS. Damit ist es möglich, die erstellten Partialmodelle (insbesondere Anforderungen, Funktionshierarchie und Prozessfolge) rechnerintern abzubilden. Im Projekt ENTIME sind Inferenzmechanismen entwickelt worden, um mögliche Lösungsmuster zu suchen und dem Entwickler zur Verfügung zu stellen. Auf Basis der vorgeschlagenen Lösungsmuster wird anschließend die Wirkstruktur aufgebaut. Die weiteren in den Lösungsmustern enthaltenen Aspekte werden in den anschließenden Phasen verwendet. Damit ist die Phase abgeschlossen und es wird mit der Aufstellung der Wirkstruktur begonnen.

### 5.1.2.3 Wirkstruktur erstellen

Basierend auf den Lösungsmustern bzw. Lösungselementen erfolgt die Modellierung der *Wirkstruktur*. Lösungsmuster können in Form von Wirkprinzipien oder Lösungselementen vorliegen. Wirkprinzipien sind eine allgemeine Beschreibung des Zusammenhangs von physikalischen Effekten und den stofflichen sowie geometrischen Merkmalen [PBF+07, S. 195f.]. Lösungselemente stellen bereits realisierte und bewährte Lösungen dar. Das Ziel der Synthese ist es, die *Wirkstruktur* so weit zu verfeinern, dass ein modularisiertes Gesamtsystem vorliegt. Bei dem ersten Durchlaufen der Phase werden aus diesem Grund hauptsächlich Wirkprinzipien identifiziert, die in den folgenden Phasen detailliert werden. Die identifizierten Lösungen werden zueinander in Beziehung gesetzt. Es sollen die grundsätzliche Struktur und die prinzipiellen Wirkungsweisen des Systems abgebildet werden. Ausgangspunkt ist das Black-Box-Modell des *Umfeldmodells*, das detailliert wird.

Die einzelnen Bestandteile des Systems werden in Form von Systemelementen modelliert. In Abhängigkeit vom Konkretisierungsgrad handelt es sich dabei um abstrakte Wirkprinzipien, Muster der Softwaretechnik als auch um Module, Bauteile oder Software-Komponenten. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sowie logische Beziehungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen. Die Beziehungen können ein- oder zweiseitig gerichtet sein. Im weiteren Verlauf der Anlagenkonzipierung werden die Systemelemente weiter konkretisiert und detailliert. Um die Über-

---

<sup>25</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.4 und 5.1.2.1

sichtigkeit zu gewährleisten, wird eine Hierarchisierung des Systems vorgenommen. Auf Basis der Wirkstruktur erfolgt in den nächsten Phasen die Modularisierung.

Im Bild 5-11 ist ein Auszug der *Wirkstruktur* des Demonstrators gezeigt. Der Fokus in dem Ausschnitt liegt auf den Informations- und den Energieflüssen. Bei den Energieflüssen sind nur die mechanischen Verbindungen eingezeichnet.

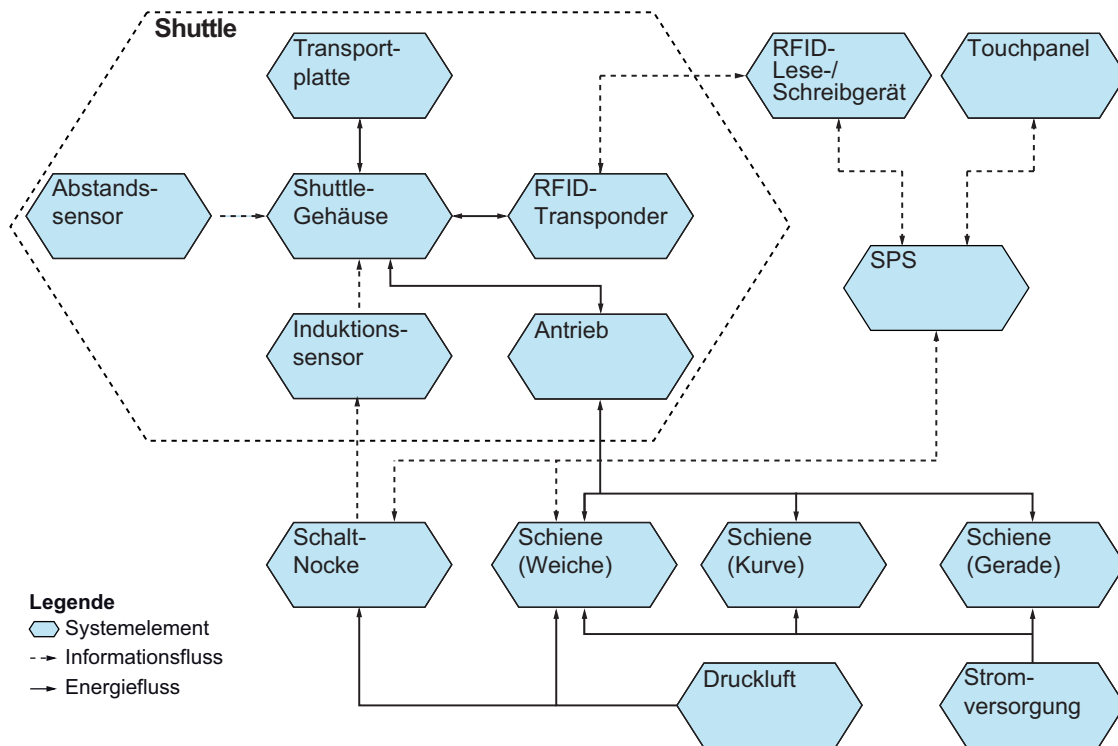


Bild 5-11: Wirkstruktur des Materialflusssystemes Montrac (Ausschnitt)

Bei dem Demonstrator findet kein direkter Informationsfluss zwischen dem Shuttle und der SPS statt. Die Informationen werden von der SPS über das RFID-Lese-/Schreibgerät an den RFID-Transponder ausgetauscht. Über den Transponder können die unterschiedlichen Shuttles identifiziert werden. Die Shuttlegeschwindigkeit wird von einer Steuerung im Shuttle geregelt. Einfluss auf die Geschwindigkeit haben zum einen die Nocken, welche über den Induktionssensor detektiert werden, und zum anderen der Abstandssensor. Bei den Nocken wird zwischen passiven und aktiven Schaltnocken unterschieden. Die passiven Schaltnocken sind fest mit den Schienen verbunden und sorgen dafür, dass das Shuttle langsam oder schnell fährt. Aktive Schaltnocken werden wie auch die Weichen von der SPS gesteuert und lassen das Shuttle stoppen oder langsam fahren. Mittels der Schaltnocken und der Weichen wird die Bewegung des Shuttles gesteuert.



#### 5.1.2.4 System modularisieren

Für die Modularisierung von maschinenbaulichen Anlagen gibt es verschiedene Methoden, die sich hauptsächlich darin unterscheiden, an welcher Stelle sie im Entwicklungsprozess ansetzen und für welche Art (modular/integral) von Produkten<sup>26</sup> sie geeignet sind. Im Rahmen der Systematik zur Integration der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess wird ein Vorgehen angewendet, das sich an der Methode METUS<sup>27</sup> von GÖPPFERT [Göp98] orientiert. Es bietet den Vorteil, dass es die bestehenden Informationen nutzt und auch mit einer unvollständigen Datenbasis arbeiten kann. Oftmals wird bei maschinenbaulichen Anlagen auf bestehende Anlagenteile zurückgegriffen, was durch die Methode ebenfalls unterstützt wird. Handelt es sich jedoch um eine komplette Neuentwicklung der Anlage, ist ggf. eine andere Methode zur Modularisierung anzuwenden<sup>28</sup>.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Methode ist die Bildung von Modulen auf Basis von Funktionsträgern. Ein Funktionsträger ist ein Systemelement, dem ein oder mehrere Funktionen zugeordnet werden. Diese Funktionsträger werden anschließend zu Modulen zusammengesetzt.

Die Methode gliedert sich in die vier Phasen *Ziele und Anforderungen ermitteln*, *Modultreibergewichtungen identifizieren*, *Produktstruktur aufstellen* und *Funktionsträger iterativ bilden* (vgl. Bild 5-12), die im Folgenden beschrieben werden. Bei der Anwendung der Methode kann es zu Rücksprüngen und Iterationen kommen.

##### **Ziele und Anforderungen ermitteln**

In der ersten Phase werden die Ziele und Anforderungen an die maschinenbauliche Anlage hinsichtlich der Modularisierung ermittelt. Es handelt sich demzufolge um eine Teilmenge der Anforderungen aus Abschnitt 5.1.1.5. Auf diese Anforderungsliste wird im Weiteren zurückgegriffen. Sie wird jedoch um Aspekte erweitert, die insbesondere die Modularisierung betreffen, bzw. Aspekte, die nicht für die Modularisierung relevant sind, werden nicht berücksichtigt.

---

<sup>26</sup> Vgl. Abschnitt 3.2

<sup>27</sup> Vgl. Abschnitt 3.3.4

<sup>28</sup> Mögliche Methoden finden sich in Abschnitt 3.2.

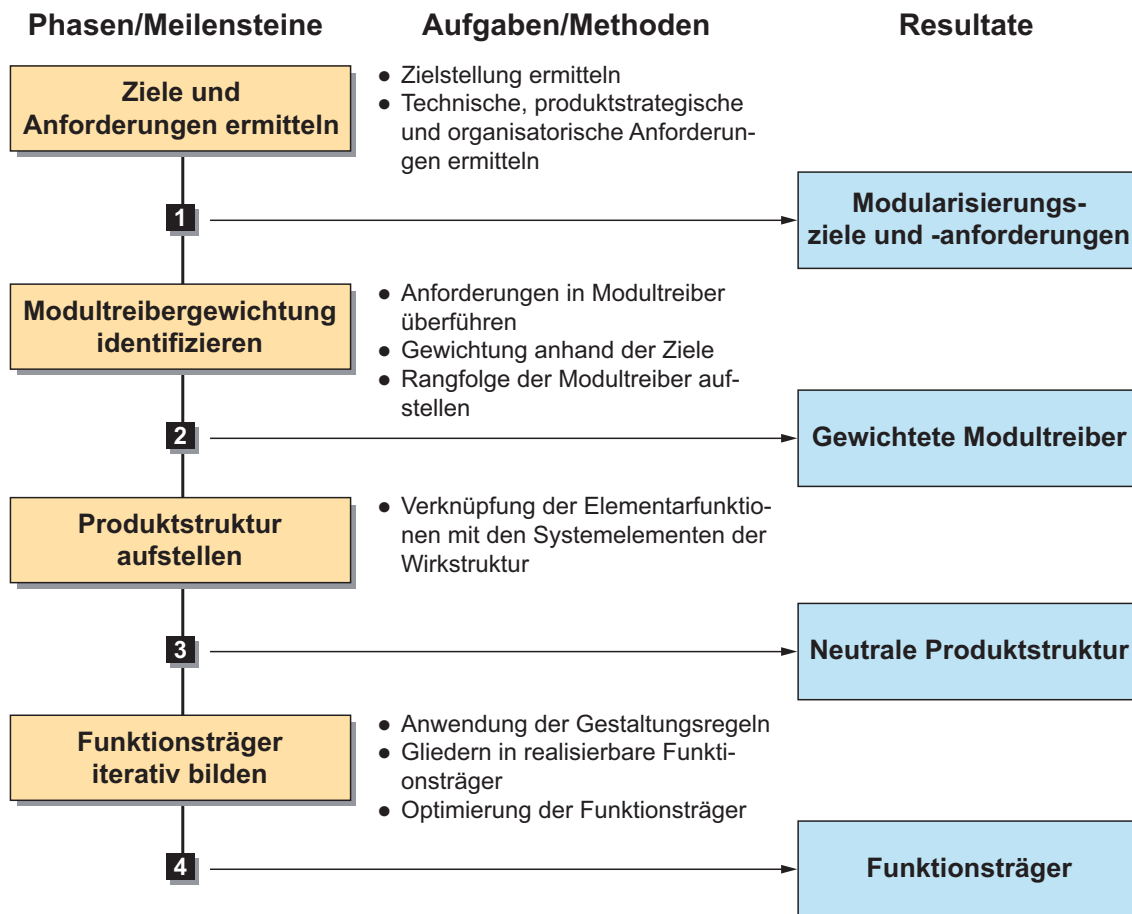


Bild 5-12: Vorgehensweise zur Modularisierung

Die Anforderungen setzen sich dabei aus einem Merkmal und einer Ausprägung zusammen. Das Merkmal beschreibt das Bezugsobjekt und die Ausprägung den jeweiligen Wert [Lin07, S. 107]. Es lassen sich folgende Anforderungstypen unterscheiden [Ehr09, S. 378]:

- **Technische Anforderungen:** Diese beschreiben technische, messbare Anforderungen direkt an die maschinenbauliche Anlage. Beispiele sind Geometrie, Gewicht, Kinematik, Stoff etc. In diese Gruppe fallen auch Anforderungen an die Herstellung der Anlage wie Prüfung, Montage, Transport sowie solche, die den weiteren Lebenszyklus betreffen, wie Lebensdauer, Verschleiß, Recycling etc. Aus der Gesamtheit der technischen Anforderungen werden nun jene übernommen, die für die Modularisierung wichtig sind. Für den Demonstrator ist dies z. B. die Anforderung, dass die Schienen austauschbar sind.
- **Produktstrategische Anforderungen:** In diese Gruppe fallen strategische, produktbezogene und unternehmensbezogene Anforderungen. Kostenbezogene Anforderungen wie Gesamt-, Fertigungs- und Inbetriebnahmekosten zählen hierzu, darüber hinaus Normen, Prüfvorschriften und Patente. Zu den produktstrategischen Anforderungen gehört beim Demonstrator z. B., dass das HMI auswechselbar sein

soll. Es soll möglich sein, Varianten mit unterschiedlichen HMIs anzubieten. Solche produktstrategischen Anforderungen beeinflussen die Modularisierung enorm, wenn integrale oder modulare Anforderungen vorgegeben werden oder Baukastenkonzepte umgesetzt werden sollen.

- **Organisatorische Anforderungen:** Zu den organisatorischen Anforderungen zählen Aspekte wie der Terminplan, Zulieferzeiten, Reparaturzeiten, Kapazitäten sowie Aufbau- und Ablauforganisation. Organisatorische Anforderungen beeinflussen die Modularisierung von Anlagen außerordentlich, wenn hierdurch festgelegt wird, dass bestimmte Teile von anderen Standorten des Unternehmens oder extern gefertigt werden sollen.

Neben den Anforderungen gehen auch Gestaltungsregeln und Modularisierungsprinzipien in die Ermittlung der Ziele und Anforderungen ein. Zum Abschluss der Phase werden die Ziele und Anforderungen an die Modularisierung beschrieben.

### **Modultreibergewichtung identifizieren**

In der nächsten Phase müssen Modultreiber identifiziert und anschließend gewichtet werden. Die Modultreiber geben Gestaltungsregeln für die Bildung von Funktionsträgern aus der neutralen Produktstruktur vor. Im Folgenden werden die fünf allgemeinen Modultreiber erläutert:

- **Entkopplung:** Ziel des Modultreibers Entkopplung ist eine minimale Anzahl an Schnittstellen zwischen den Funktionsträgern. Die Wechselwirkungen zwischen den Funktionsträgern werden somit reduziert. Durch eine geringe Anzahl von Schnittstellen wird der Aufwand für Veränderungen an der Anlage reduziert. Ein Austausch von Funktionsträgern, z. B. im Zuge einer Anpassung, wirkt sich nur auf Funktionsträger aus, die eine Schnittstelle besitzen. Eine solche Entkopplung erhöht die Robustheit des Systems gegenüber Veränderungen.

Bei der Anwendung des Modultreibers wird geprüft, ob die Systemelemente voneinander entkoppelt werden können. Im ersten Schritt werden dazu solche Systemelemente zusammengefasst, die direkt in Beziehung stehen. Beim Demonstrator sind das z. B. die Sende- und Empfangseinheiten des Lichtvorhangs. Diese beiden stehen in einer Beziehung zueinander (Lichtstrahl), die nicht von anderen beeinflusst wird. Die weiteren Schnittstellen (Stromversorgung, Signalfluss) sind ähnlich. Werden die Sende- und Empfangseinheiten zu einem Funktionsträger zusammengefasst, fällt die Schnittstelle Lichtstrahl weg. Sie wird nur noch im Funktionsträger berücksichtigt, nicht jedoch im Gesamtsystem.

Anforderungen, die für eine hohe Gewichtung des Modultreibers sorgen, sind z. B. produktstrategische Anforderungen. Die Anforderung, dass ein Technologiewechsel bei einem Anlagenteil möglich ist, gehört beispielsweise dazu. Darüber hinaus ist dieser Modultreiber generell anzuwenden, um die Vorteile eines modularen

Konzeptes einer Anlage zu nutzen. Er stellt sicher, dass durch die Einführung der Module keine neuen Herausforderungen in der Entwicklung eingeführt werden.

- **Hierarchisierung:** Ziel dieses Modultreibers ist eine reduzierte Modulkomplexität. Ausgehend von der Funktionshierarchie werden die Systemelemente zu Funktionsträgern hierarchisiert. Es ergibt sich eine funktionsorientierte Strukturierung der Anlage, bei der die Module jeweils spezifische Funktionen unabhängig von anderen Modulen erfüllen.

Zunächst werden solche Systemelemente zusammengefasst, die gemeinsam eine Teilfunktion erfüllen. Bei dem Materialflusssystem erfüllen z. B. die Sende- und Empfangseinheiten die Teilfunktion *Schutz des Mitarbeiters*. Sind Systemelemente jeweils unterschiedlichen Teilfunktionen zugeordnet und erfüllen diese Teilfunktionen gemeinsam eine Hauptfunktion, dann sind diese Systemelemente auch zu einem Funktionsträger zusammenzuziehen. Erfüllen Systemelemente mehrere Teilfunktionen, die unterschiedlichen Hauptfunktionen zugeordnet sind, können sie zu Funktionsträgern zusammengefasst werden, was aber nicht unbedingt erforderlich ist. Wird dieser Modultreiber am Anfang eingesetzt, ist in den meisten Fällen eine Funktionsträgerbildung nicht notwendig. Es ist dabei immer abzuwägen, welche Funktion für die Gesamtanlage von größerer Bedeutung ist und ob das Systemelement zwingend zugeordnet werden muss.

Dieser Modultreiber ist immer dann von hohem Rang, wenn die Anlage in unterschiedlicher funktionaler Ausstattung (z. B. mit oder ohne Roboterschnittstelle) angeboten wird. In solchen Fällen bietet sich dieser Modultreiber an.

- **Simulierbarkeit:** Das Ziel dieses Modultreibers sind simulierbare Module der Anlage. So können im Entwicklungsprozess einfache Komponententests durchgeführt werden. Ein Funktionsträger sollte unabhängig von dem Gesamtsystem simuliert werden können. Dieser Modultreiber ist insbesondere für die VIBN entscheidend. Er zielt darauf ab, den Steuerungscode den einzelnen Modulen zuzuordnen.

Bei der Anwendung des Modultreibers werden solche Systemelemente zusammengefasst, die starke Interaktionen aufweisen. Bei dem Demonstrator wäre dies z. B. der dem Shuttle zugeordnete Steuerungscode. Ein anderes Beispiel sind die Magnetventile und die Zylinder. Sollen z. B. die Weichen simuliert werden, sind sowohl die Zylinder als auch die zugehörigen Magnetventile als Funktionsträger zu betrachten. Die Simulation einzelner Zylinder ist weniger Gegenstand der Anlagenentwicklung als vielmehr der Produktentwicklung und Optimierung von Zylindern als Produkte. Dieser Modultreiber unterstützt auch dabei, dass die Module der Simulationsmodelle und der realen Anlage möglichst identisch sind, so dass auch bei der Simulation ein Baukastensystem verwendet und auf eine Bibliothek zurückgegriffen werden kann.

Die Rangfolge dieses Modultreibers ist immer dann hoch, wenn Simulationen oder eine VIBN eingesetzt werden sollen.

- **Organisationsprozesse:** Ziel sind Module, die die Unternehmensstruktur und ihre Organisationsprozesse mit berücksichtigen. So sollen solche Systemelemente zu Funktionsträgern zusammengefasst werden, für die im Unternehmen einzelne Bereiche zuständig sind.

Dieser Modultreiber führt zu Funktionsträgern, die fachdisziplinspezifisch sind, also dem Gegenteil von mechatronischen Funktionsträgern. Durch solche Funktionsträger soll der Kommunikationsaufwand zwischen den Abteilungen reduziert werden. Bei dem Materialflusssystem trifft dies z. B. auf den Unterbau zu. Dieser wird von einer Abteilung separat gefertigt, ohne dass dabei auf andere Bereiche im Unternehmen zurückgegriffen werden muss.

- **Unternehmensumfeld:** Ziel des Modultreibers sind Module, die produktstrategische Anforderungen und die Unternehmensaspekte berücksichtigen. So soll die Bildung der Funktionsträger nicht mehr nur abhängig von dem betrachteten System beeinflusst werden, sondern auch von Faktoren, die außerhalb der Systemgrenze liegen. Die Gestaltungsregeln für diesen Modultreiber können aus diesem Grund auch nicht explizit beschrieben werden, sondern er dient vielmehr als Platzhalter für alle Einflüsse, die das Unternehmensumfeld betreffen.

Ist beispielsweise mit Produktpiraterie zu rechnen, sind evtl. Module mit einer Funktionsintegration zu wählen, die ein Kopieren erschweren, auch wenn durch den so gebildeten Funktionsträger die Komplexität steigt und der organisatorische Aufwand für das Modul größer wird. Ist jedoch abzusehen, dass sich im Produktumfeld etwas ändert, ist dieser Teil modular zu gestalten. Für das Materialflusssystem trifft dies z. B. auf den Werkstückträger zu, der an die einzelnen Produkte angepasst werden muss.

Ausgehend von den Modultreibern und den damit verknüpften Gestaltungsregeln für die Modularisierung sind im nächsten Schritt die Funktionsträger zu bilden. Vorab ist aber noch eine Auswahl und Reihung der Modultreiber vorzunehmen. Die Reihenfolge der Modultreiber hat Einfluss auf die gebildeten Funktionsträger, da die Gestaltungsregeln z. T. nicht in Einklang gebracht werden können oder sich sogar widersprechen. So lassen sich die Modultreiber *Hierarchisierung* und *Organisationsprozesse* nicht immer in Einklang bringen. Durch die Gestaltungsregeln des Organisationsprozesses bilden sich fachdisziplinspezifische Module aus. Das steht im Widerspruch zur Hierarchisierung, bei der eher mechatronische Funktionsträger gebildet werden.

Diese Dilemmas lassen sich nicht lösen, sondern es ist fallspezifisch zu entscheiden, wie die Module gebildet werden. Neben den beschriebenen allgemeinen Modultreibern können auch projektspezifische Modultreiber ergänzt, bzw. weggelassen werden. Die ausgewählten Treiber sind dann in eine Reihenfolge zu bringen. An der Reihenfolgen-

bildung sollen alle beteiligten Personen und Fachdisziplinen mitwirken. Es sollte sichergestellt werden, dass bei der Reihenfolgenbildung alle berücksichtigt werden. So soll verhindert werden, dass sich klassische Module herausbilden, die bestimmt sind durch eine Fachrichtung, bspw. Mechanik. Die Modultreiber werden dann nacheinander ihrer Reihenfolge entsprechend angewendet.

### Produktstruktur aufstellen

Die nächste Phase beginnt mit der Aufstellung der Produktstruktur. Dazu werden die Elementarfunktionen<sup>29</sup> der Funktionshierarchie und die Systemelemente der untersten Ebene der Wirkstruktur<sup>30</sup> gegenübergestellt. In der neutralen Produktstruktur sind jedem Systemelement der untersten Ebene der Wirkstruktur jeweils eine oder mehrere Funktionen der untersten Ebene zugeordnet (vgl. Bild 5-13).

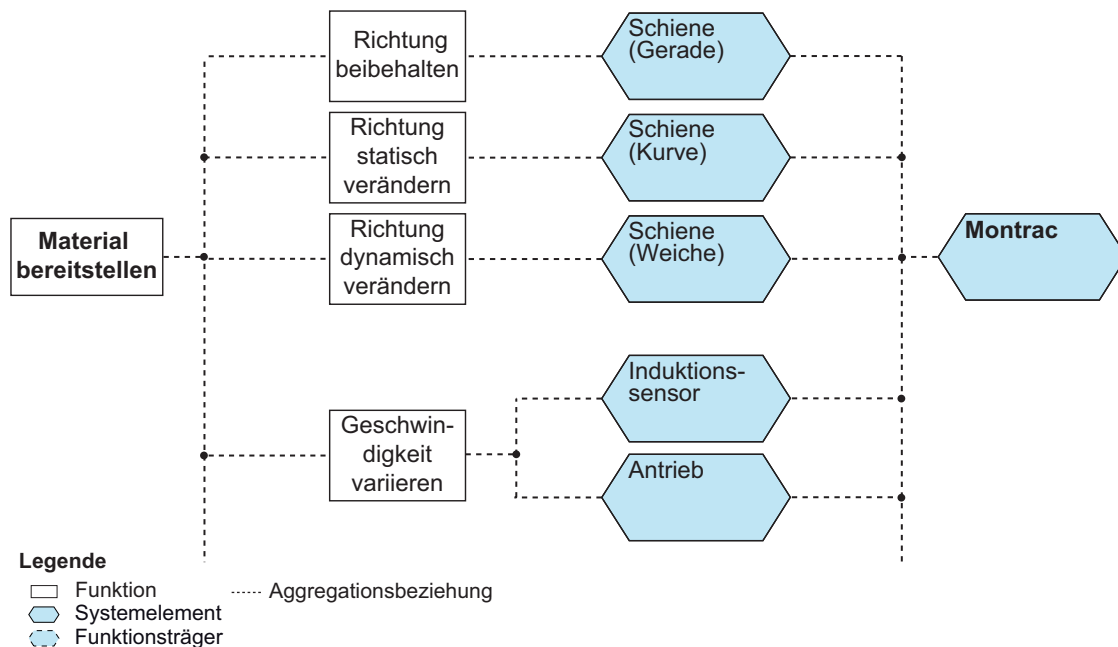


Bild 5-13: Neutrale Produktstruktur des Materialflusssystemes Montrac (Ausschnitt)

Bei der neutralen Produktstruktur handelt es sich um die Verknüpfung der Funktionshierarchie mit der Wirkstruktur ohne Berücksichtigung einer Hierarchie von Funktionen oder Systemelementen. Bestehende Hierarchien aus der Funktionshierarchie oder der Wirkstruktur werden nicht berücksichtigt. Diese Hierarchie soll in der nachfolgenden Phase entsprechend den Modultreibern wieder aufgebaut werden. Bei Weiterentwicklungen oder Anpassungskonstruktionen können schon Baugruppen in der neutralen Pro-

<sup>29</sup> Elementarfunktionen stellen die unterste Ebene der Funktionshierarchie dar.

<sup>30</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.6 und 5.1.2.3

duktstruktur eingetragen werden, da in der Regel auf bestehende Konzepte zurückgegriffen wird. Jedoch werden auch solche Aggregationen im weiteren Verlauf überprüft.

### Funktionsträger iterativ bilden

In der letzten Phase werden nun aus der neutralen Produktstruktur Funktionsträger gebildet. Der Ablauf der Funktionsträgerbildung ist in Bild 5-14 dargestellt. Es handelt sich um ein iteratives Vorgehen, das für jeden Modulträger durchlaufen wird. Die Reihenfolge der Modultreiber ist in einer Phase festgelegt worden. Begonnen wird mit dem Modultreiber, der in der Rangfolge an erster Stelle steht. Das Vorgehen wird dann der Reihenfolge nach für jeden Modultreiber durchgeführt.

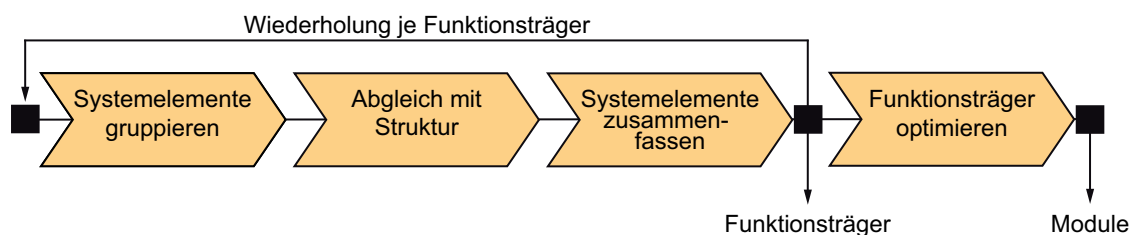


Bild 5-14: Prozess der iterativen Funktionsträgerbildung

Der erste Schritt besteht darin, die Gestaltungsrichtlinien anzuwenden und die Systemelemente entsprechend zu gruppieren. Im nächsten Schritt wird die Struktur, die durch den aktuellen Modultreiber entsteht, mit der bestehenden Struktur abgeglichen. Werden Systemelemente ohne bestehende Zuordnung der Gestaltungsregel entsprechend einem Funktionsträger zugeordnet, wird diese übernommen. Das Gleiche geschieht mit Zuordnungen, die zu keiner Veränderung führen. Bei Zuordnungen, die jedoch Veränderungen verursachen werden, besteht Diskussionsbedarf. Es gilt die Regel, dass bestehende Zuordnungen möglichst nicht verändert werden. Dies kann jedoch nicht immer eingehalten werden, so dass nach einer Bewertung durch die beteiligten Entwickler neue Zuordnungen getroffen werden können. Im letzten Schritt werden die Systemelemente nun den Zuordnungen entsprechend zu Funktionsträgern zusammengefasst. Diese Funktionsträger sind die Vorstufe von Modulen und dienen dazu, eine Hierarchie in die Produktstruktur zu bringen. Für alle Modultreiber werden nun die einzelnen Schritte bis zu den Funktionsträgern durchlaufen. Am Ende müssen alle Systemelemente der untersten Ebene einem Funktionsträger zugeordnet worden sein.

Der abschließende Schritt besteht nun darin, die Funktionsträger im Gesamtkontext zu analysieren und ggf. Änderungen vorzunehmen. Dies wird z. B. dann notwendig sein, wenn Module (Baugruppen) extern zugekauft werden und die beinhalteten Systemelemente unterschiedlichen Funktionsträgern zugeordnet wurden. In dieser Phase ist auch zu entscheiden, mit welcher Detaillierungsstufe der Module in den nachfolgenden Prozessen gearbeitet werden soll. So kann es aus Gründen der Übersichtlichkeit sinnvoll sein, zwei Funktionsträger zu einem Modul zusammenzufassen. Nach diesem Schritt liegen dann die Module und ein dekomponiertes Gesamtsystem vor.

Das beschriebene Vorgehen zur Modularisierung des Systems wird nun am Beispiel des Materialflusssystem in Auszügen beschrieben. Die Anforderungen an die Modularisierung sind, dass das *Materialflusssystem flexibel*, die einzelnen *Module wiederverwendbar* und für sich genommen *simulierbar* sein sollen. Das ist nur ein Auszug aus den Anforderungen, die jedoch ausreichen, um eine Reihenfolge der Modultreiber zu bilden. So wurde folgende Reihenfolge der Modultreiber festgelegt:

- 1) Hierarchisierung
- 2) Entkopplung
- 3) Simulierbarkeit
- 4) Organisationsprozesse

Weitere Modultreiber wurden bei dem Demonstrator nicht eingesetzt. Die *Hierarchisierung* wurde als wichtigster Modultreiber identifiziert, da dieser die Komplexität reduziert und das System in unterschiedlicher funktionaler Ausstattung genutzt werden soll. So kann z. B. die Anzahl der Ausschleusestationen und der Bearbeitungsstationen variiert werden. Die *Entkopplung* wurde an nächster Stelle ausgewählt, da die Module möglichst gleichartige und wenige Schnittstellen aufweisen sollten. Dadurch soll die Kombination von unterschiedlichen Anordnungen ermöglicht werden. Anschließend folgen die *Simulierbarkeit* und die *Organisationsprozesse*. Das Unternehmensumfeld wurde als Modultreiber nicht betrachtet, da es sich um eine Laboranlage handelt.

Die Ausgangslage zur Funktionsträgerbildung ist in Bild 5-15 zu sehen<sup>31</sup>. Es handelt sich dabei um die neutrale Produktstruktur aus Bild 5-13, ergänzt um die Zwischenebenen der Funktionshierarchie.

---

<sup>31</sup> Die gesamte Produktstruktur ist in Anhang A1.3 zu finden.



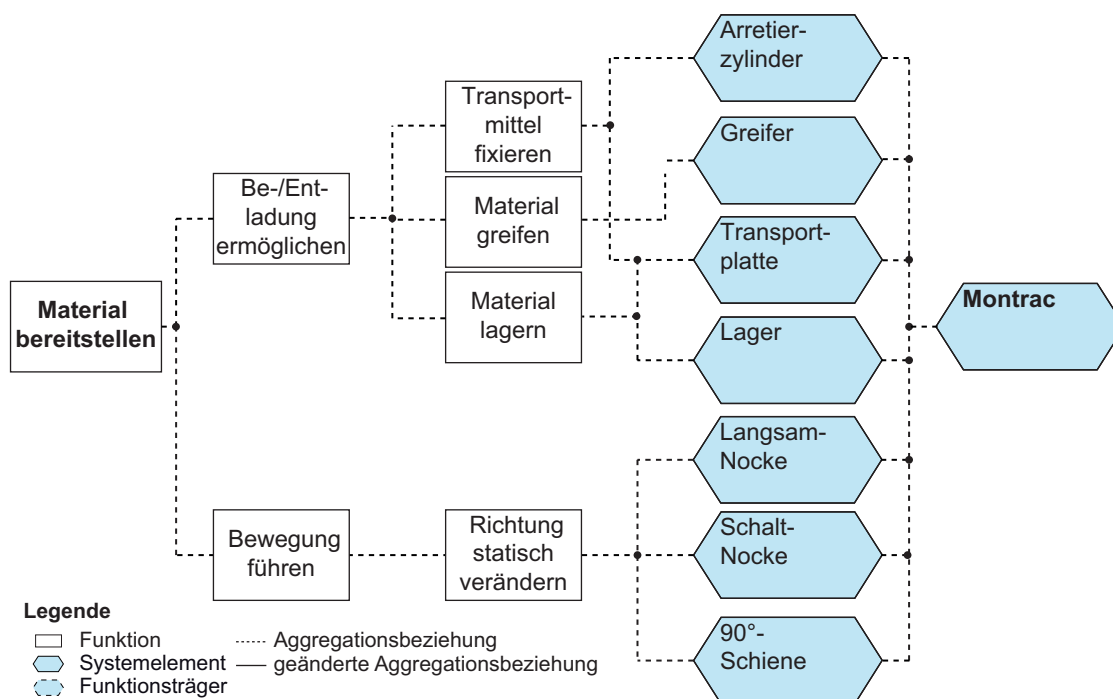


Bild 5-15: Ausgangslage der Funktionsträgerbildung (Ausschnitt)

Die Funktionen aus der vorangegangenen Phase werden den Systemelementen aus der untersten Ebene der Wirkstruktur<sup>32</sup> zugeordnet. Die Beziehungen zwischen den Funktionen und Teilfunktionen sowie den Systemelementen werden eingezeichnet. Die Beziehungen zwischen den Systemelementen werden für die neutrale Produktstruktur aufgelöst. Die Hierarchie der Funktionen wird für den Modultreiber *Hierarchisierung* übernommen. Auch diese Hierarchie ist nicht fix und kann sich ggf. im Verlauf ändern.

Die Anwendung der Gestaltungsregeln des Modultreibers *Hierarchisierung* führt zu der Struktur, die in Bild 5-16 zu sehen ist. So sind die Systemelemente *Sender*, *Spiegel* und *Empfänger* der Funktion *Not-Aus registrieren* zugeordnet. Da sie keine weitere Teilfunktion erfüllen, werden sie zu einem Funktionsträger gruppiert. Aus der Teilfunktion *Hindernisse/Störobjekte erfassen* wird ein Funktionsträger für das Systemelement *Abstandssensor*. Hier greift die Gestaltungsregel, dass nur dieses Systemelement die Teilfunktion erfüllt und es selbst keine weitere Teilfunktion erfüllt. Im Zuge der Funktionsträgerbildung kann es zu diesem Zeitpunkt auch vorkommen, dass sich einzelne Systemelemente keinem Funktionsträger zuzuordnen lassen. Am Ende der Phase *Iterative Funktionsträgerbildung* sollte das zwar für alle geschehen sein, in dem ersten Durchlauf ist dies jedoch noch nicht notwendig. So wird das Systemelement *SPS* beispielsweise noch keinem Funktionsträger zugeordnet<sup>33</sup>, da es mehrere Teilfunktionen erfüllt und

<sup>32</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.6 und 5.1.2.3

<sup>33</sup> Vgl. Anhang Tabelle A-2

diese jeweils noch weitere Systemelemente zur Erfüllung benötigen. Im Gegensatz zur SPS wird das *RFID-Lese-/Schreibgerät* einem Funktionsträger zugeordnet. Es ist zwar insgesamt für die Erfüllung von drei Teilfunktionen verantwortlich, aber bei der Teilfunktion *Position bestimmen* ist es das einzige Systemelement. Deshalb bildet es einen Funktionsträger. Da es sich bei dem Modulträger *Hierarchisierung* um den ersten Funktionsträger handelt, entfallen die nächsten beiden Schritte und die gruppierten Systemelemente werden zu Funktionsträgern zusammengefasst.

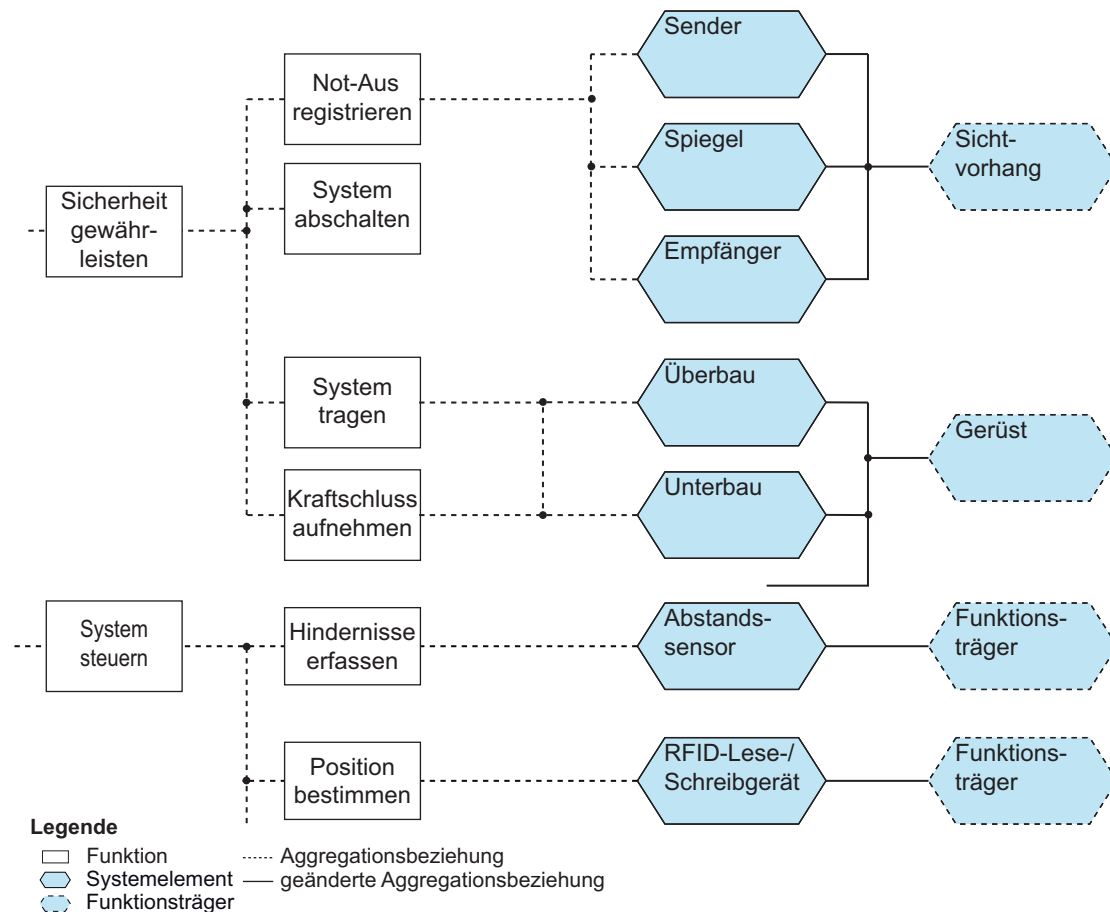


Bild 5-16: Funktionsträgerbildung nach dem Modulträger Hierarchisierung (Ausschnitt)

Der nächste Modultreiber ist die **Entkopplung**. Den Gestaltungsrichtlinien entsprechend wird die Anzahl der Schnittstellen reduziert. Zur Bewertung wird die Wirkstruktur mit den Flussbeziehungen herangezogen. Bedingt durch diesen Modultreiber wird die SPS z. B. zu einem Funktionsträger gruppiert. Sie kann getrennt von anderen Elementen eine Funktion erfüllen und besitzt standardisierte Schnittstellen. Zum anderen handelt es sich hierbei um ein klassisches Zukaufteil. Für das Systemelement *RFID-Lese-/Schreibgerät* führt dieser Modultreiber zu einem veränderten Funktionsträger, der auch den *RFID-Transponder* beinhaltet, da zwischen diesen beiden eine Flussbeziehung herrscht, die kein zweites Mal im System vorkommt. Das Zusammenlegen zu einem Funktionsträger

hätte nun den Vorteil, dass diese Beziehungsart nur noch innerhalb des Moduls behandelt werden muss. Allerdings wird dann ein anderer Funktionsträger gebildet als durch den vorherigen Modultreiber. In solch einem Fall ist abzuwägen, ob der Funktionsträger beizubehalten ist oder ein neuer gebildet wird. In diesem Fall wird ein neuer Funktionsträger aus beiden Systemelementen gebildet. Das bietet sich zum einen an, da die Anzahl der Verbindungen reduziert wird, zum anderen, weil der *RFID-Transponder* noch keinem Funktionsträger zugeordnet war. Es ergibt sich die Struktur, wie sie in Bild 5-17 zu sehen ist.

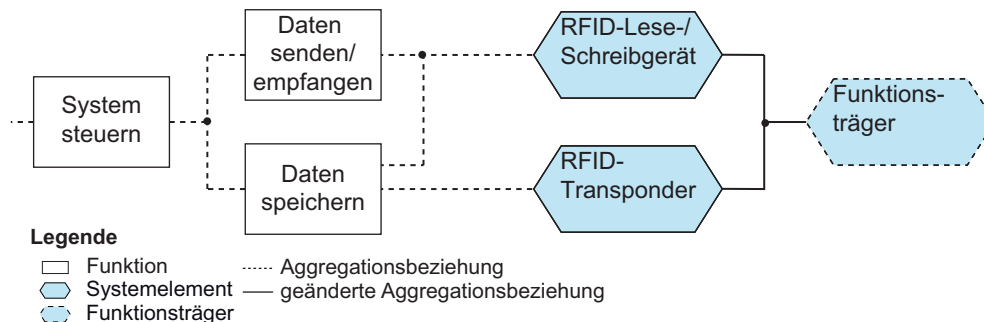


Bild 5-17: Funktionsträgerbildung nach dem Modultreiber Entkopplung (Ausschnitt)

Durch die beiden Funktionsträger *Simulierbarkeit* und *Organisationsprozesse* verändert sich die Produktstruktur nicht mehr. Am Ende der Phase liegt somit eine Produktstruktur vor, in der alle Systemelemente einem Funktionsträger zugeordnet worden sind.

Damit ist die Phase *System modularisieren* abgeschlossen und eine erste Strukturierung des Systems wurde vorgenommen. Mit diesen ersten Modulen werden nun die nächsten Schritte durchlaufen, um die Anlage zu konzipieren. Im Verlauf der Konzeption wird es jedoch vorkommen, dass bestehende Module verändert werden. Dies ist auch vorgesehen, da es sich ja um ein iteratives Vorgehen handelt. In der nächsten Phase werden die Verhaltensmodelle erstellt.

#### 5.1.2.5 Verhaltensmodelle erstellen

Die Verhaltensmodelle dienen unterschiedlichen Zwecken. Zum einen können sie in der Anlagenkonzipierung als Teil des Model-Based-Design eingesetzt werden, zum anderen können sie in der VIBN genutzt werden. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, ist es das Ziel der in dieser Arbeit entwickelten Methode, dass die Modelle möglichst für beides genutzt werden können. Die Modelle werden möglichst abstrakt beschrieben, um den

Modellierungsaufwand gering zu halten<sup>34</sup>. Neben dem Verwendungszweck unterscheiden sich die Modelle auch in ihrer Modellklasse und Art<sup>35</sup>.

Bei der Spezifikation von maschinenbaulichen Anlagen spielen die Modellierung von Aktivitäten, Zuständen und Zustandsübergängen sowie die Auswirkung auf die Wirkstruktur eine wesentliche Rolle. Die Spezifikation erfolgt in den Partialmodellen Verhalten-Aktivitäten und Verhalten-Zustände der Spezifikationstechnik CONSENS. Mit den Aktivitäten und Zustandsmodellen wird das allgemeine Verhalten der Anlage spezifiziert. Sie dienen in der Anlagenausarbeitung als Vorlage für die Erstellung des Steuerungsprogramms. Neben den Aktivitäten und den Zuständen ist auch das dynamische Verhalten der Anlage sehr wichtig. Mit der Erstellung der Verhaltensmodelle befasst sich Abschnitt 5.4.1 näher. Hier wird auch auf die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe eingegangen.

Für die VIBN ist darauf zu achten, dass bei den Verhaltensmodellen zwischen steuerbarem und nicht aktiv steuerbarem Verhalten unterschieden wird. Bei dem Demonstrator gilt dies z. B. für die unterschiedlichen Nocken. Die *Langsam-* und die *Schnell-Nocke* sind nicht aktiv steuerbar. Sie werden fest mit den Schienen verbunden und die Steuerung hat keinen Einfluss darauf. Im Gegensatz dazu wird die *Schalt-Nocke* aktiv von der SPS gesteuert. Es können die Informationen Stopp und langsame Fahrt an das Shuttle weitergegeben werden. Ebenfalls nicht aktiv steuerbares Verhalten ist z. B. ein Endlagensensor in einem pneumatischen Zylinder. Fährt der Zylinder aus, löst der Sensor nach einer gewissen Zeit aus. Solch ein Verhalten muss in den Verhaltensmodellen für die VIBN hinterlegt werden. Die Zustandsmaschine *Shuttle fährt* für den Demonstrator ist in Bild 5-18 zu sehen.

Das Shuttle startet in dem Zustand *langsame Fahrt* und verbleibt in diesem Zustand bis durch ein Ereignis ein Zustandswechsel ausgeführt wird. Im Zustandsautomat *freie Fahrt* wird zwischen den Zuständen *langsame Fahrt*, *schnelle Fahrt* und *Halt* gewechselt. Die Zustandsänderung wird jeweils durch eine Nocke an der Strecke ausgelöst. Im Fall der *Schnell-* und *Langsam-Nocken* sind diese dauerhaft an der Schiene befestigt. Der Zustand *Halt* wird von einer pneumatischen Schaltnocke ausgelöst. Solange dieser durch den Induktionssensor registriert wird, bleibt das Shuttle stehen. Ist es nicht mehr vorhanden, geht das Shuttle in den Zustand *langsame Fahrt*. Parallel zum Zustand *freie Fahrt* kann sich auch noch ein *Hindernis* vor dem Shuttle befinden. Wird dies erkannt, hält das Shuttle so lange an, bis *kein Hindernis* erkannt wird. Es fällt dann in den vorherigen Zustand des Zustandsautomaten *freie Fahrt zurück*. Aus jedem Zustand wird durch Unterbrechen der Energieversorgung das Ende erreicht.

---

<sup>34</sup> Im Abschnitt 5.4.1 wird auf den Abstraktionsgrad von Modellen detaillierter eingegangen.

<sup>35</sup> Eine Modellklasse ist ein Zusammenschluss von Modellen mit gleichen Merkmalen und Eigenschaften. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Klassifikation anhand der Fachdisziplinen, die an der Anlagenentstehung beteiligt sind (vgl. [SLT13, S. 44]).

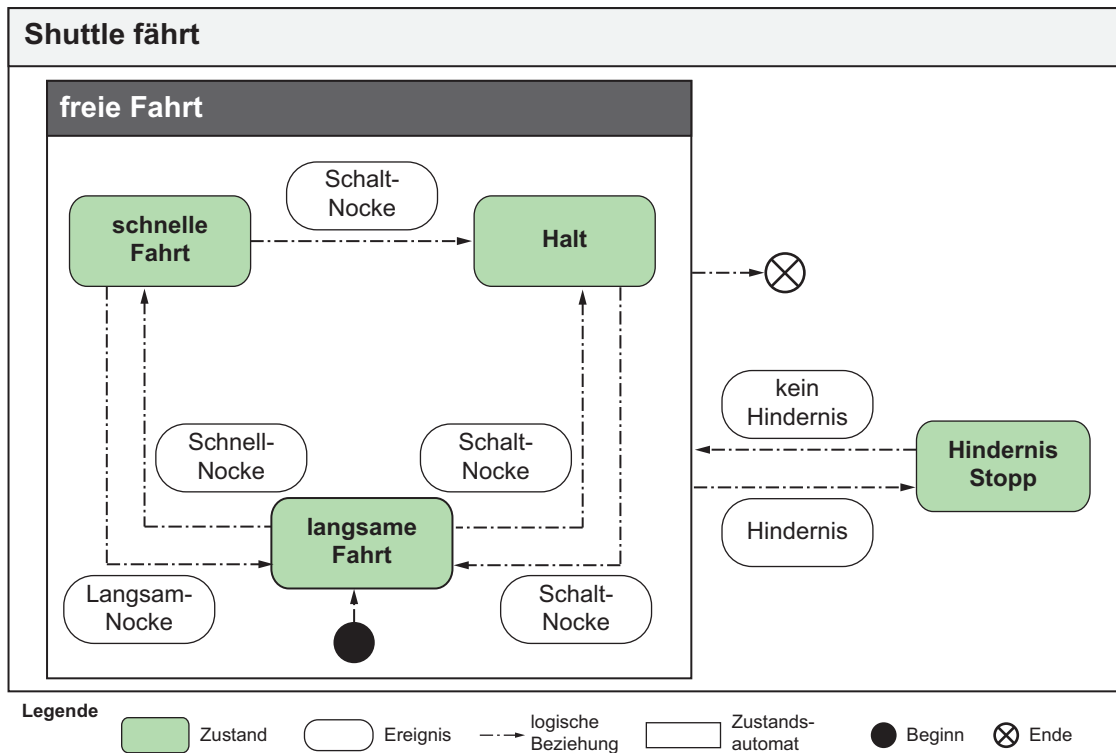


Bild 5-18: Verhalten-Zustände des Shuttles (Ausschnitt und vereinfachte Darstellung)

Dieses Verhaltensmodell ist für die spätere VIBN notwendig. Auf das Verhalten des Shuttles kann von außen nur durch die Nocken Einfluss genommen werden. Die Schalt-nocke lässt sich elektropneumatisch per SPS steuern. Die Steuerung hierfür muss in der VIBN überprüft werden. Neben der Steuerung des Weges, das ein Shuttle nehmen soll, ist in Kurven auch eine Kollisionsvermeidung notwendig. Die automatische Abstandserkennung zur Kollisionsvermeidung der Shuttles funktioniert nur auf den geraden Teilstücken.

Im Bild 5-19 ist der schematische Erfassungsbereich des Abstandssensors eingezeichnet. Der Erfassungsbereich muss sehr schmal sein, damit keine Objekte neben der Strecke erfasst werden, z. B. Bearbeitungsstationen. Dies führt dazu, dass ein Shuttle, das auf gerader Strecke fährt, einen Vorgänger erfassen kann, so wie es bei Shuttle 1 und 2 zu sehen ist. Im Kurvenbereich ist der Erfassungsbereich jedoch so schmal, dass Shuttle 2 das Shuttle 3 nicht erfassen kann. Es ist also sicherzustellen, dass sich jeweils nur ein Shuttle in der Kurve aufhält.

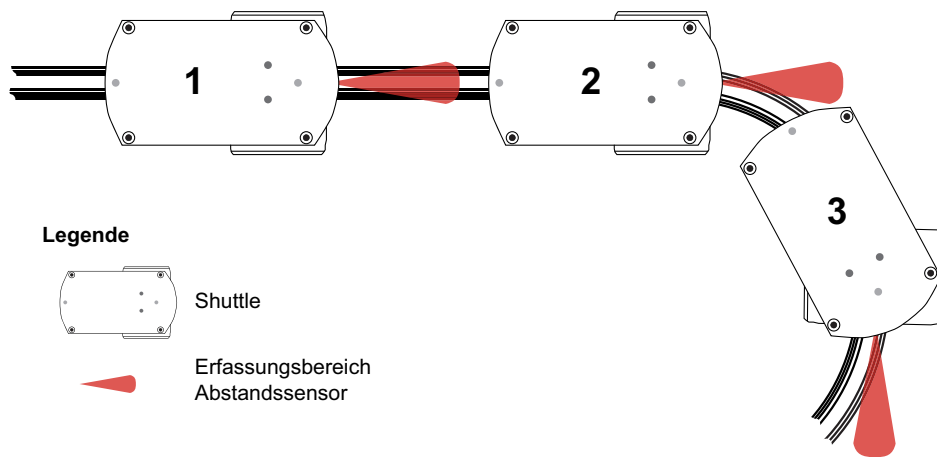


Bild 5-19: Schematischer Erfassungsbereich des Abstandssensors der Shuttles

#### 5.1.2.6 Grobgestalt erstellen

Parallel zu den Verhaltensmodellen werden die ersten Gestaltmodelle aufgestellt. Diese umfassen Angaben über die Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte. Darüber hinaus können Hüllflächen und Strukturen beschrieben werden, ebenso erste Kinematiken. Die Modellierung erfolgt mit Hilfe von gängigen 3-D-CAD-Systemen.

Zunächst wird mit dem Aufstellen einer Baustruktur begonnen. Hierzu werden alle nicht gestaltbehafteten Systemelemente (Software, Regelalgorithmen etc.) aus der Produktstruktur entfernt. Ein Auszug aus der Baustruktur des Systems ist in Bild 5-20 zu sehen. Das Materialflusssystem setzt sich u. a. aus der Steuerung und dem Transportsystem zusammen. Dieses ist wiederum in Shuttle und Schienen unterteilt.

In dieser Phase ist der Detaillierungsgrad der Gestaltmodelle sehr unterschiedlich. Sind für einzelne Module im Rahmen der Phase *Lösungsmuster suchen*<sup>36</sup> Zukaufteile gefunden worden, liegen detaillierte Informationen vor. So ist beispielsweise das Shuttle ein zugekauftes Modul<sup>37</sup>, für das bereits detaillierte Gestaltinformationen vorliegen (vgl. Bild 5-21).

<sup>36</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.2

<sup>37</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.2 und Anhang A1.3

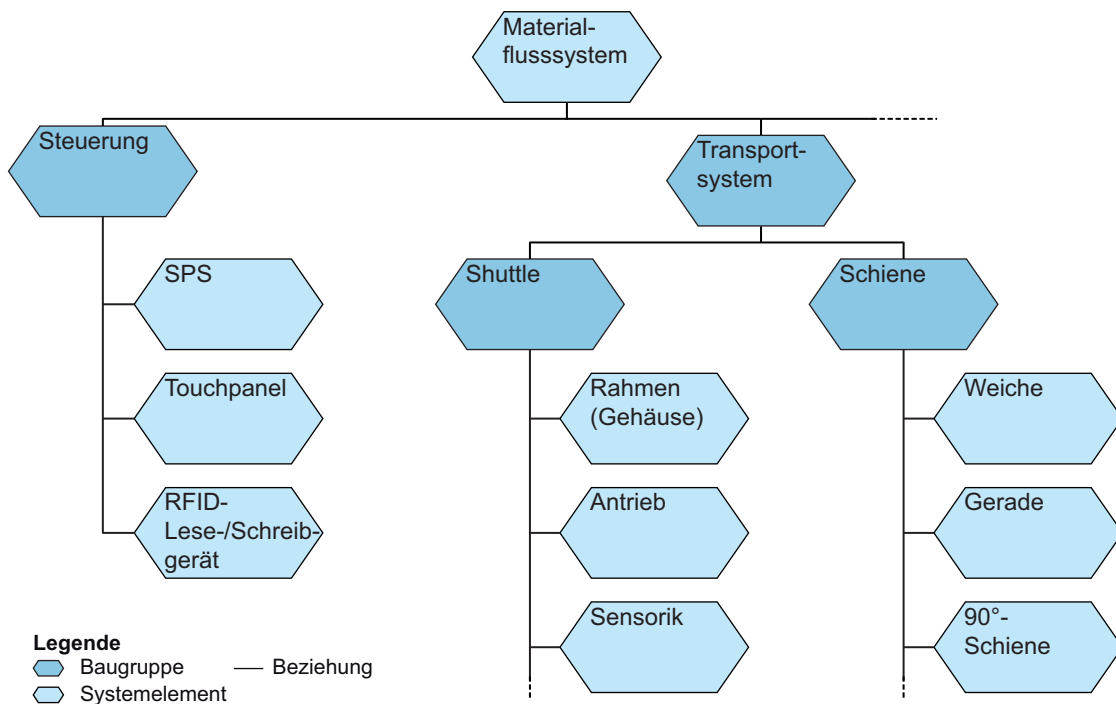


Bild 5-20: Baustruktur des Materialflusssystems Montrac (Ausschnitt)

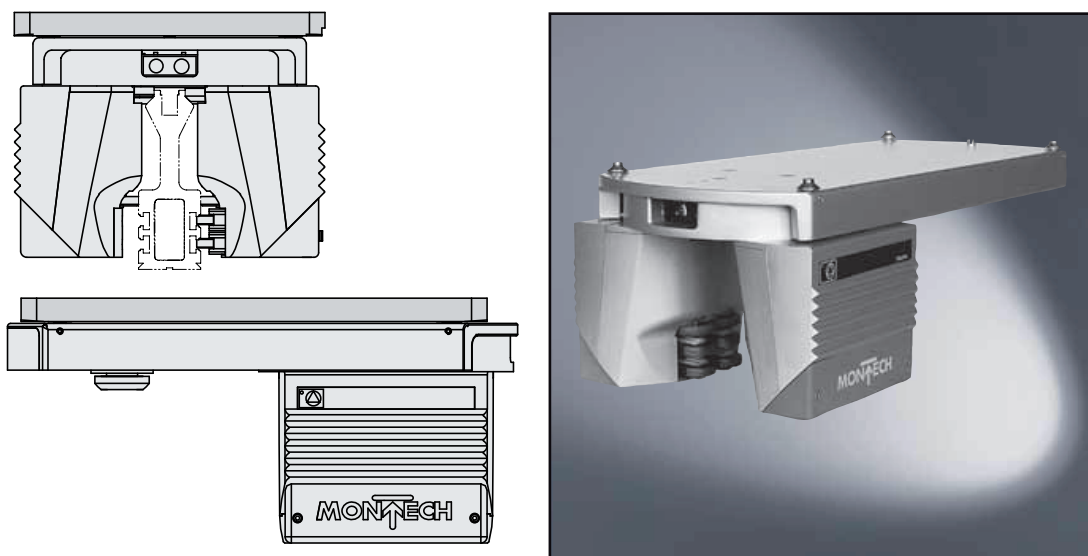


Bild 5-21: Gestaltmodell des Shuttles [Mon11-01]

In dieser Phase werden auch erste Layouts der gesamten Anlage erstellt. Das Layout des Demonstrators ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht detailliert (vgl. Bild 5-22). Es lassen sich daraus jedoch die Schnittstellen zwischen den anderen Komponenten bestimmen. So gibt es in dem Konzept drei Weichenpaare und vier Übergabepunkte, an denen ein Roboter mit den Werkstücken auf dem Shuttle interagiert.

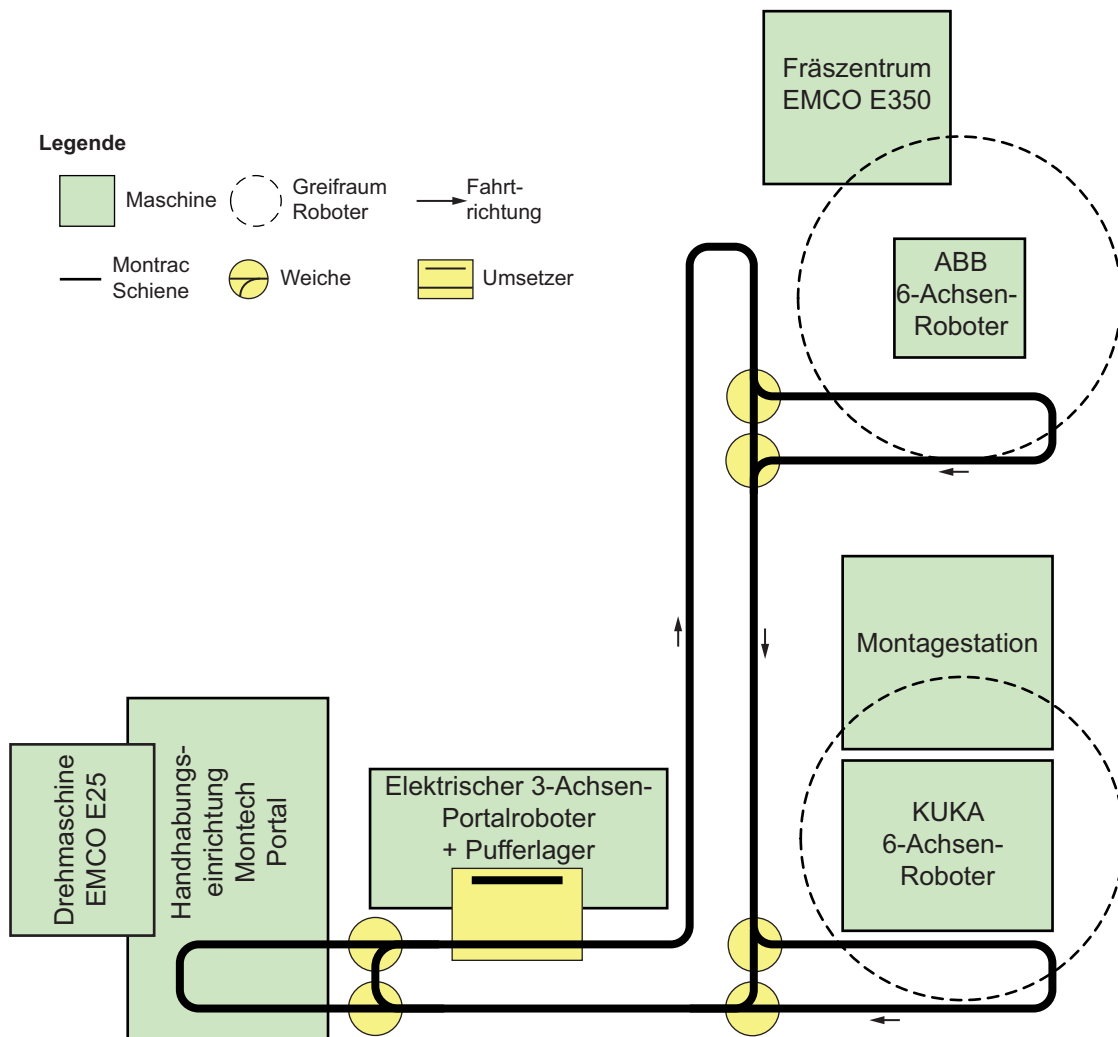


Bild 5-22: Layout des Materialflusssystemes Montrac

Auch die Informationen zur Gestalt werden im Verlauf der Anlagenherstellung immer weiter detailliert. Nachdem die ersten Verhaltensmodelle und die Grobgestalt beschrieben wurden, wird mit dem Erstellen der dynamischen Verhaltensmodelle begonnen<sup>38</sup>. Dies ist der Beginn der klassischen VIBN, wie sie derzeit verwendet wird.

### 5.1.2.7 Module konzipieren

Nachdem die *Lösungsmuster gesucht*, die *Wirkstruktur*, die *Verhaltensmodelle*, die *Grobgestalt erstellt* und das *System modularisiert* wurden, erfolgt die Konzipierung der Module. Die einzelnen Module werden nun so weit ausgearbeitet, dass eine Analyse der Anlagenkonzeption in der nächsten Phase vorgenommen werden kann. So sind insbesondere Module auszuarbeiten, für die keine Lösungselemente gefunden wurden. Die

<sup>38</sup> Näheres dazu in Abschnitt 5.5



evtl. vorliegenden Lösungsmuster sind so weit zu detaillieren, dass eine Analyse möglich ist. Der Detaillierungsgrad der Konzeption wird nicht vorher bestimmt, sondern ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Die Konkretisierung hängt von den Anforderungen an die Bewertung der Konzeption ab. Ist eine Bewertung der Anlagenkonzeption hinsichtlich der Anforderungserfüllung möglich, ist die Detaillierung ausreichend. Ist das noch nicht möglich, ist das Konzept weiter zu konkretisieren.

Für den Demonstrator ist z. B. das Untergestell der Schiene noch nicht zu detaillieren, lediglich die Schnittstellen zur Schiene sind genau festzulegen. Wie das Untergestell genau aufgebaut werden soll, wird in der *Anlagenausarbeitung*<sup>39</sup> festgelegt. Zu dem aktuellen Zeitpunkt reicht es aus zu wissen, dass durch ein Untergestell eine definierte Schienenhöhe erreicht wird. Wie dies geschieht, ist für eine Bewertung des Konzeptes unerheblich. Andere Module sind weiter auszuarbeiten. Der Montageautomat ist so weit zu detaillieren, dass die Übergabepositionen der Werkstücke mit den anderen Anlagenteilen definiert sind. In der späteren Ausarbeitung wird an den Modulen unabhängig gearbeitet. Auch ist festzulegen, wie der Informationsaustausch zwischen der Anlage und dem Montageautomaten erfolgen soll.

Für maschinenbauliche Anlagen sind in dieser Phase auch die Lagen der Werkstücke zwischen den Modulen zu beschreiben. Dabei ist der Detaillierungsgrad abhängig von der gestellten Aufgabe und dem bisherigen Konzept. Bei dem Demonstrator ist die Lage der Werkstücke auf dem Werkstückträger unterschiedlich detailliert zu bestimmen. Bei den Übergabepunkten, an denen ein 6-Achsen-Roboter genutzt wird, ist der Freiheitsgrad noch sehr hoch, da der Roboter eine Kompensation vornehmen kann. Hier ist lediglich darauf zu achten, dass die Übergabebereiche zwischen dem Montrac und der Montagestation innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters liegt. Die Orientierung des Werkstücks muss nur immer die gleiche sein. Die Übergabe zwischen der Drehmaschine und dem Montrac erfolgt durch ein 3-Achsen-Portal. Es besitzt nicht die gleiche Flexibilität wie ein 6-Achsen-Roboter. Hier ist die Orientierung der Werkstücke und die Lage im Raum detaillierter festzulegen.

#### 5.1.2.8 Module integrieren

In der Phase *Module integrieren* werden die in den vorangegangenen Phasen erstellten Module zu einem Gesamtsystem zusammengefasst. Unter Integration wird das Zusammenfügen von Teilen zu einem übergeordneten Gesamtsystem verstanden [VDI2206, S. 35]. Abhängig von der Aufgabenstellung sind dabei folgende Arten von Integrationen durchzuführen [KZB+01, S. 61ff.]:

**Integration verteilter Komponenten:** In Anlagen sind Komponenten wie Aktoren, Sensoren und Leistungsstellglieder über Signal- und Energieflüsse zu verbinden. Die

---

<sup>39</sup> Vgl. Abschnitt 5.2

Signalflüsse werden mit einem Kommunikationssystemen (z. B. Sensor-Aktor-Bus, Feldbus etc.) verbunden. Es sollte ein einheitlicher Bus für die gesamte Anlage gewählt werden. Das gleiche gilt auch für den Energiefluss (Elektrisch, Pneumatisch, Hydraulisch etc.). Auch hier sollten einheitliche Stecker und Verbinder gewählt werden.

**Modulare Integration:** Das Gesamtsystem setzt sich aus Modulen mit definierter Funktionalität und Abmessungen zusammen, die über einheitliche Schnittstellen gekoppelt werden. Modular integrierte Systeme weisen den Vorteil auf, dass sie flexibel kombiniert werden können. Sie besitzen jedoch häufig ein größeres Bauteilvolumen im Vergleich zu integrierten Systemen. Bei dem Demonstrator trifft dies auf das Schienensystem zu. Hierbei ist die Schnittstelle definiert und die Abmessungen sind standardisiert. Dem Anwendungsfall entsprechend sind sie zu einem System aufzubauen.

**Räumliche Integration:** Bei der räumlichen Integration werden alle Komponenten integriert und bilden eine komplexe Funktionseinheit. Vorteile einer solchen Integration sind ein kleinerer Bauraum, höhere Zuverlässigkeit durch Reduktion der Schnittstellen und geringerer Montageaufwand. Es können jedoch auch unerwünschte Wechselwirkungen (z. B. Erwärmung, magnetische Streufelder, Schwingungen etc.) entstehen. Auf diese muss in der Anlagenausarbeitung besonders geachtet werden. Bei dem Demonstrator weist das Shuttle eine räumliche Integration auf.

Es sind nun die Module zu einem Gesamtsystem zu integrieren. Mögliche alternative Ausprägungen der Module sind im Kontext des Gesamtsystems zu bewerten und die geeignete Alternative ist auszuwählen. Als Hilfsmittel hat sich der Morphologische Kasten als zweckmäßig erwiesen. Dabei werden in den Zeilen die Teilmodule eingetragen und in den Spalten die möglichen Ausprägungen für die Teilmodule. Aus den vorangegangenen Phasen sind mögliche Wechselwirkungen zwischen den Modulen bekannt und es wird eine konsistente Gesamtlösung gesucht. Die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Modulen macht eine enge Zusammenarbeit der Fachdisziplinen erforderlich. Die so gefundene Gesamtlösung wird im Anschluss in der Analyse untersucht und z. B. einer eingängigeren Wechselwirkungsanalyse unterzogen.

### 5.1.3 Analyse

Die dritte Unterphase der Anlagenkonzipierung ist die *Analyse*. In ihr wird eine Ermittlung der Eigenschaften des Gesamtsystems durchgeführt und mit den Anforderungen aus der *Zielbestimmung* abgeglichen. Die Analyse besteht aus den drei Unterphasen *Analysegegenstand festlegen*, *Analyse durchführen* und *Analyseergebnisse bewerten*, wie in Bild 5-23 gezeigt ist.

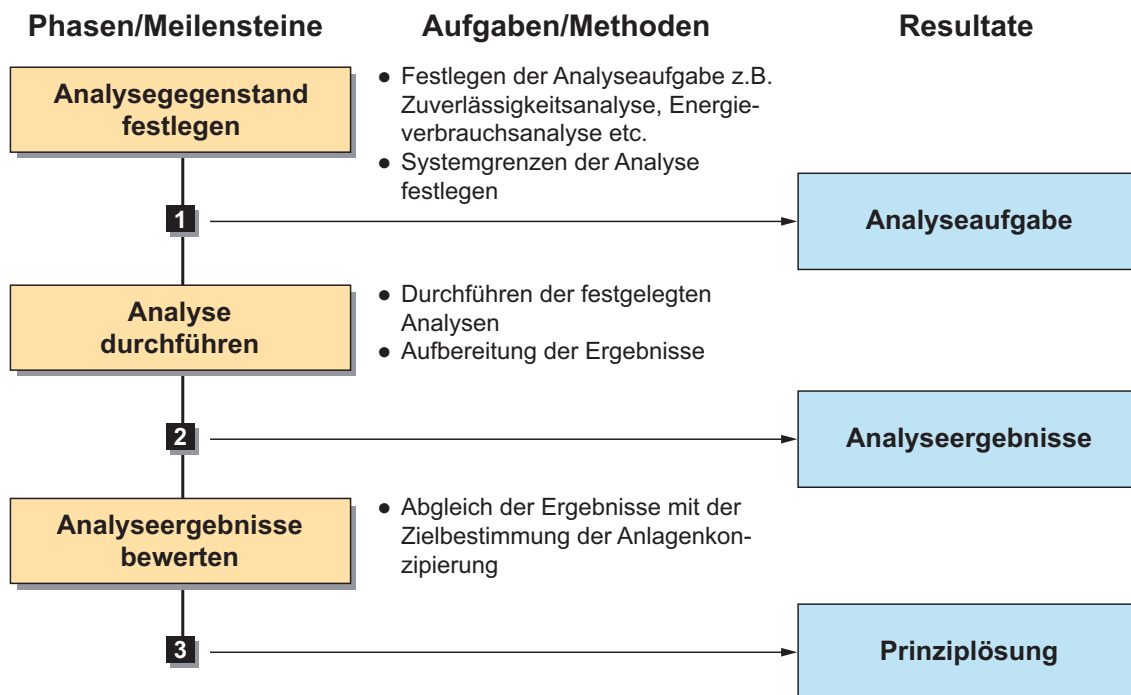


Bild 5-23: Anlagenkonzipierung – Analyse nach [GSA+11, S. 12]

In der Analysephase können u. a. Zuverlässigkeitsanalysen, Energieverbrauchsanalysen, Festigkeitsanalysen oder die Analyse von Durchlaufzeiten oder Stillstandzeiten durchgeführt werden. Für maschinenbauliche Anlagen ist häufig eine Analyse des dynamischen Systemverhaltens notwendig. Zunächst ist der Untersuchungsgegenstand festzulegen. Nicht alle Analysen sind an dem gesamten System vorzunehmen, weshalb auch die Systemgrenzen festgelegt werden müssen. Es folgen die Durchführung der Analysen und die Bewertung der Ergebnisse. Dabei werden die Analyseergebnisse mit den Anforderungen und Funktionen aus der *Zielbestimmung*<sup>40</sup> abgeglichen. Erfüllt das System die Anforderungen nicht, muss in die Synthesephase zurückgesprungen werden, da Anpassungen vorgenommen werden müssen. Neben den Analysen für die Konzipierung der Anlage wird noch die VIBN durchgeführt. Hierbei handelt es sich zwar auch um eine Analyse, jedoch ist die Analyseaufgabe fest vorgegeben. Sie wird in Abschnitt 5.4.3 näher beschrieben. Damit ist die Anlagenkonzipierung abgeschlossen und es liegt eine Prinziplösung der Anlage vor. In der nächsten Phase wird das System dann weiter detailliert.

## 5.2 Anlagenausarbeitung

Nachdem die *Anlagenkonzipierung* abgeschlossen ist und die Prinziplösung vorliegt, folgt die Phase der *Anlagenausarbeitung*. In ihr findet die **Konkretisierung** der ma-

<sup>40</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.5 und 5.1.1.6

schinenbaulichen Anlage statt. Das Ziel ist die eindeutige und vollständige Beschreibung des Systems, so dass im Anschluss mit der Herstellung begonnen wird. Dabei wird arbeitsteilig vorgegangen. Die Konkretisierung der Module vollzieht sich parallel und in den jeweils beteiligten Fachdisziplinen. Dabei werden von den Fachdisziplinen etablierte Methoden eingesetzt: im Maschinenbau/Mechanik z. B. die Konstruktionslehre, in der Elektrotechnik/Elektronik der VLSI-Entwurf, in der Regelungstechnik die Methoden der Regelungstechnik und in der Softwaretechnik die Phasenmodelle oder die Unified Modeling Language (UML)<sup>41</sup>. Alle Methoden besitzen den Dreiklang aus Zielbestimmung, Synthese und Analyse. Die Entwurfsaktivitäten sind innerhalb der Module zwischen den einzelnen Fachdisziplinen sowie zwischen den Modulen abzustimmen, was durch die senkrechten Linien in Bild 5-24 symbolisiert wird. Als Hilfsmittel zur Abstimmung zwischen den Fachdisziplinen und Modulen wird die Spezifikation des Systems genutzt, die in der Anlagenkonzipierung erstellt wurde.

Die Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten können mit Hilfe einer DSM<sup>42</sup> bestimmt werden. Mit ihrer Hilfe lassen sich sequentielle, parallele sowie gekoppelte Prozessschritte ermitteln. Durch die Modularisierung des Systems<sup>43</sup> sind die Abhängigkeiten gering. Auch die Reihenfolge der Prozessschritte kann schon mit berücksichtigt worden sein. Die Schnittstellen zwischen den Modulen lassen sich aus der Wirkstruktur<sup>44</sup> entnehmen. Bevor mit der Anlagenausarbeitung begonnen wird, sind die Anforderungen den einzelnen Modulen zuzuordnen, so dass diese im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Die Anforderungen können über die Beziehung zwischen den Systemelementen und den Funktionen sowie zwischen den Funktionen und den Anforderungen den Modulen zugeordnet werden. Änderungen, die bei der Anlagenausarbeitung auftreten, sind in der Prinziplösung zu vermerken und an die beteiligten Personen zu kommunizieren.

---

<sup>41</sup> Für weitere Informationen sei auf die Fachliteratur verwiesen: VLSI-Entwurf [BGH+96], Methoden der Regelungstechnik [FD08] und Phasenmodelle der Softwaretechnik und UML [Pre94] [Bei95], [Oes12], [PB96], [Brö95], [Ver94], [Boe88b]. Eine Übersicht der Methoden findet sich in [GEK01].

<sup>42</sup> Vgl. Abschnitt 3.3.2

<sup>43</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.4

<sup>44</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.3

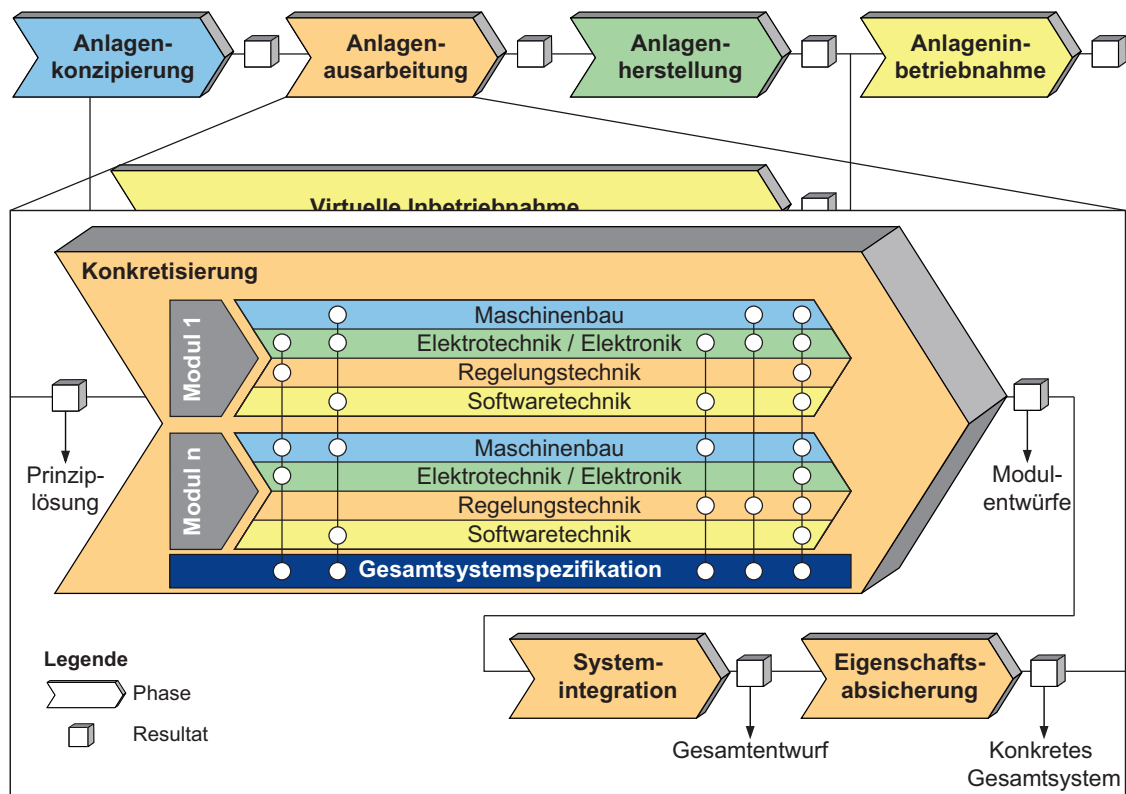


Bild 5-24: Phasen der Anlagenausarbeitung im Anlagenentstehungsprozess nach [GSA+11, S. 8]

Ein gutes Änderungsmanagement ist gerade in der Anlagenherstellung überaus wichtig. Informationen über Änderungen müssen an die Softwaretechnik weitergegeben werden. Änderungen an den Modulen sind meistens nur geringfügig, haben jedoch Einfluss auf das Steuerungsprogramm. Nicht kommunizierte Änderungen würden sonst erst in der Inbetriebnahme auffallen. Kleine Änderungen können beispielsweise Sensoren betreffen. In der Anlagenausarbeitung fällt auf, dass der Bauraum für einen Sensor geringer ist als in der Anlagenkonzipierung vorgesehen. Aus diesem Grund wird ein anderer Sensor ausgewählt. Dieser besitzt jedoch ein anderes Schaltverhalten<sup>45</sup> (kein Schließer, sondern ein Öffner). Wird diese Änderung nicht an die Betreffenden kommuniziert, fällt sie erst in der Inbetriebnahme auf. Die Änderung lässt sich im Steuerungsprogramm sehr leicht korrigieren, muss jedoch erst erkannt werden, was die Inbetriebnahme verzögert. Auch ist die Fehlersuche deutlich aufwändiger als eine Anpassung des Steuerungs-codes. Erschwerend kommt hinzu, dass es mit großer Wahrscheinlichkeit nicht der einzige Fehler ist, was die Fehlersuche weiter erschwert. Das Zurückspielen der Änderungen und Konkretisierungen in eine gemeinsame Systemspezifikation verhindert solche Probleme. Gemeinsame Verhaltensmodelle bieten die Möglichkeit, dass in der Ausarbeitung diese Änderungen direkt in die Modelle übernommen werden. In der Validie-

<sup>45</sup> Weitere Informationen zu Sensoren können z. B. aus [Hes01] entnommen werden.

nung der einzelnen Module sind diese dann schon berücksichtigt. Für die Steuerungsentwicklung hat dies den Vorteil, dass immer an aktuellen Modellen getestet wird.

Im Anschluss an die Ausarbeitung der Module in den beteiligten Fachdisziplinen erfolgt auch in der Anlagenausarbeitung die **Systemintegration** (vgl. Abschnitt 5.1.2.8). Die Systemintegration schließt mit einer letzten **Eigenschaftsabsicherung**. Eine Eigenschaftsabsicherung geschieht immer im Anschluss an Phasen, bei denen Lösungsvarianten ausgewählt werden [VDI2206, S. 38]. Es wird ein Abgleich der Eigenschaften der Lösungsvarianten mit den Anforderungen vorgenommen. Die Eigenschaftsabsicherung beinhaltet Verifikation und Validierung<sup>46</sup> des Systems, wobei sich die Verifikation im Gegensatz zur Validierung formal vollziehen kann. Ergebnis der Eigenschaftsabsicherung ist eine Bewertung<sup>47</sup> der Lösungsvarianten. Bei der Bewertung können IT-Werkzeuge unterstützen. In dieser Phase wird das gesamte System getestet und nicht nur isolierte Einzelkomponenten. Zu diesem Zeitpunkt findet jedoch noch nicht die Eigenschaftsabsicherung des Steuerungsprogrammes statt. Dies erfolgt parallel zur Anlagenerstellung, so dass die Phase der *Anlagenausarbeitung* früher abgeschlossen wird.

Die *Anlagenausarbeitung* ist abgeschlossen, wenn die Gesamtlösung in Form der Produktdokumentation vorliegt. Diese umfasst Einzelteil-, Gruppen- und Gesamtzeichnungen, Stücklisten, Fertigungs-, Montage-, Prüf- und Transportvorschriften sowie Betriebsanleitungen oder Benutzerhandbücher [VDI2221, S. 11]. Zu diesem Zeitpunkt sind auch die Verhaltensmodelle der einzelnen Module vorhanden.

### 5.3 Anlagenherstellung

Die nächste Phase im Vorgehensmodell ist die *Anlagenherstellung*. Zur Herstellung des Produktes *maschinenbauliche Anlage* ist ebenfalls eine *Produktionssystementwicklung* notwendig. Mit dieser wird frühzeitig begonnen, da sich das Produkt (maschinenbauliche Anlage) und das Produktionssystem gegenseitig beeinflussen. Die Produktionssysteme zur Herstellung von maschinenbaulichen Anlagen sind in der Regel Werkstattfertigungen oder bei größeren Anlagen die Baustellenfertigungen. Aus diesem Grund stehen die Betriebsmittel zur Herstellung oftmals schon fest. Es schließen sich die Phasen *Arbeitsplanung*<sup>48</sup> sowie *Teilefertigung und Montage* an. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde die Anlagenherstellung im bisherigen Vorgehensmodell (vgl. Bild 5-1) sequentiell nach der Anlagenausarbeitung eingeordnet. Mit der ersten Phase *Produktionssystem-*

---

<sup>46</sup> Die „Verifikation meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen“ [VDI2206, S. 38] und beantwortet die Frage, ob das System entsprechend der Spezifikation korrekt ist. In der Validierung wird geprüft, „ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist, bzw. den gewünschten Wert erzielt“ [VDI2206, S. 39].

<sup>47</sup> Eine Vorgehensweise zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung kann aus [VDI2225-1] entnommen werden.

<sup>48</sup> Vgl. Abschnitt 2.4

*konzeption* wird im Anschluss an die *Anlagenkonzipierung* begonnen. Sie wird dann parallel zur *Anlagenausarbeitung* durchgeführt (vgl. Bild 5-25).

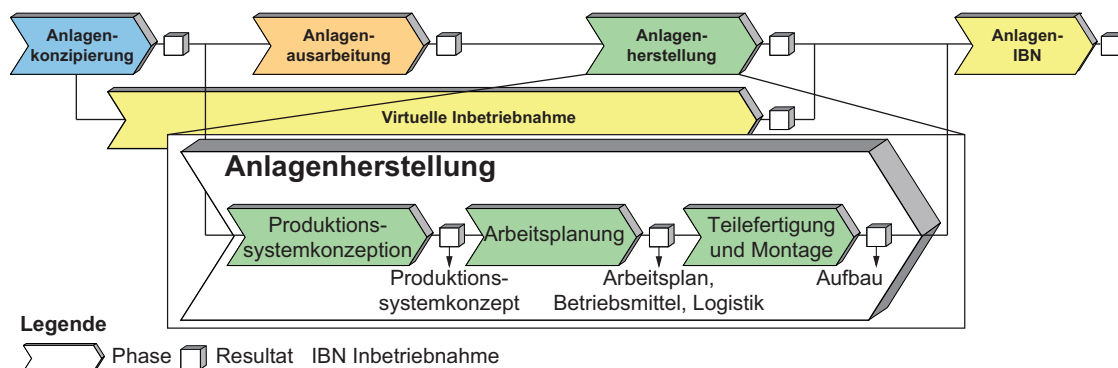


Bild 5-25: Phasen der Anlagenherstellung im Anlagenentstehungsprozess (ohne VIBN)

In der Produktionssystemkonzeption wird eine Abstimmung mit der Anlagenausarbeitung vorgenommen, um die Wechselwirkungen zwischen dem Produkt und dem Produktionssystem zu berücksichtigen. Am Ende der Phase liegt ein Konzept für das Produktionssystem zur Fertigung der maschinenbaulichen Anlage vor. Ist die Anlagenausarbeitung und die Produktionssystemkonzeption abgeschlossen, folgt die Detaillierung des Konzeptes des Produktionssystems in der Arbeitsplanung. Ergänzungen und Änderungen aus der Anlagenausarbeitung werden in das Produktionssystemkonzept eingearbeitet. Die letzten Phasen der Anlagenherstellung sind die Teilefertigung und Montage, in der die vorangegangene Arbeitsplanung umgesetzt wird und der Aufbau des Systems stattfindet. Auch hierbei handelt es sich nicht um ein streng sequentielles Vorgehen, vielmehr vollzieht sich die Fertigung und Montage von Modulen parallel. Auch werden einzelne Module schon früher in Betrieb genommen (Teilinbetriebnahme). Damit ist der Aufbau der Anlage abgeschlossen und das System ist als Nächstes in Betrieb zu nehmen.

## 5.4 Virtuelle Inbetriebnahme

In der Phase der *virtuellen Inbetriebnahme* wird das Steuerungsprogramm der maschinenbaulichen Anlage getestet. Mit der Phase wird während der Anlagenkonzipierung begonnen. Sie besteht aus den drei Unterphasen *Modellerstellung*, *Durchführung* und *Auswertung* (vgl. Bild 5-26). In der ersten Unterphase werden die Verhaltensmodelle für die VIBN erstellt, auf deren Basis in der Durchführung die Simulation der Anlage geschieht. In dieser Simulation wird das Steuerungsprogramm getestet und etwaige Fehler in der Auswertung identifiziert. Die Integration der VIBN und die detaillierte Beschreibung der Synchronisationspunkte erfolgen in Abschnitt 5.5.

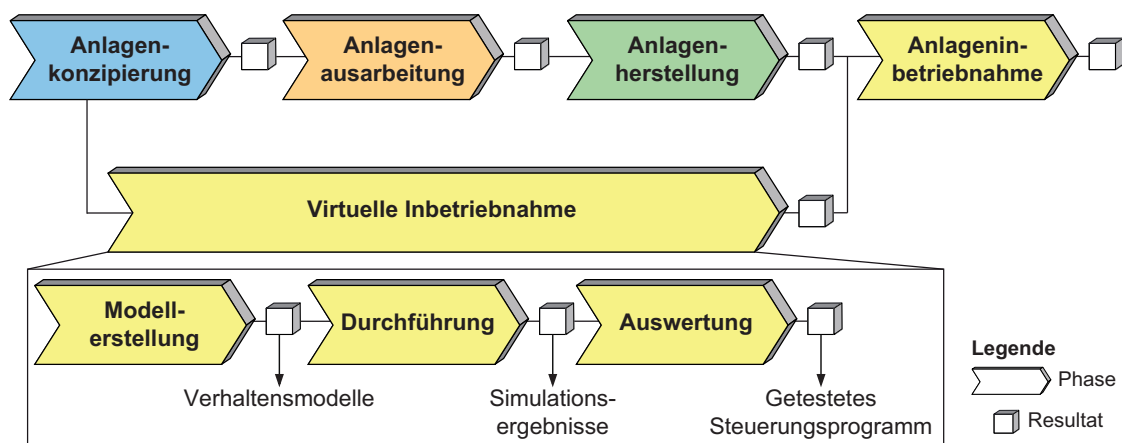


Bild 5-26: Phasen der virtuellen Inbetriebnahme im Anlagenentstehungsprozess

#### 5.4.1 Modellerstellung

Die Modellerstellung ist mit hohem Aufwand verbunden und wird deshalb so rationell wie möglich durchgeführt<sup>49</sup>. Insbesondere die Modellierungstiefe bestimmt den Aufwand. Mit zunehmender Modellierungstiefe und Detaillierung der Modelle steigt der Aufwand stark an. Allgemein gilt, dass die Modellierung so einfach wie möglich gestaltet wird. Wenn die Modellanforderungen erfüllt sind, ist eine ausreichende Detaillierung erreicht [Wal95, S. 42], [RB95, S. 63].

Ein Ansatz zur Wahl der geeigneten Modellierungstiefe für die VIBN ist in [LSB+12] und [SLT13] aufgezeigt. Die Methode zur Wahl der anforderungsgerechten Modellierungstiefe unterscheidet zwischen vier Modellierungstiefen [SLT13, S. 45]:

- 1) **Idealisierte Funktion:** Modelle dieser Modellierungstiefe besitzen den höchsten Abstraktionsgrad. Sie bilden die Funktionalität des Systems auf logische Weise ab. Es handelt sich um zeitdiskrete Zustandsautomaten, bei denen ein kontinuierliches Verhalten nicht berücksichtigt wird [SLT13, S. 45].
- 2) **Prinzipielle Machbarkeit:** In dieser Modellierungstiefe wird das Zeitverhalten mit modelliert. Eine Visualisierung des Systemzustandes ist zu diskreten Zeitpunkten möglich. Die Modelle werden physikalisch basiert modelliert und ermöglichen einen ersten Funktionsnachweis des Systems. Als idealtypische Modelle entsprechen sie Lösungsmustern<sup>50</sup> [SLT13, S. 45].

<sup>49</sup> Vgl. Abschnitt 2.6

<sup>50</sup> Vgl. Abschnitt 3.1.3



- 3) **Systemspezifisches Verhalten:** Bei dem systemspezifischen Verhalten findet die Modellierung physikalisch basiert statt und Nebeneffekte wie Reibung und Verlustströme werden mit berücksichtigt. Mit Modellen dieser Modellierungstiefe ist eine Analyse des Systemverhaltens und eine Regelauslegung möglich. Die Modelle dieser Ebene entsprechen Lösungselementen im Entwurfsprozess [SLT13, S. 45].
- 4) **Bauteiloptimierung:** In der Modellierungstiefe *Bauteiloptimierung* erfolgt die Modellierung mit der höchsten Detaillierung. Es werden alle Effekte so genau wie möglich modelliert. Diese Modellierungstiefe wird für die VIBN nicht verwendet. Sie fokussiert auf die Auslegung einzelner Bauteile der Anlage und ist für einen Test des Steuerungsprogramms nicht notwendig [SLT13, S. 45].

Neben unterschiedlicher Modellierungstiefe werden zur Verhaltensmodellierung auch unterschiedliche Modellklassen verwendet. Eine Übersicht der in der VIBN verwendeten Modellklassen sowie ihre Zuordnung zur Modellierungstiefe ist in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Modellklassen und ihre Zuordnung zu den Modellierungstiefen nach [SLT13, S. 44ff.]

Modellklasse	Beschreibung	Modellierungstiefe
Gestaltmodelle	Modelle aus der Domäne Konstruktion, z. B. 3-D-CAD	1
Zustandsmodelle	Modelle aus der Informatik, z. B. Zustandsdiagramme, Ereignismodelle	1-2
FE-Modelle	Modelle der Finite-Elemente-Methode aus der Domäne Mechanik	2-4
MKS-Modelle	Modelle der Mehrkörpersimulation aus der Domäne Mechanik	2-4
Mathematische Modelle	Mathematische Beschreibungen von Systemen, z. B. aus der Regelungstechnik für Regeler, Beobachter etc.	1-4

Um den Aufwand für die Modellerstellung so gering wie möglich zu halten, ist für jedes Modul zu bestimmen, welche Modellierungstiefe erforderlich ist. So können für den Test des Steuerungsprogramms unwichtige Module abstrakter modelliert werden, z. B. der mechanische Unterbau des Demonstrators. Ein Vorgehen zur Auswahl der Modellierungstiefe ist in [LSB+12] und [SLT13, S. 46] beschrieben. Das Vorgehen basiert auf dem in Bild 5-27 gezeigten Entscheidungsbaum.

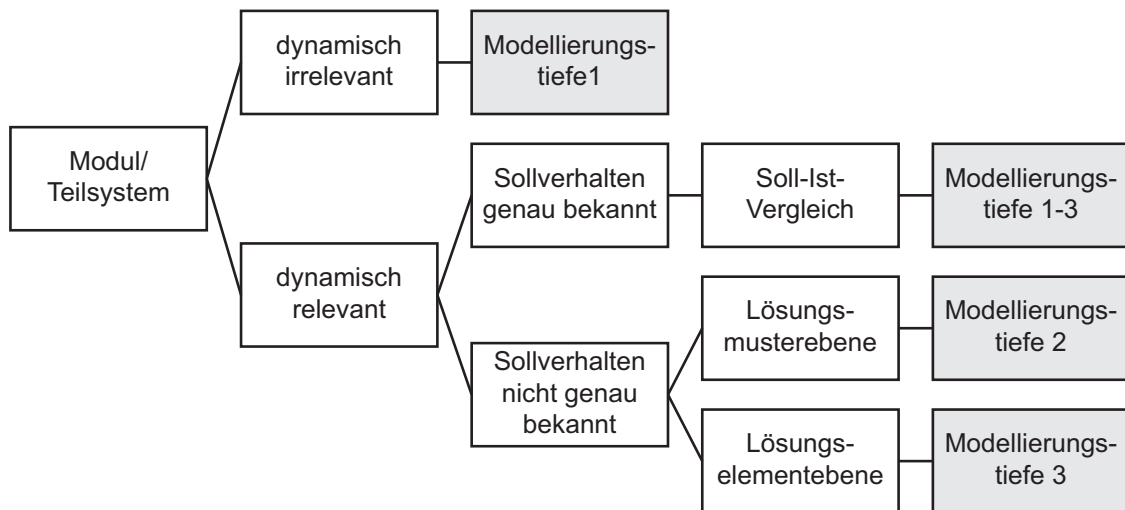


Bild 5-27: Entscheidungsbaum zur Wahl der Modellierungstiefe [LSB+12, S. 4]

Es wird zwischen dynamisch relevanten und dynamisch irrelevanten Modulen unterschieden. Bei dynamisch irrelevanten Modulen reicht für die VIBN die Modellierungstiefe 1 – *Idealisierte Funktion* aus. Dies ist z. B. beim mechanischen Unterbau des Demonstrators der Fall. Ist das Modul dynamisch relevant, muss zwischen solchen unterschieden werden, bei denen das Sollverhalten genau bekannt oder nicht genau bekannt ist. Ist das Sollverhalten genau bekannt, wird das Modul zunächst auf der ersten Modellierungstiefe beschrieben. Anschließend erfolgt ein Soll-Ist-Vergleich des Modells. Wenn die Abweichung zu groß ist, muss das Modul detaillierter modelliert werden. Das Modell ist so lange zu detaillieren, bis die Abweichung des Modells vom Sollverhalten hinreichend gering ist. Die zulässige Abweichung liegt im Ermessen des Modellierers. Ist das Sollverhalten nicht genau bekannt, wird anhand der Detaillierung der Module in der Anlagenkonzipierung und -ausarbeitung unterschieden. Liegt das Modul noch als Lösungsmuster vor, wird die Modellierungstiefe 2 – *Prinzipielle Machbarkeit* verwendet. Ist das Modul schon als Lösungselement beschrieben, kommt die Modellierungstiefe 3 – *Systemspezifisches Verhalten* zum Einsatz. Im Verlauf des Anlagenentstehungsprozesses werden alle Lösungsmuster zu Lösungselementen detailliert. Die Module müssen jedoch nicht zwingend in einer höheren Modellierungstiefe modelliert werden. Reicht die Lösungsmusterebene (Modellierungstiefe 2) aus, um die grundsätzliche Eignung des Lösungsmusters zu bestimmen, und ist der Unterschied der Lösungselemente für die VIBN unerheblich, werden die Modelle nicht weiter detailliert. Lichtschranken sind z. B. Lösungsmuster, bei denen die Modellierungstiefe – *Prinzipielle Machbarkeit* in der Regel für die VIBN ausreichend ist. Die unterschiedlich großen Strahldurchmesser der verschiedenen Lösungselemente können vernachlässigt werden. Eine Detaillierung der Modelle bei der Auswahl eines konkreten Produktes entfällt.

Die Modellierungstiefe ist auch von dem Fortschritt in der Anlagenherstellung abhängig. In den frühen Phasen ist noch keine derart detaillierte Modellierung möglich. Im Abschnitt 5.5 wird dies ausführlicher erläutert.

### 5.4.2 Durchführung

Wenn die ersten Vorgehensmodelle vorliegen, wird mit der Durchführung der VIBN begonnen. Der Test des Steuerungsprogramms erfolgt in Anlehnung an die VDI 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* [VDI2206] und dem Vorgehen nach BENDER [Ben05, S. 55ff.] stufenweise. Begonnen wird mit dem Test auf Komponentenebene, anschließend erfolgen die Integration zu Modulen und der Modultest, abschließend die Systemintegration und der Systemtest. Für die VIBN ist der abschließende Systemtest entscheidend. Hier wird das korrekte Zusammenspiel des gesamten Systems untersucht.

In der Testplanung und -vorbereitung werden die Testfälle definiert. Die Testfälle müssen folgende Informationen enthalten:

- „Was (Funktion, Genauigkeit usw.) ist zu testen?
- Welche Ausgangssituation ist hierfür erforderlich?
- Welche Eingaben (Daten und Signale mit allen für den Test ausschlaggebenden Eigenschaften wie Zeitbedingungen) sind notwendig?
- Welche Ergebnisse (Ausgabedaten und Reaktionen/Effekte) sind zu erwarten?“ [VDI3633-8, S. 50]

Die Beantwortung der ersten Frage ergibt sich aus dem Pflichtenheft, der Spezifikation, den Testszenarien und der Anforderungsanalyse, wobei auf den Umfang der Tests später noch eingegangen wird. Beispiele für Tests bei der VIBN sind:

- die korrekte Funktion der Anlage,
- das korrekte Verhalten der Anlage bei einem Kaltstart (Wiederinbetriebnahme),
- das korrekte Verhalten der Anlage bei einem Warmstart nach Betriebsunterbrechungen,
- das Systemverhalten bei Hindernissen auf den Schienen,
- das Systemverhalten bei einem Not-Aus,
- der Test von Nutzerinteraktionen.

Die erforderliche Ausgangssituation ergibt sich aus dem Testfall, d. h., ob er das gesamte System oder nur ein Teilsystem betrifft, ebenso aus dem vorangegangenen Systemzustand. Häufig ist ein vollständig funktionsbereites System notwendig [Her10, S. 102f.], z. B. zum Test eines Warmstarts.

Die Informationsbeschaffung zu den letzten beiden Fragen ist aufwändiger. Insbesondere die Eingaben für einen Testfall bestimmen in großen Maßen den Testaufwand. Die

Testsystematik in der VIBN muss sich von der bei der Softwaretechnik unterscheiden. Schon in der Softwareentwicklung ist es fast unmöglich, den kompletten Zustandsraum des Systems zu prüfen, d. h. das Systemverhalten für alle möglichen Kombinationen von Zuständen und Sequenzen aller Eingabeparameter [Her10, S. 100f.]. Bei maschinenbaulichen Anlagen kommt erschwerend hinzu, dass durch unbekannte Kopplungen mit der Umwelt die Komplexität noch einmal deutlich steigt. Aus diesem Grund ist ein Test mit vollständiger Pfadabdeckung in der VIBN nicht praktikabel [Her10, S. 101]. Es können also nicht alle Zustandsvariationen der Sensoren durchgespielt werden. In diesem Zusammenhang spielt auch wieder die Modellierungstiefe eine wichtige Rolle. Ist ein Sensor in der Modellierungstiefe 1-*Idealisierte Funktion* modelliert, besitzt er z. B. nur einen Ausgabeparameter mit zwei Parameterwerten (Ein, Aus). Ist er hingegen in einer detaillierteren Modellierungstiefe modelliert, können schon mehr Parameterwerte möglich sein, z. B. Ein, Aus, Kurzschluss, wiederholtes Ein und Aus etc. Durch die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe wird somit auch der Testaufwand reduziert. Aus diesen Gründen ist ein vollautomatisierter Test bei der VIBN nicht praktikabel und es müssen Testfälle vorgegeben werden.

Der letzte Schritt in der Testvorbereitung ist die Verifikation und Validierung der Verhaltensmodelle. Bei der Verifikation wird geprüft, ob die Modelle grundsätzlich plausibel und richtig sind und ob die Anforderungen aus der Testplanung erfüllt werden. In der Validierung wird geprüft, ob das Modell das reale System hinreichend genau beschreibt, um auch nicht spezifizierte Anforderungen erfüllen zu können [VDI2206, S. 54], was insbesondere für die Testszenarien<sup>51</sup> wichtig ist. Mit der Verifikation und Validierung wird auch geprüft, ob die in der vorangegangenen Phase ausgewählte Modellierungstiefe ausreichend ist. Ist das nicht der Fall, muss ggf. eine Detaillierung der Modelle erfolgen.

Bei einem vollständigen Funktionstest wurden von HERFS drei Komplexitätsstufen identifiziert, die in Tabelle 5-2 aufgeführt sind.

Testfälle der ersten Stufe *Gut*-Ablauf können aus dem Pflichtenheft, den Anforderungen und den Anwendungsszenarien<sup>52</sup> erstellt werden. Es wird das Verhalten des Steuerungsprogramms von der Wiederinbetriebnahme (Kaltstart) bis zur Funktionsbereitschaft getestet.

---

<sup>51</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.4

<sup>52</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.3 und 5.1.1.5

Tabelle 5-2: Drei Stufen zum vollständigen Funktionstest [Her10, S. 108]

Komplexitätsstufen	Bemerkungen und Beispiele
Test des Gut-Ablaufs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inbetriebnahme bis zur Funktionsbereitschaft</li> <li>• Inbetriebnahme und Test von einzelnen fehlerfreien Funktionsabläufen, wie z. B. das Halten eines Shuttles bei Hindernissen</li> </ul>
Funktionstest im projektierten Fehlerfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionstest unter Beachtung von Fehlerzuständen, wie z. B. dem Versagen eines Sensors, der verzögerten Reaktion automatisierungstechnischer oder mechanischer Komponenten</li> <li>• Zerstörungsfreie Prüfungen, wie z. B. Halt vor geöffneter Weiche</li> </ul>
Funktionstest durch eine stochastische Parameterveränderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HMI-Funktionstest, wie z. B. eine nicht definierte Reihenfolge einer Nutzeraktion</li> <li>• Stochastische Parameteränderungen im Verhalten</li> </ul>

Zur Generierung der Testfälle für die zweite Stufe werden die Testszenarien<sup>53</sup> herangezogen. Darüber hinaus werden die Verhaltensmodelle untersucht und die Sensoren identifiziert. Für diese kann eine vollständige Parametervariation erfolgen, was jedoch häufig zu aufwändig ist. Zur Reduktion der so erzeugten Testfälle können die Testszenarien und die Anforderungen herangezogen werden. So können z. B. Testfälle ausgeschlossen werden, die aus Pfaden bestehen, in denen Parameterkombinationen vorkommen, die zu einer Störungsmeldung im Steuerungsprogramm führen würden. Bei solchen Fehlern, die von der Steuerung abgefangen werden, ist ein einmaliger Test notwendig und alle Pfadkombinationen, die sich aus der Folge des Fehlers ergeben, müssen nicht mehr getestet werden. Für häufige Fehlerfälle werden Testfälle in einer Bibliothek hinterlegt, z. B. das Überfahren von Achsbereichen. Es wird in folgenden Projekten auf diese zurückgegriffen.

Testfälle der dritten Komplexitätsstufe werden durch zufällige stochastische Parametervariationen erzeugt. Dadurch kann der Testaufwand so stark ansteigen, dass solche Tests nicht für die gesamte Anlage durchgeführt werden können. Es können nur Ausschnitte der Anlage getestet werden, z. B. die Nutzerinteraktionen. Da das Verhalten des Bedieners nicht vorhersehbar ist, sind zufällige stochastische Parametervariationen, z. B. für den Test des HMI, geeignet. Für den Demonstrator ist ein Testfall dieser Komplexitätsstufe die Wiederinbetriebnahme bei zufällig verteilten Shuttles auf der Strecke. Es sind mehrere Testläufe durchzuführen, bei denen die Anzahl und Lage der Shuttles auf den Schienen zufällig verteilt sind.

<sup>53</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.4

Insbesondere die Komplexitätsstufen zwei und drei setzen voraus, dass die Modelle schon vor der Testfallerzeugung vorliegen. Der Aufwand zur Erstellung von solch komplexen Modellen ist sonst zu groß [Her10, S. 108]. Durch die in dieser Arbeit beschriebene Systematik ist das der Fall und es wird bei der Modellierung auf das Know-how der Entwickler zurückgegriffen.

Nach der Erstellung der Testfälle in der Testplanung und -vorbereitung sind die Tests durchzuführen und die Simulationsergebnisse zu dokumentieren. Es wird zunächst mit den Tests des *Gut*-Ablaufs begonnen. Anschließend sind die Tests in der nächsten Phase auszuwerten und das Steuerungsprogramm anzupassen. Tests der höheren Komplexitätsstufe setzen häufig einen funktionierenden *Gut*-Ablauf voraus.

### 5.4.3 Auswertung

Die in der vorangegangenen Phase vorgenommenen Tests müssen in dieser Phase analysiert werden. Informationen zur Fehlerbehebung sind für den Steuerungsentwickler bereitzustellen, die sog. Störungshypothesen. Das Störungsinformationssystem nach LITTO [Lit02] ermöglicht die Analyse der Tests und die Ermittlung von Störungshypothesen. Die Vorgehensweise zur Ermittlung von Störungshypothesen ist in Bild 5-28 dargestellt.

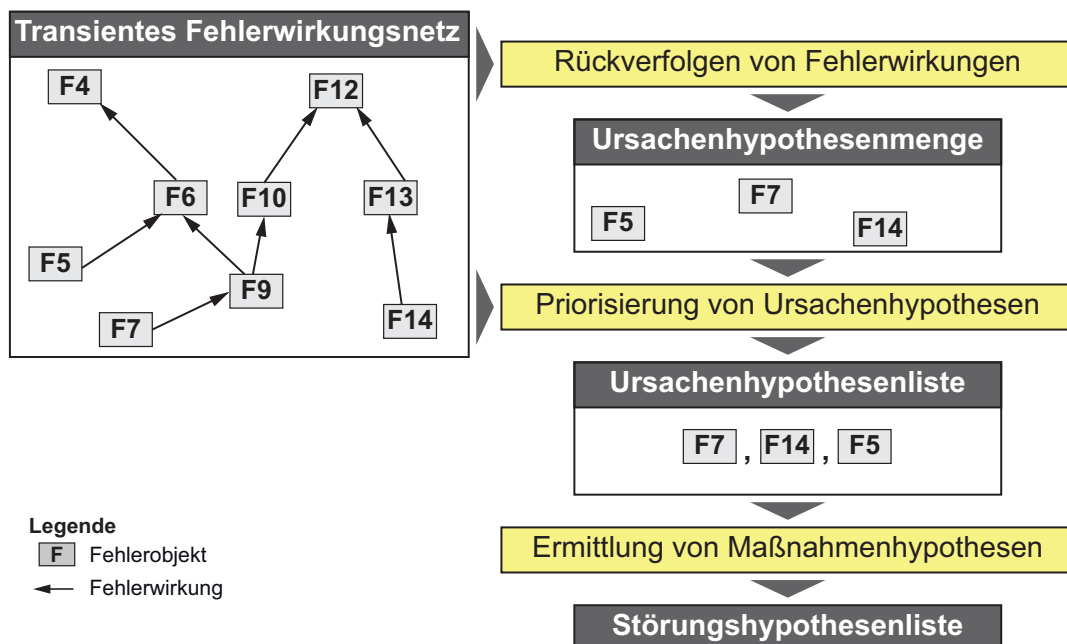


Bild 5-28: Vorgehensweise zur Ermittlung von Störungshypothesen [Lit02, S. 107]

Zunächst wird der diagnostizierte Fehler in das Fehlerwirkungsnetz eingereiht. Das Fehlerwirkungsnetz wird unter Zuhilfenahme von Fehlerbäumen<sup>54</sup> erstellt. Mit dem

<sup>54</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.4

Fehlerwirkungsnetz können die Fehlerwirkungen zurückverfolgt und Ursachenhypothesen aufgestellt werden. Die Ursachenhypothesen der Ursachenhypothesenmenge sind zu priorisieren. Dabei kommen folgende Anforderungen und Randbedingungen zur Anwendung:

- Ursachenhypothesen, die auf neuen Erfahrungen basieren, sind zu priorisieren.
- Real auftretende Störungen sind höher zu bewerten als potentielle Störungen.
- Ursachenhypothesen, die in der Vergangenheit zugetroffen haben, sind höher zu gewichten [Lit02, S. 107].

In der Ursachenhypothesenliste sind die Ursachenhypothesen ihrer Priorität nach aufgelistet. Aus dieser Liste werden Maßnahmenhypothesen erarbeitet und als Störungshypothesenliste an den Steuerungsentwickler übergeben. Dieser prüft dann die Hypothesen und identifiziert und behebt die Fehler.

Die Phasen *Durchführung* und *Auswertung* sind iterativ zu durchlaufen, bis das Steuerungsprogramm in der Simulation keine Fehler mehr verursacht und das getestete Steuerungsprogramm vorliegt. Es ist bereit für die Implementierung auf der realen Anlage.

## 5.5 Einordnung der VIBN

Im Folgenden wird die VIBN mit ihren Unterphasen in den Anlagenentstehungsprozess eingeordnet. Dabei werden die wichtigsten Interaktionen zwischen den einzelnen Phasen im Anlagenentstehungsprozess angesprochen. Der Fokus liegt auf Interaktionen mit Beteiligung der VIBN. Wie bereits angesprochen handelt es sich bei dem Vorgehen im Anlagenentstehungsprozess nicht um ein streng sequentielles Vorgehen. Jedoch können Interaktionen festgehalten werden, bei denen der Prozess so weit fortgeschritten ist, dass andere Prozesse begonnen werden können. Im Bild 5-29 ist die VIBN in den Anlagenentstehungsprozess eingeordnet. Die Interaktionen sind durch senkrechte Linien dargestellt. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

**Synthese – Modellerstellung:** Eine der Unterphasen der Synthese ist die Phase *Verhaltensmodelle erstellen*<sup>55</sup>. Mit dieser Phase beginnt die Modellerstellung in der VIBN. Die Wahl der Modellierungstiefe<sup>56</sup> ist vom Anwendungsfall abhängig. In dieser frühen Phase der Anlagenkonzipierung liegen noch nicht viele Informationen über das System vor. Es können deshalb noch keine detaillierten Modelle erstellt werden. Zunächst werden Modelle der Modellierungstiefe 1 *Idealisierte Funktion* erstellt. In der Anlagenkonzipie-

---

<sup>55</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.5

<sup>56</sup> Vgl. Abschnitt 5.4.1

rung finden Modelle der zweiten Modellierungstiefe *Prinzipielle Machbarkeit* häufiger Anwendung. Es werden meistens solche Anlagenteile modelliert, die ein dynamisch relevantes Verhalten aufweisen. Für solche Module ist mindestens die Modellierungstiefe 2 zu wählen. Zur Vereinfachung werden dynamisch irrelevante Module zu diesem Zeitpunkt im Prozess häufig vernachlässigt. Dies gilt z. B. für das Untergestell des Materialflusssystem. Es hat keinen großen Einfluss auf die Anlagenkonzipierung. Folglich werden auch keine Modelle davon benötigt. Zu diesem Zeitpunkt kommen überwiegend die ersten beiden Modellierungstiefen zur Anwendung.

**Prinziplösung – Anlagenherstellung:** Mit der Anlagenherstellung wird begonnen, wenn die Prinziplösung vorliegt. Werden die maschinenbauliche Anlage und das zugehörige Produktionssystem integrativ entwickelt, wird in der Anlagenkonzipierung damit begonnen<sup>57</sup>. Da das Produktionssystem bei einer maschinenbaulichen Anlage in der Regel vorgegeben ist, reicht es aus, wenn im Anschluss an die Prinziplösung mit der Produktionssystemkonzeption begonnen wird.

---

<sup>57</sup> Vgl. Abschnitt 5.3 und [Nor12, S. 99]



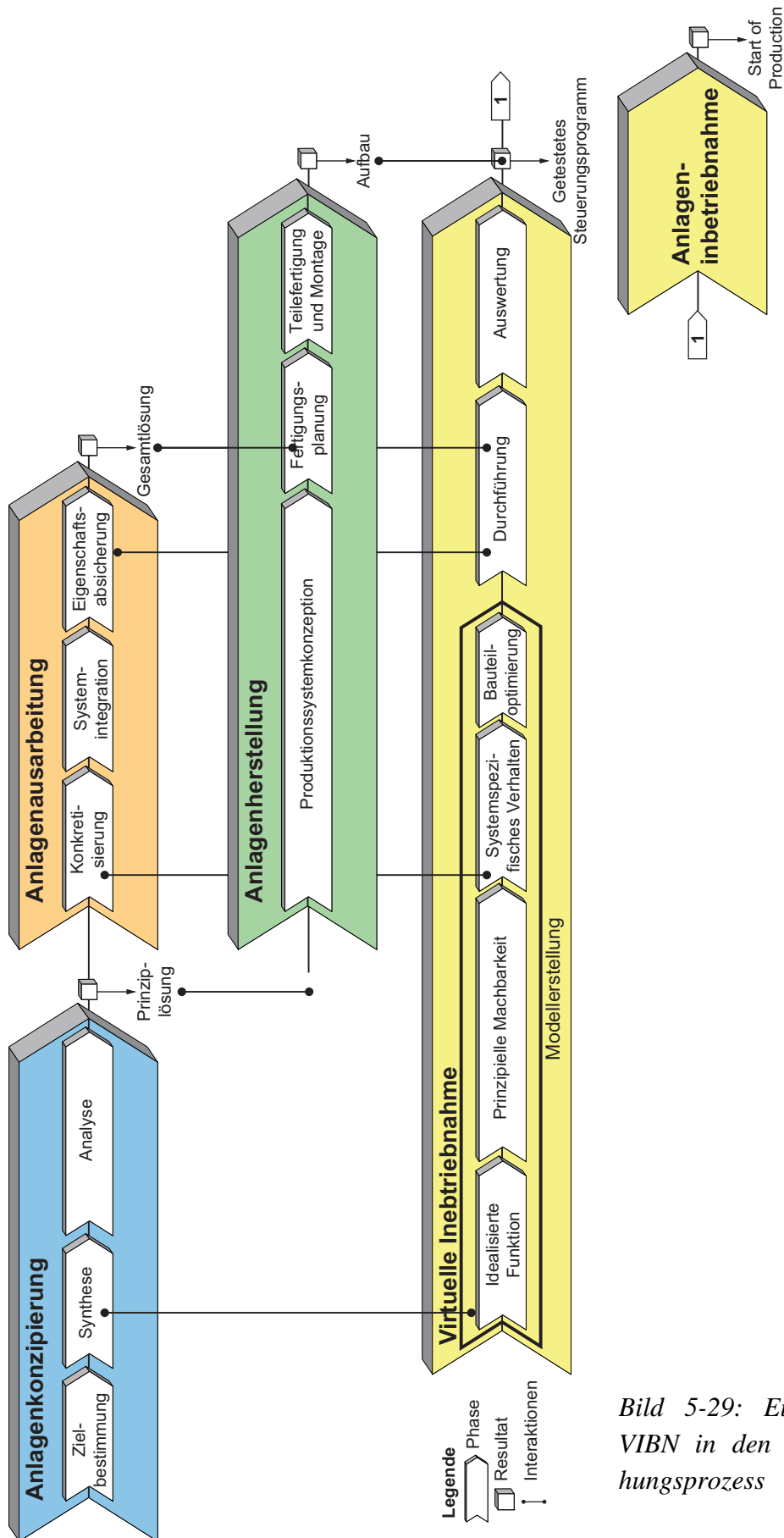


Bild 5-29: Einordnung der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess

**Konkretisierung – Systemspezifisches Verhalten:** In der Konkretisierung der Anlagenausarbeitung ist die Produktionssystemplanung so weit fortgeschritten, dass auch Modelle der Modellierungstiefe 3 *Systemspezifisches Verhalten* erstellt werden können, falls diese nicht schon in der Synthesephase *Lösungselemente* identifiziert<sup>58</sup> wurden und bereits Vorgehensmodelle vorliegen. Auch die vierte Modellierungstiefe *Bauteiloptimierung* wird in dieser Phase verwendet, kommt jedoch in der VIBN nicht zur Anwendung<sup>59</sup>. Die sequentielle Anordnung der Modellierungstiefen in Bild 5-29 ist gewählt worden, um zu verdeutlichen, zu welchem Zeitpunkt Modelle mit dieser Modellierungstiefe erstellt werden können. Es ist nicht so, dass alle Module in alle Modellierungstiefen modelliert werden<sup>60</sup>.

**Eigenschaftsabsicherung – Durchführung:** In der Eigenschaftsabsicherung können im Rahmen des Model Based Systems Engineering die Verhaltensmodelle genutzt werden. Mit der Durchführung der VIBN kann für die zentralen Module, für die schon Verhaltensmodelle vorliegen, begonnen werden. Die Eigenschaftsabsicherung dient zur abschließenden Überprüfung des Gesamtentwurfes und als erster Schritt in der VIBN mit dem Test des *Gut*-Ablaufs<sup>61</sup>.

**Gesamtlösung – Durchführung:** Mit Vorliegen der Gesamtlösung muss mit der vollständigen VIBN begonnen werden. Jetzt sind auch für solche Module Verhaltensmodelle zu erstellen, für die es in der Anlagenkonzipierung und -ausarbeitung nicht notwendig war, z. B. Untergestell des Materialflusssystemes. Die Simulationen sind durchzuführen und auszuwerten<sup>62</sup>.

**Gesamtlösung – Arbeitsplanung:** Zeitgleich mit der VIBN ist mit der Arbeitsplanung und anschließend mit der Fertigung und Montage zu beginnen. Während dieser Phasen der Anlagenherstellung wird die VIBN durchgeführt und ausgewertet. Am Steuerungsprogramm können ggf. Korrekturen vorgenommen werden.

**Aufbau – Getestetes Steuerungsprogramm:** Ist der Aufbau der maschinenbaulichen Anlage abgeschlossen und liegt das getestete Steuerungsprogramm vor, wird mit der Anlageninbetriebnahme begonnen. Das Vorgehen dabei wird im nächsten Abschnitt<sup>63</sup> beschrieben.

---

<sup>58</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.2

<sup>59</sup> Vgl. Abschnitt 5.4.1

<sup>60</sup> Vgl. Abschnitt 5.4.1

<sup>61</sup> Vgl. Abschnitt 5.5

<sup>62</sup> Vgl. Abschnitt 5.4.2 und 5.4.3

<sup>63</sup> Vgl. Abschnitt 5.5

## 5.6 Anlageninbetriebnahme

Die letzte Phase im Anlagenentstehungsprozess ist die *Anlageninbetriebnahme* (vgl. Bild 4-1). Bei der Inbetriebnahme wird die Funktionsbereitschaft der Anlage hergestellt. Durch die vorangegangene VIBN liegt ein getestetes Steuerungsprogramm vor, welches weniger Fehler aufweist als ein ungetestetes. Die Anlageninbetriebnahme wird durch Vorgehensweisen und Methoden unterstützt, die in Abschnitt 2.5 und 3.2 beschrieben wurden. Welche Vorgehensweise und Methoden gewählt werden, ist abhängig von der Art der maschinenbaulichen Anlage, d. h., ob es sich um eine Erweiterung eines bestehenden Produktionssystems oder um eine komplett neue Anlage handelt, ob eine Inbetriebnahme beim Hersteller möglich ist oder ob die Anlage nur beim Kunden in Betrieb genommen werden kann. Abhängig davon ist eine geeignete Vorgehensweise zu wählen. Die Zeit für die Inbetriebnahme verkürzt sich dabei, da ein bereits getestetes Steuerungsprogramm vorliegt.

Eine Vorgehensweise zur Anlageninbetriebnahme, die sich gut in die beschriebene Systematik eingliedert, ist die *Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen* nach DOMINKA [Dom07]. Der Hauptaufwand bei diesem Vorgehen ist die Modellierung [Dom07, S. 124]. Durch die vorangegangenen Phasen liegen schon Modelle vor und der zusätzliche Aufwand für die hybride Inbetriebnahme ist geringer als der Nutzen. Bei der hybriden Inbetriebnahme wird die maschinenbauliche Anlage in vier Phasen in Betrieb genommen.

### 1) Reine Anlagensimulation

Durch eine vollständige Simulation der maschinenbaulichen Anlage wird der Ausgangspunkt der hybriden Inbetriebnahme geschaffen. Ziel ist ein lauffähiges Simulationsmodell und Steuerungsprogramm. Das Steuerungsprogramm wird mittels HiL-Simulation getestet [Dom07, S. 61f.]. Dies ist in der Phase *virtuelle Inbetriebnahme* bereits geschehen.

### 2) Schrittweise Aktivierung der Anlagenaktorik

In dieser Phase werden die Aktoren in Betrieb genommen. Ziel ist es, das Zusammenspiel zwischen der Steuerung und den realen Komponenten zu überprüfen. Die Reihenfolge der Aktivierung der Aktoren ist dabei wichtig. Zunächst ist eine Anlagenzerlegung notwendig. Die Anlage wird in ihre Module unterteilt. Dabei wird die Modularisierung des Systems<sup>64</sup> genutzt. Als Nächstes werden kritische Aktoren identifiziert. Ein kritischer Aktor kann mit der Anlage oder dem Prozessgut kollidieren, z. B. das Shuttle bei offener Weiche. Anschließend werden die kritischen Aktoren dahingehend untergliedert, ob sie mit dem Prozessgut interagieren oder nicht. Ist die Anlage zerlegt und sind die kritischen Aktoren bestimmt, erfolgt die Aktivierung der Aktoren nach folgender Reihenfolge:

---

<sup>64</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.4

- 1) **Aktivierung der Module in Prozessrichtung:** Es werden die Module in Richtung der Prozessfolge<sup>65</sup> in Betrieb genommen. Das stellt sicher, dass die Fokussierung auf ein Subsystem erfolgt und keine Abhängigkeiten von vorangegangenen fehlerhaften Anlagenteilen bestehen.
- 2) **Vorrang kritischer Aktorik:** Innerhalb der Module werden zunächst kritische Aktoren, die mit der Anlage kollidieren können, aktiviert. Die Aktoren mit Interaktionen mit dem Prozessgut sind nicht kritisch, da die Anlage zu diesem Zeitpunkt noch ohne Prozessgut in Betrieb genommen wird.
- 3) **Gebündelte Aktivierung risikoloser Aktorik:** Als Letztes wird die risikolose Aktorik in überschaubaren Bündeln aktiviert [Dom07, S. 63ff.].

### 3) Inbetriebnahme ohne Prozessgut

Der Übergang von Phase zwei zu Phase drei ist fließend. Fokus dieser Phase sind nicht mehr die Module mit den einzelnen Aktoren. Es werden der Gesamtprozess und das korrekte Zusammenwirken von Anlage und Steuerung überprüft. Durch den Verzicht auf Prozessgut wird kein Risiko eingegangen, dass Bedienpersonal verletzt oder Prozessgut beschädigt wird [Dom07, S. 66].

### 4) Inbetriebnahme der realen Anlage

Das Prozessgut wird eingesetzt und die realen Sensoren kommen zur Anwendung. Es werden alle Simulationen von der Steuerung getrennt. Ziel ist der Nachweis über die Funktionsweise der Anlage mit Prozessgut. Auch bei diesem Schritt können noch Fehler gefunden werden, die beseitigt werden müssen. So können nur ca. 80 % der Steuerungsfunktionen virtuell getestet werden [Eve90, S. 64]. Es können auch Fehler in der Montage entstehen, die virtuell nicht getestet werden können, z. B. fehlerhafte Verdrahtung, beschädigte Bauteile etc. [Dom07, S. 67].

Wird die gesamte Anlage erst beim Kunden in Betrieb genommen, bietet die hybride Inbetriebnahme den Vorteil, dass Anlagenmodule schon beim Hersteller geprüft werden können. So verkürzt sich die kostenintensive Inbetriebnahme beim Kunden. Im Rahmen der Inbetriebnahme findet auch die Schulung des Bedienpersonals statt. Durch die VIBN wird mit der Schulung schon frühzeitig begonnen. Dabei besteht auch keine Verletzungsgefahr für das Bedienpersonal.

Am Ende der Anlageninbetriebnahme erfolgt der abschließende Abgleich der Funktionalität der maschinenbaulichen Anlage mit den Anforderungen und den Anwendungsszenarien<sup>66</sup>. Hier wird insbesondere überprüft, ob die Produktionsleistung den Anforde-

---

<sup>65</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.2.1

<sup>66</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1.3 und 5.1.1.5

rungen entspricht. Mit dem erfolgreichen Leistungsnachweis geht die Verantwortung vom Hersteller auf den Kunden über. Der Anlagenentstehungsprozess ist damit abgeschlossen.

## 5.7 Bewertung der Arbeit anhand der Anforderungen

Ziel der Arbeit ist die Nutzensteigerung der VIBN durch Verbesserung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses der Verhaltensmodelle. Dazu wurde in dieser Arbeit eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* entwickelt. Sie erfüllt die an sie gestellten Anforderungen aus Abschnitt 2.7, was im Folgenden erläutert wird.

**A1) Fachdisziplinenübergreifend einsetzbar:** Die Systematik beinhaltet die Anlagenkonzipierung, in der eine disziplinenübergreifende Beschreibung des Systems in Form der Prinziplösung erstellt wird (vgl. Abschnitt 5.1). Sie wird mit der Spezifikationstechnik CONSENS beschrieben. Dabei werden unterschiedliche Flussbeziehungen zwischen den Systemelementen berücksichtigt, z. B. Energie- und Informationsflüsse (vgl. Abschnitt 5.1.2.3). Von Beginn an werden die Steuerungsprogrammentwickler und Inbetriebnehmer in den Prozess mit einbezogen.

**A2) Abstimmung auf die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme:** Die Systematik beginnt mit der Anlagenkonzipierung, die in großen Teilen mit der Produktkonzipierung von mechatronischen Systemen übereinstimmt. Auch in der entwickelten Systematik wird zunächst die Prinziplösung erarbeitet (vgl. Abschnitt 5.1), auf Basis derer die fachdisziplinen-spezifische Konkretisierung durchgeführt wird. Die entwickelte Systematik nutzt ebenfalls die Spezifikationstechnik CONSENS. Somit wird die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme in der entwickelten Systematik genutzt.

**A3) Ganzheitliche Betrachtung des Anlagenentstehungsprozesses:** Die entwickelte Systematik beginnt mit der Anlagenkonzipierung, in der zunächst eine Zielbestimmung (vgl. Abschnitt 5.1.1) durchgeführt wird. In der weiteren Anlagenkonzipierung werden Planer, Entwickler und Inbetriebnehmer bei der Erstellung der Prinziplösung unterstützt. So werden beispielsweise durch die Testszenarien (vgl. Abschnitt 5.1.1.4) schon frühzeitig Einflüsse der späteren Phasen im Anlagenentstehungsprozess berücksichtigt. Die Systematik enthält ebenso die Anlagenherstellung (vgl. Abschnitt 5.3) sowie die Anlageninbetriebnahme (vgl. Abschnitt 5.6). Damit wird der gesamte Anlagenentstehungsprozess abgebildet und alle Beteiligten werden berücksichtigt.

**A4) Systematische Vorgehensweise:** Das Vorgehensmodell ist der Kern der entwickelten Systematik. Es dient als Leitfaden für den Anlagenentstehungsprozess unter Nutzung der VIBN (vgl. Abschnitt 4.2). Die Hauptphasen sind *Anlagenkonzipierung* (vgl. Abschnitt 5.1), *Anlagenausarbeitung* (vgl. Abschnitt 5.2), *Anlagenherstellung* (vgl. Abschnitt 5.3), *virtuelle Inbetriebnahme* (vgl. Abschnitt 5.4) und *Anlageninbetriebnahme*

(vgl. Abschnitt 5.6). Die Einordnung der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess wird in Abschnitt 5.5 vorgenommen. Den Ausgangspunkt der Systematik bildet die Zielbestimmung in der Anlagenkonzipierung. Anschließend wird die Prinziplösung erarbeitet, in der alle Einflüsse auf das System berücksichtigt werden, z. B. Anforderungen und Einflüsse aus späteren Phasen. Die Prinziplösung bildet den Ausgangspunkt für die fachdisziplinspezifische Anlagenausarbeitung zur Gesamtlösung. In der Anlagenherstellung erfolgt die Fertigung und Montage der Anlage. Parallel dazu wird in der VIBN das Steuerungsprogramm getestet. Liegen das getestete Steuerungsprogramm und der Anlagenaufbau vor, wird mit der Anlageninbetriebnahme begonnen. Das Vorgehen folgt somit einer Detaillierung und Konkretisierung.

**A5) Nutzung eines fachdisziplinenübergreifenden Beschreibungsmittels:** In der Systematik wird die Spezifikationstechnik CONSENS zur fachgebietsübergreifenden Beschreibung des Anlagenkonzeptes genutzt (vgl. Abschnitt 5.1). Sie wurde um Aspekte erweitert, um die Anforderungen aus der VIBN zu erfüllen, z. B. durch Testszenarien (vgl. Abschnitt 5.1.1.4). Somit wird für die ersten Phasen des Anlagenentstehungsprozesses eine gemeinsame Notation verwendet. Das unterstützt die Kooperation der beteiligten Fachleute und bei der Koordination der Teilaufgaben. Für die späteren Phasen gibt es keine einheitliche Notation, hier werden die fachspezifischen Beschreibungsmittel genutzt.

**A6) Nutzung von Erfahrungswissen:** Die Systematik unterstützt durch die Phase *Lösungsmuster suchen* (vgl. Abschnitt 5.1.2.2) bei der Nutzung von Erfahrungswissen. Die systematische Vorgehensweise sowie die Methode zur Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage (vgl. Abschnitt 5.1.2.4) fördern die Wiederverwendung von Anlagenmodulen und ihren Verhaltensmodellen. Das Vorgehen unterstützt Planer und Entwickler bei der Nutzung von bewährten Lösungen.

**A7) Modularisierung der maschinenbaulichen Anlage:** Die Systematik stellt eine Methode zur Modularisierung von maschinenbaulichen Anlagen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 5.1.2.4). Diese ermöglicht die Dekomposition von bestehenden Anlagen sowie die Modularisierung von neuen Anlagen. Die so gebildeten Module können im gesamten Anlagenentstehungsprozess genutzt werden. Des Weiteren ermöglichen sie die Wiederverwendung von Verhaltensmodellen.

**A8) Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe:** In der Systematik ist die Verwendung einer Methode zur Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe vorgesehen (vgl. Abschnitt 5.4.1). Diese unterstützt den Entwickler und Modellierer bei der Entscheidung, mit welcher Detaillierung ein Verhaltensmodell erstellt werden muss bzw. sollte. So wird der Aufwand für die Modellerstellung so gering wie möglich gehalten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Umfeld, in dem sich produzierende Unternehmen heute befinden, erfordert einen schnellen und sicheren Anlagenentstehungsprozess. Gleichzeitig steigt die Komplexität maschinenbaulicher Anlagen. Insbesondere die Steuerungssoftware hat, als Verbindungsglied zwischen den Anlagenteilen, eine immer größere Bedeutung. Die Integration der Steuerungssoftware in der Inbetriebnahme ist mit einer hohen Unsicherheit und daraus resultierenden Kosten verbunden. Risiken bei der Inbetriebnahme können durch eine virtuelle Inbetriebnahme reduziert werden. Dabei erfolgt der Steuerungsprogrammtest frühzeitig an Verhaltensmodellen der Anlage. So lässt sich die Softwarequalität für die anschließende reale Inbetriebnahme steigern. Der größte Nachteil der VIBN ist die aufwändige Erstellung der Verhaltensmodelle. Der Aufwand dafür kann teilweise den Nutzen übersteigen.

Ein **Lösungsansatz** zur Verbesserung der VIBN liegt in der Veränderung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses der Verhaltensmodelle. Dies kann zum einen durch die Reduktion des Aufwands bei der Modellerstellung geschehen, indem bestehende Modelle wiederverwendet werden. Zum anderen können durch eine frühzeitige Integration der VIBN in die Produktionssystementwicklung die Verhaltensmodelle genutzt werden.

Die Integration der VIBN in den Anlagenentstehungsprozess stellt einen Ausgangspunkt zur Verbesserung dar. Die wesentliche **Herausforderung** besteht darin, dass bereits in der Anlagenkonzipierung die Anforderungen der virtuellen und realen Inbetriebnahme berücksichtigt werden müssen. Die maschinenbauliche Anlage ist so zu modularisieren, dass die Module von der Anlagenkonzipierung bis zur Inbetriebnahme in adäquater Modellierungstiefe genutzt werden können. Die Module müssen in zukünftigen Projekten wiederverwendet werden können, insbesondere bei der VIBN. Bei der Wahl der Modellierungstiefe für die Verhaltensmodelle muss der Nutzer unterstützt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde überprüft, ob bestehende Ansätze diesen Herausforderungen gerecht werden. Defizite bestehen besonders darin, dass kaum ein Ansatz den gesamten Anlagenentstehungsprozess berücksichtigt. In der Regel fokussieren sie entweder auf die Produktionssystemplanung oder auf die Inbetriebnahme. Darüber hinaus liegen auch Defizite bei der Modularisierung von maschinenbaulichen Anlagen und bei der Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe vor. Es ergibt sich somit ein **Handlungsbedarf** für eine *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*.

Die Systematik umfasst drei Bestandteile:

- Ein **Vorgehensmodell** beschreibt detailliert die Tätigkeiten im Anlagenentstehungsprozess. Es erläutert die erforderlichen Eingangsinformationen sowie die er-

zeugten Ausgangsinformationen. Darüber hinaus steuert es den Einsatz von Methoden und Werkzeugen im Prozess.

- Zur Lösung von Teilaufgaben werden **Methoden und Werkzeuge** bereitgestellt. Hierzu zählen u. a. die frühzeitige Berücksichtigung von Testszenarien, die Modularisierung des Systems sowie die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe.
- Für die integrative Beschreibung des Anlagenkonzeptes wird die **Spezifikationstechnik** CONSENS eingesetzt. Sie ist an die Besonderheiten bedingt durch die VIBN angepasst und um notwendige Konstrukte erweitert.

Die entwickelte Systematik greift auf einige der untersuchten Ansätze zurück, passt sie ggf. an und integriert sie in ein detailliertes Vorgehensmodell. Sie lehnt sich an das Vorgehensmodell zum Entwurf mechatronischer Systeme aus dem Projekt *Entwurfstechnik intelligente Mechatronik* an. Die Anlagenkonzipierung wurde dahingehend erweitert, dass Einflüsse aus der VIBN berücksichtigt werden und die Anforderungen an Verhaltensmodelle zur VIBN frühzeitig aufgenommen werden.

Die Anwendung der Systematik wurde exemplarisch an einem Materialflusssystem demonstriert. Das Vorgehen wurde durchlaufen und die entsprechenden Methoden und Werkzeuge wurden eingesetzt. Es wurde gezeigt, dass die entwickelte Systematik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Es besteht **weiterer Forschungsbedarf** bei der durchgängigen informationstechnischen Umsetzung der Systematik. Derzeit gibt es nur softwaretechnische Lösungen für einzelne Aspekte im Anlagenentstehungsprozess. Sie bieten jedoch keine Möglichkeit, um die Informationen und Ergebnisse aus früheren Phasen zu übernehmen. Im Verbundprojekt *Virtuelle Synchronisation von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung* wurde der Mechatronic Modeller zur softwaretechnischen Unterstützung der Spezifikationstechnik CONSENS entwickelt. Er ist um die neuen Aspekte aus dieser Arbeit zu erweitern. Die Informationen aus dem Mechatronic Modeller können auch nicht automatisiert für die nächsten Phasen übernommen werden. Insbesondere in der automatisierten Modellerstellung liegt noch viel Potential für Verbesserungen. In den späteren Phasen des Anlagenentstehungsprozess fehlt es noch an der Durchgängigkeit der softwaretechnischen Toolkette. Dies gilt insbesondere für die Software, die in der VIBN zum Einsatz kommt. Bisher können Modelle aus vorangegangenen Phasen der Produktionssystemplanung nicht automatisiert übernommen werden. Es fehlt ebenfalls an einer Modellbibliothek für die Verhaltensmodelle, damit diese einfach wiederverwendet werden können. Auch die Methode zur Wahl der geeigneten Modellierungstiefe ist weiter zu verfeinern.

Die Systematik gliedert sich in das übergeordnete Ziel einer neuen Schule des Entwurfs technischer Systeme ein, in der Produkt und Produktionssystem integrativ entwickelt und der Prozess ganzheitlich betrachtet werden soll.



## 7 Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
CPS	Cyber-Physical Systems
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSM	Design Structure Matrix
EOP	end of production
ggf.	gegebenenfalls
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface
insb.	insbesondere
MBSE	Model Based Systems Engineering
MES	Manufacturing Execution System
METUS	Methodische Unterstützung der Systembildung
MFD	Modular Function Deployment
MIM	Modular Indication Matrix
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QFD	Quality Function Deployment
RFID	Radio Frequency Identification
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Systems Engineering
SiL	Software-in-the-Loop
SOP	start of production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
u. a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme

VRML    Virtual Reality Modeling Language

z. B.    zum Beispiel

z. T.    zum Teil

## 8 Literaturverzeichnis

### Publikationen

- [AFG+03] ARNOLD, J.; FÖRSTER, A.; GÄSE, T.; GÜNTHER, U.; KOBYLKA, A.; WIRTH, S.: Integrative modulare Produktionssystemplanung. Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2003
- [Agg87] AGGTELEKY, B.: Fabrikplanung - Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung. Carl Hanser Verlag, Band 1, München, 2. Auflage, 1987
- [Agg90a] AGGTELEKY, B.: Fabrikplanung - Werkentwicklung und Rationalisierung. Carl Hanser Verlag, Band 2, München, 2. Auflage, 1990
- [Agg90b] AGGTELEKY, B.: Fabrikplanung - Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung. Carl Hanser Verlag, Band 3, München, 1990
- [AIS77] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.: A pattern language - Towns, buildings, construction. Oxford University Press, Band 2, New York, 1977
- [Aka04] AKAO, Y.: Quality Function Deployment - Integrating Customer Requirements Into Product Design. Productivity Press, New York, 2004
- [Alb94] ALBERS, A.: Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik - Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In: Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 73–105
- [AR11] ABELE, E.; REINHART, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [AR68] AUSSCHUSS FÜR WIRTSCHAFTLICHE FERTIGUNG E.V.; VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION. (HRSG.): Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil I - Arbeitsplanung. Beuth Verlag, Berlin, 1968
- [Bar11] BARTH, M.: Automatisch generierte Simulationsmodelle verfahrenstechnischer Anlagen für den Steuerungstest. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, VDI Verlag, Düsseldorf, 2011
- [Bat06] BATHELT, J.: Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme. Dissertation, ZPE, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 2006
- [Bau82] BAUMANN, H. G.: Systematisches Projektieren und Konstruieren - Grundlagen u. Regeln für Studium u. Praxis. Springer, Berlin, 1982
- [BB80] BIRKHOFER, H.; BOLTE, W.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. VDI Verlag, Düsseldorf, 1980
- [BD08] BERGERT, M.; DIEDRICH, C.: Durchgängige Verhaltensmodellierung von Betriebsmitteln zur Erzeugung digitaler Simulationsmodelle von Fertigungssystemen. atp Automatisierungstechnische Praxis, Ausgabe 7/2008, S. 61–66
- [BDK+05] BENDER, K.; DOMINKA, S.; KOC, A.; PÖSCHL, M.; RUSS, M.; STÜTZEL, B.: Best-Practice-Empfehlungen für die Auswahl von QSM. In: Bender, K. (Hrsg.). Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Springer, Berlin, 2005, S. 263–293
- [Bei95] BEIMS, H. D.: Praktisches Software-Engineering - Vorgehen, Methoden, Werkzeuge. Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [Ben05] BENDER, K.: Methodik des virtuellen Funktionstests. In: Bender, K. (Hrsg.). Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung. Springer, Berlin, 2005, S. 55–63

- [BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, M.; HUSS, S. A.; WALDSCHMIDT, K.: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1996
- [BH09] BOTASCHANJAN, J.; HUMMEL, B.: Specifying the worst case - orthogonal modeling of hardware errors. In: Proceedings of the 18th International Symposium on Software Testing and Analysing, ISSTA '09, 2009, S. 273–284
- [BKC+08] BISCHOFF, E.; KUHLEN, T.; CERFONTAINE, P.; BÖKMANN, N.; RUES, K.: Virtuelle Walzanlagensimulation in Echtzeit. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.). 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung - Grundlagen, Methoden und Werkzeuge. 5./6. Juni 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 232, Paderborn, 2008, S. 141–158
- [BKH+09] BERGERT, M.; KIEFER, J.; HÖME, S.; FEDROWITZ, C.: Einsatz der Virtuellen Inbetriebnahme im automobilen Karosserierohbau - Ein Erfahrungsbericht. In: Kasper, R. (Hrsg.). Tagungsband zur 9. Magdeburger Maschinenbau-Tage — Forschung in Bewegung, 2009, S. 388–397
- [Boe88b] BOEHM, B. W.: A Spiral Model of Software-Engineering - Vorgehen, Methoden, Werkzeuge. Carl Hanser Verlag, München, 1988
- [Brö95] BRÖHL, A.-P. (Hrsg.): Das V-Modell - Der Standard für die Softwareentwicklung. Oldenbourg Verlag, München, 2. Auflage, 1995
- [BSI12-ol] BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT DER INFORMATIONSTECHNIK: Das V-Modell XT. Unter: [www.v-modell-xt.de](http://www.v-modell-xt.de), 21.08.2013
- [Bul86] BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung - Handbuch für die Praxis. Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [CF92] CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T.: Automobilentwicklung mit System - Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA. Campus-Verlag, Frankfurt a. M., 1992
- [DAH08] DENKENA, B.; AMMERMANN, C.; HOPPE, P.: Ramp-Up-Halbe - Verkürzung von Fertigungsanläufen - Anlaufoptimierung durch Einsatz virtueller Fertigungssysteme. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 3/2008, S. 143–148
- [DH02] DAENZER, W. F.; HABERFELLNER, R.: Systems engineering - Methodik und Praxis. Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 11. Auflage, 2002
- [DH07] DOMINKA, S.; HEUSCHMANN, C.: Prozessgutsimulation und Anlagenteilsimulation zur Verkürzung der Inbetriebnahme. Automatisierungstechnische Praxis, Ausgabe 3/2007, S. 55–58
- [Die02] DIERSSEN, S.: Systemkopplung zurkomponentenorientierten Simulation digitaler Produkte. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, VDI Verlag, Band 358, Düsseldorf, 2002
- [Dom07] DOMINKA, S.: Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen - Von der virtuellen zur realen Inbetriebnahme. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Sierke, Göttingen, 2007
- [Dud14a-ol] DUDEN: Das Fremdwörterbuch - Konzeption. Unter: <http://www.duden.de/node/659164/revisions/1316454/view>, 12.03.2014
- [Dud14b-ol] DUDEN: Das Fremdwörterbuch - Systematik. Unter: <http://www.duden.de/node/707265/revisions/1102685/view>, 12.03.2014
- [Dum11] DUMITRESCU, R.: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe, Band 286, Paderborn, 2011
- [EBL95] EVERSHEIM, W.; BOCHTLER, W.; LAUFENBERG, L. (Hrsg.): Simultaneous Engineering - Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Springer, Berlin, 1995

- [EE99] ERICSSON, A.; ERIXON, G.: Controlling Design Variants - Modular Product Platforms. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1999
- [EGG+12] EIGNER, M.; GERHARDT, F.; GILZ, T.; MOGO NEM, F.: Informationstechnologie für Ingenieure. Springer Vieweg, Berlin, 2012
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2009
- [ELP+05] EVERSHEIM, W.; LUCZAK, H.; PFEIFER, T.; SCHUH, G.; KABEL, T.; KUBOSCH, A.; SIMON, M.; WITTE, V.: Management integrierter Produktentstehung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.). Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer, Berlin, 2005, S. 21–74
- [Eri96] ERIXON, G.: Modular Function Deployment (MFD) - Support for Good Product Structure Creation. In: Tichem, M. (Hrsg.). Proceedings of the second WDK Workshop on Product Structuring. Delft, 3-4 June 1996, Delft University of Technology, Delft, 1996
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: Organisation der Produktionstechnik Band 4 - Fertigung und Montage. VDI Verlag, Düsseldorf, 2. Auflage, 1989
- [Eve90] EVERSHEIM, W.: Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen - Strategien und Praxisbeispiele zur Rationalisierung in der Einzel- und Kleinserienproduktion. VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
- [Eve96] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Grundlagen. VDI Verlag, Band 1, Düsseldorf, 3. Auflage, 1996
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Arbeitsvorbereitung, Springer, Band 3, Berlin, 3. Auflage, 1997
- [EWS+94] EPPINGER, S. D.; WHITNEY, D.; SMITH, R.; GEBALA, D.: A model-based method for organizing tasks in product development. Research in Engineering Design, Ausgabe 1/1994, S. 1-13
- [FD08] FÖLLINGER, O.; DÖRRSCHEIDT, F.: Regelungstechnik - Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Hüthig, Heidelberg, 10. Auflage, 2008
- [FFH+00] FLATH, M.; FUHRMANN, G.; HUANG, M.; STROBL, G.: Entwicklungsmethodik Mechatronik. In: Gausemeier, J.; Lückel, J. (Hrsg.). Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2000
- [FMF+10] FRANKE, J.; MERHOF, J.; FISCHER, C.; RISCH, F.: Intelligente Steuerungskonzepte für wandlungsfähige Produktionssysteme. Industrie-Management, Ausgabe 2/2010, S. 61–64
- [FMS08] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: A practical guide to SysML - Systems Model Language. Elsevier/Morgan Kaufmann, Burlington, 2008
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinzipiellösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Gab14a-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon - Produktion. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/13462/produktion-v8.html>, 12.03.2014
- [Gab14b-ol] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon - Anlagen. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1418/anlagen-v11.html>, 12.03.2014
- [GAC+13] GAUSEMEIER, J.; ANACKER, H.; CZAJA, A.; WABMANN, H.; DUMITRESCU, R.: Auf dem Weg zu intelligenten technischen Systemen. In: Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Rammig, F.-J.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.). 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2013
- [GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M. (Hrsg.): agendaCPS - Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Springer, Berlin, 2012

- [GBD+12] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; DOROCIAC, R.; MÜLDER, A.; NYBEN, A.; TERFLOTH, A.: Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem. In: 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
- [GBR10] GAUSEMEIER, J.; BRANDIS, R.; REYES-PEREZ, M.: A Specification Technique for the Integrative Conceptual Design of Mechatronic Products and Production. In: Proceedings of the International Design Conference, 2010
- [GD10] GAUSEMEIER, J.; DEYTER, S.: Spezifikation der Prinziplösung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J. (Hrsg.). Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GEK01] GAUSEMEIER, J.; EBBESMEYER, P.; KALLMEYER, F.: Produktinnovation - Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [GFD+09] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design, Ausgabe 4/2009, S. 201–223
- [GK07] GIENKE, H.; KÄMPF, R.: Handbuch Produktion - Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [GLR+00] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmässigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79, Paderborn, 2000
- [GLS04] GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; SCHUH, G.: Planung der Produkte und Fertigungssysteme für die Märkte von morgen - Ein praktischer Leitfaden für mittelständische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. VDMA-Verlag, Frankfurt, 2004
- [Göp98] GÖPFERT, J.: Modulare Produktentwicklung - Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1998
- [GP14] GAUSEMEIER, J.; PLASS: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 2014
- [GS00] GÖPFERT, J.; STEINBRECHER, M.: Modulare Produktentwicklung leistet mehr - Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen. Harvard Business Manager, Ausgabe 3/2000, S. 21–31
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.). Wissenschaftsforum 2011 - Intelligente Technische Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011, S. 7–35
- [GW11] GAUSEMEIER, J.; WIENDAHL, H.-P.: Deutschland braucht Wertschöpfungswachstum - Einführung. In: Gausemeier, J.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.). Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland. Springer, Berlin, 2010, S. 9–16
- [Han55] HANSEN, F.: Konstruktionssystematik - Eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure. VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- [HB96] HOFMANN, K.; BUNGARD, W.: Anlaufmanagement am Beispiel der Automobilindustrie. In: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H. J. (Hrsg.). Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management. Springer, Berlin, 1996, S. 1085–1110
- [Her10] HERFS, W. J.: Modellbasierte Software in the Loop Simulation von Werkzeugmaschinen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, RWTH Aachen, Apprimus-Verlag, Aachen, 2010
- [Hes01] HESSE, S.: Sensoren in der Fertigungstechnik, Festo AG, 2001

- [HSM+10] HOFFMANN, P.; SCHUMANN, R.; MAKSOUD, T. M. A.; PREMIER, G. C.: Virtual Commissioning of Manufacturing Systems a Review and New Approach for Simplification. In: Proceedings of the 24th European Conference on Modeling and Simulation, ECMS 2010, 2010, S. 175–181
- [HSM+12] HOFFMANN, P.; SCHUMANN, R.; MAKSOUD, T. M. A.; PREMIER, G. C.: Research on Simplified Modelling Strategy for Virtual Commissioning. In: Proceeding of the European Modeling and Simulation Symposium 2012, 2012, S. 293–302
- [HTF96] HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T.: Mechatronics - "What Is It, Why and How? An Editorial. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996
- [Hup76] HUPKA, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse - Analyse der Konstruktionstätigkeiten. Springer, Berlin, 1976
- [HWF+12] HABERFELLNER, R.; DE WECK, O.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.: Systems Engineering - Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli, Zürich, 12. Auflage, 2012
- [INC07] INCOSE: Systems Engineering Vision 2020. September 2007
- [KBB06] KIEFER, J.; BAER, T.; BLEY, H.: Mechatronic-oriented Engineering of Manufacturing Systems Taking the Example of the Body Shop. In: CIRP (Hrsg.). Proceedings of LCE 2006. Leuven, 2006, S. 681–686
- [Kel94] KELLER, H.: Wissensbasierte Inbetriebnahme und adaptive Regelung eines pneumatischen Linearantriebs. VDI Verlag, Düsseldorf, 1994
- [KH96] KUSIAK, A.; HUANG, C.-C.: Development of Modular Products. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology - Part A. Ausgabe 4/1996, S. 523–538
- [KHK10] KUFNER, A.; HAUG, K.; KLEMM, P.: Modellierung von Montagemaschinen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A. (Hrsg.). Entwurf mechatronischer Systeme - Grundlagen, Methoden und Werkzeuge. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2010, S. 115–126
- [Kie07] KIEFER, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III, Universität des Saarlandes, LKT, Univ., Band 43, Saarbrücken, 2007
- [KNT09] KAISER, L.; NORDSIEK, D.; TERFLOTH, A.: Softwaregestützte Konzipierung mechatronischer Systeme und der zugehörigen Produktionssysteme. ATZelextronik, Ausgabe 5/2009, S. 30-35
- [Koe07] KOEPPEN, B.: Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2007
- [Köv10] KÖVARI, L.: Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Band 35, Karlsruhe, 2010
- [KR03] KONOLD, P.; REGER, H.: Praxis der Montagetechnik - Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage, 2003
- [Kre08] KRENZ, A.: Konzeptionsentwicklung in Kindertagesstätten - Professionell, konkret, qualitätsorientiert. Bildungsverl. EINS, Troisdorf, 2008
- [KSG84] KETTNER, H.; SCHMIDT, J.; GREIM, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Carl Hanser Verlag, München, 1984

- [KWH12] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J.: Bericht der Promotorengruppe Kommunikation - Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0/Handlungsempfehlungen zur Umsetzung. Berlin, März 2012
- [KZB+01] KALLENBACH, E.; ZÖPPIG, V.; BIRLI, O.; FEINDT, K.; STRÖHLA, T.; SAFFERT, E.; SCHMIDT, J.: Integration mechatronischer Systeme. In: Innovative Produktentwicklungen - Tagung Frankenthal, 12./13. September 2001, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001, S. 57–72
- [Lac12] LACOUR, F.-F. R.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, iwv-Forschungsberichte, Band 257, München, 2012
- [Lan00] LANGLOTZ, G.: Ein Beitrag zur Funktionsstrukturentwicklung innovativer Produkte. Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [Lan04] LANZA, G.: Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2004
- [LG99] LAUBER, R.; GÖHNER, P.: Prozessautomatisierung. Springer, Band 1, Berlin, 3. Auflage, 1999
- [Lin07] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer, Berlin, 2. Auflage, 2007
- [Lit02] LITTO, M.: Störungsinformationssystem - Informationsmodell und Erstellungssystematik. Jost-Jetter, Band 144, Heimsheim, 2002
- [Lot92] LOTTER, B.: Wirtschaftliche Montage - Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. VDI Verlag, Düsseldorf, 2. Auflage, 1992
- [LSB+12] LOCHBIECHLER, M.; SCHMÜDDERRICH, T.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodology for Selecting the Modeling Depth of Object-Oriented Behavioral Models. In: Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET 2012, July 5.-6. 2012, Zurich, 2012
- [Mau07] MAURER, M.: Structural Awareness in Complex Production Design. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Dr. Hut, München, 2007
- [Mau10] MAUDERER, M.: Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen - am Beispiel von starren Fertigungssystemen. Herbert Utz Verlag, Band 250, München, 2010
- [Mic06] MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 196, Paderborn, 2006
- [Mil92] MILBERG, J.: Werkzeugmaschinen-Grundlagen - Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen. Springer, Berlin, 1992
- [MK00] MEIER, H.; KREUSCH, K.: Virtuelle Maschinen für eine realistische Simulation. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 1/2/2000, S. 19–21
- [MKD11] MÖLLER, K.; KLATT, T.; DREES, A.: Heutige und zukünftige Paradigmen des Produktionsstandorts Deutschland. In: Gausemeier, J.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.). Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland. Springer, Berlin, 2010, S. 19–32
- [Mon11-ol] MONTRATEC: MONTRAC - Erhöhung der Produktivität durch flexible und intelligente Intralogistik. Unter:  
[http://www.montratec.com/docs/Kataloge/2011\\_Montratec\\_D\\_web.pdf](http://www.montratec.com/docs/Kataloge/2011_Montratec_D_web.pdf), 06.06.2013
- [Mül90] MÜLLER, J.: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften - Systematik, Heuristik, Kreativität. Springer, Berlin, 1990



- [NE98] NILSSON, P.; ERIXON, G.: The Chart of Modular Function Deployment. In: Tichem, M.; Andreasen, M.; Duffy, A. (Hrsg.). Proceedings of the 4th WDK Workshop on Product Structuring - Design of Product Families. 1998
- [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
- [NS11] NEUGEBAUER, R.; SCHOB, U.: Reducing the model generation effort for the virtual commissioning of control programs. Production Engineering, Ausgabe 5/2011, S. 539–547
- [NT12] NONAKA, I.; TAKEUCHI, H.: Die Organisation des Wissens - Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. Campus-Verlag, Frankfurt a. M., 2. Auflage, 2012
- [Oes12] OESTEREICH, B.: Analyse und Design mit der UML 2.5 - Objektorientierte Softwareentwicklung. Oldenbourg Verlag, München, 10. Auflage, 2012
- [Osm98] OSMERS, U.: Projektieren speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Band 87, Karlsruhe, 1998
- [PB96] POMBERGER, G.; BLASCHEK, G.: Software-Engineering. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1996
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Springer, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [PE94] PIMMLER, T.; EPPINGER, S. D.: Integration Analysis of Product Decompositions. In: Proceeding of the ASME 6th International Conference on Design Theory and Methodology, 1994, S. 343–351
- [Phi04] PHILIPPSEN, H.-W.: Einstieg in die Regelungstechnik - Vorgehensmodell für den praktischen Reglerentwurf. Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [Pre94] PRESSMANN, R.: Software Engineering - a practitioner's approach. McGraw-Hill, 1994
- [Pug81] PUGH, S.: Concept selection — a method that works. In: Hubka, V.; Eder, W. E. (Hrsg.). Proceedings of the International Conference on Engineering Design. Edition Heurista, Zürich, 1981
- [Rab09] RABL, M.: Durchführung von Entwicklungsprojekten und Simultaneous Engineering. In: Gaubinger, K.; Werani, T.; Rabl, M. (Hrsg.). Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement - Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten. Gabler, Wiesbaden, 2009, S. 227–238
- [RB95] ROBINSON, S.; BHATIA, V.: Secrets of Successful Simulation Projects. In: Alexopoulos, C.; Kang, K.; Lilegdon W. R.; Goldman D. (Hrsg.). Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, 1995, S. 61–67
- [REF87] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 1987
- [REF90] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Methodenlehre der Betriebsorganisation - Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1990
- [REF91] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Planung und Steuerung. Carl Hanser Verlag, München, 1991
- [REF93a] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Methodenlehre der Betriebsorganisation - Arbeitsgestaltung in der Produktion. Carl Hanser Verlag, München, 2. Auflage, 1993

- [REF93b] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (HRSG.): Methodenlehre der Betriebsorganisation - Lexikon der Betriebsorganisation. Carl Hanser Verlag, München, 1993
- [RHL+07] REINHART, G.; HENSEL, T.; LINDWORSKY, A.; SPITZWEG, M.: Teilautomatisierter Aufbau von Simulationsmodellen - Beschleunigter Modellaufbau am Beispiel der "Virtuellen Inbetriebnahme". wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 9/2007, S. 663–667
- [Röc11] RÖCK, S.: Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. Production Engineering, Ausgabe 3/2011, S. 329–337
- [Rot00] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer, Band 1, Berlin, 3. Auflage, 2000
- [RSM+99] RAMAN, S.; SIVASHANKAR, N.; MILAM, W.; STUART, W.; NABI, S.: Design and Implementation of HIL Simulators for Powertrain Control System Software Development. In: American Automation Control Council et al (Hrsg.). Proceedings of the 1999 American Control Conference - June 2-4, 1999, San Diego, California, 1999
- [Sau11] SAUER, O.: Informationstechnik in der Fabrik der Zukunft: Fabrik 4.0 - Aktuelle Rahmenbedingungen, Stand der Technik und Forschungsbedarf. ZWF, Ausgabe 12/2011, S. 955–962
- [SB97] STANKE, A.; BERNDES, S.: Simultaneous Engineering als Strategie zur Überwindung von Effizienzsenken. In: Bullinger, H.-J.; Bading, A. (Hrsg.). Forschungs- und Entwicklungsmanagement - Simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development. Teubner, Stuttgart, 1997, S. 15–28
- [Sch01] SCHAICH, C.: Informationsmodell zur fachübergreifenden Beschreibung intelligenter Produktionsmaschinen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, Band 15, München, 2001
- [Sch92] SCHUSTER, G.: Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage. Springer, Berlin, 1992
- [Sch98] SCHULLERER, J.: Prozesssignalkopplung bei der Realzeitsimulation komplexer Produktionsmaschinen. Herbert Utz Verlag, München, 1998
- [SET+99] SCHRAFT, R. D.; EVERSHEIM, W.; TÖNSHOFF, H. K.; MILBERG, J.; REINHART, G.: Planung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.). Betriebshütte - Produktion und Management. Springer, Berlin, 7. Auflage, 1999, S. 10–36 - 10-72
- [SL00] SPATH, D.; LANDWEHR, R.: 3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 7/8/2000, ja, S. 292–296
- [SLT13] SCHMÜDDERRICH, T.; LOCHBIECHLER, M.; TRÄCHTLER, A.: Methodik zur anforderungsgerechten Wahl der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen für die virtuelle Inbetriebnahme. In: Bertram, T.; Corves, B.; Janschek, K. (Hrsg.). Fachtagung Mechatronik 2013. 6.-8. März 2013, Aachen, 2013, S. 43–48
- [SMD05] STOEPLER, G.; MENZEL, T.; DOUGLAS, S.: Hardware-in-the-loop simulation of machine tools and manufacturing systems. Computing and Control Engineering Journal, Ausgabe 1/2005, S. 10–15
- [Som01] SOMMERVILLE, I.: Software engineering - Testen von Software. Addison-Wesley, Harlow, England, 6. Auflage, 2001
- [Sos89] SOSSENHEIMER, K.: Entwickeln von Instrumentarien zur rationellen Planung und Steuerung der Inbetriebnahme komplexer Produkte des Werkzeugmaschinenbaus. Dissertation, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1989
- [Spi01] SPITZER, B.: Modellbasierter Hardware-in-the-Loop Test von eingebetteten elektronischen Systemen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, 2001

- [Spi09] SPITZWEG, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, Band 233, München, 2009
- [SS10] SCHLEIPEN, M.; SAUER, O.: Virtuelle Leittechnikbetriebnahme mit WinMOD und Delmia Automation - Leittechnik - Realer Partner in der Virtuellen Welt. In: Sauer, O.; Beyerer, J. (Hrsg.). Karlsruher Leittechnisches Kolloquium 2010 - Tagungsband 9.-10. Juni 2010, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010, S. 81–95
- [Ste07] STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 207, Paderborn, 2007
- [Ste81] STEWARD, D. V.: The Design Structure System - A Method for Managing the Design of Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management, Ausgabe 3/1981
- [Str86] STRAUß, P.-F.: Automatische Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1986
- [TOS11] TICHY, M.; OESTERSÖTEBIER, F.; SCHIERBAUM, T.: Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik. In: Proceedings 7. Internationales Forum Mechatronik, 2011
- [UE08] ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D.: Product design and development. McGraw-Hill Higher Education, Boston, 4. Auflage, 2008
- [VB05] VAHS, D.; BURMESTER, R.: Innovationsmanagement - Von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 3. Auflage, 2005
- [Ver94] VERSTEEGEN, G.: Softwareerstellung nach dem V-Modell - Von Amts wegen. iX, Ausgabe 11/1994, S. 162–165
- [Vog03] VOGEL-HEUSER, B.: Systems software engineering. Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2003
- [Vog09a] VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.): Automation & embedded systems - Effizienzsteigerung im Engineering. Kassel Univ. Press, Kassel, 2009
- [Vog09b] VOGEL-HEUSER, B.: Objektorientierung im Engineering der Automatisierungstechnik - Fluch oder Segen. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.). Automation & embedded systems - Effizienzsteigerung im Engineering. Kassel Univ. Press, Kassel, 2009, S. 8–19
- [Wal95] WALLASCHEK, J.: Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte. In: VDI (Hrsg.). VDI Berichte, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 35–50
- [WBS+12] WESTERKÄMPER, E.; BAUDISCH, T.; SCHLÖGL, W.; FRANK, G.: Automatic Model Generation for Virtual Commissioning of Specialized Production Machines. Softwaretechnik-Trends, Ausgabe 2/2012
- [Web06] WEBER, K. H.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen - Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen. Springer, Berlin, 3. Auflage, 2006
- [Wec01] WECK, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen. Springer, Band 4, Berlin, 5. Auflage, 2001
- [Wei06] WEILKIENS, T.: Systems engineering mit SysML/UML - Modellierung, Analyse, Design. Dpunkt-Verl., Heidelberg, 2006
- [WF04] WISCHNEWSKI, R.; FREUND, E.: COSIMIR Transport: Modeling, Simulation, and Emulation of Modular Carrier Based Transport Systems. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, S. 5171–5176
- [WHW02] WIENDAHL, H.-P.; HEGENSCHIEDT, M.; WINKLER, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 11/12/2002, S. 650–655

- [WJR94] WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D.: Die zweite Revolution in der Autoindustrie - Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology. Campus-Verl, Frankfurt a. M., 8. Auflage, 1994
- [Wün08] WÜNSCH, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, Band 215, München, 2008
- [WWC+08] WENZEL, S.; WEIB, M.; COLLISI-BÖHMER, S.; PITSCHER, H.; ROSE, O.; PITSCH, H.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik - Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Springer, Berlin, 2008
- [WZ09] WESTKÄMPER, E.; ZAHN, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer, Berlin, 2009
- [Xu03] XU, L.: Wiederverwendbare Modelle zur Maschinensimulation für den Steuerungstest. Herbert Utz Verlag, München, 2003
- [Zac00] ZACHER, S.: Automatisierungstechnik kompakt - Theoretische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Anwendungen. Vieweg, Braunschweig, 2000
- [Zeu98] ZEUGTRÄGER, K.: Anlaufmanagement für Großanlagen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1998
- [ZW05] ZÄH, M. F.; WÜNSCH, G.: Schnelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen - Qualitätssicherung von automatisierten Maschinen durch Simulation. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 9/2005, S. 699–704
- [ZWH+06a] ZÄH, M. F.; WÜNSCH, G.; HENSEL, T.; LINDWORSKY, A.: Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme - Ein Experiment. ZWF, Ausgabe 10/2006, S. 595–599
- [ZWH+06b] ZÄH, M. F.; WÜNSCH, G.; HENSEL, T.; LINDWORSKY, A.: Feldstudie - Virtuelle Inbetriebnahme. wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 10/2006, S. 767–771

## Normen und Richtlinien

- [DIN19256] DIN 19256: Leittechnik - Einrichtungen der Prozeßleittechnik (PLT) für industrielle Anlagen - Leitfaden für Planung, Erstellung und Betrieb. Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [DIN60050-351] DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [DIN60812] DIN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [DIN61025] DIN 61025: Fehlerzustandsbaumanalyse. Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [DIN62264-1] DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie. Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [DIN8580] DIN 8580: Fertigungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [IEC61131-3] IEC61131-3: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Programmiersprachen. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [NA35] NAMUR NA35: Abwicklung von PLT-Projekten, 2003
- [VDI2206] VDI-RICHTLINIE 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [VDI2221] VDI-RICHTLINIE 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993
- [VDI2222-1] VDI-RICHTLINIE 2222-1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [VDI2223] VDI-RICHTLINIE 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [VDI2225-1] VDI-RICHTLINIE 2225-1: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [VDI2235] VDI-RICHTLINIE 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren - Methoden und Hilfen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1987
- [VDI3633] VDI-RICHTLINIE 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [VDI3633-8] VDI-RICHTLINIE 3633 - 8: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Maschinennahe Simulation. VDI Verlag, Düsseldorf, 2007
- [VDI3822-5] VDI-RICHTLINIE 3822-5: Schadensanalyse - Schäden durch tribologische Beanspruchung. VDI Verlag, Düsseldorf, 1999
- [VDI4005-2] VDI-RICHTLINIE 4005-2: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse - Mechanische Einflüsse der Umwelt. Beuth Verlag, Düsseldorf, 1983
- [VDI4005-3] VDI-RICHTLINIE 4005-3: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse - Thermisch-klimatische Einflüsse der Umwelt. VDI Verlag, Düsseldorf, 1983
- [VDI4005-4] VDI-RICHTLINIE 4005-4: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse - Chemisch-biologische Einflüsse der Umwelt. VDI Verlag, Düsseldorf, 1983

- [VDI4005-5] VDI-RICHTLINIE 4005-5: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse - Elektromagnetische Einflüsse der Umwelt. VDI Verlag, Berlin, 1983
- [VDI4499-2] VDI-RICHTLINIE 4499-2: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb. VDI Verlag, Düsseldorf, 2011

# Anhang

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>A1</b> Ergänzungen zur Anwendung der Systematik.....	<b>A-1</b>
A1.1 Layout Miniaturfertigungsanlage .....	A-1
A1.2 Demonstrator Produkt - Taschenlampe .....	A-2
A1.3 Funktionshierarchie und Baustruktur des Demonstrators .....	A-4
A1.4 System modularisieren.....	A-6





## A1 Ergänzungen zur Anwendung der Systematik

Im Folgenden werden die Informationen zum flexiblen Fertigungssystem aufgezeigt.

### A1.1 Layout Miniaturfertigungsanlage

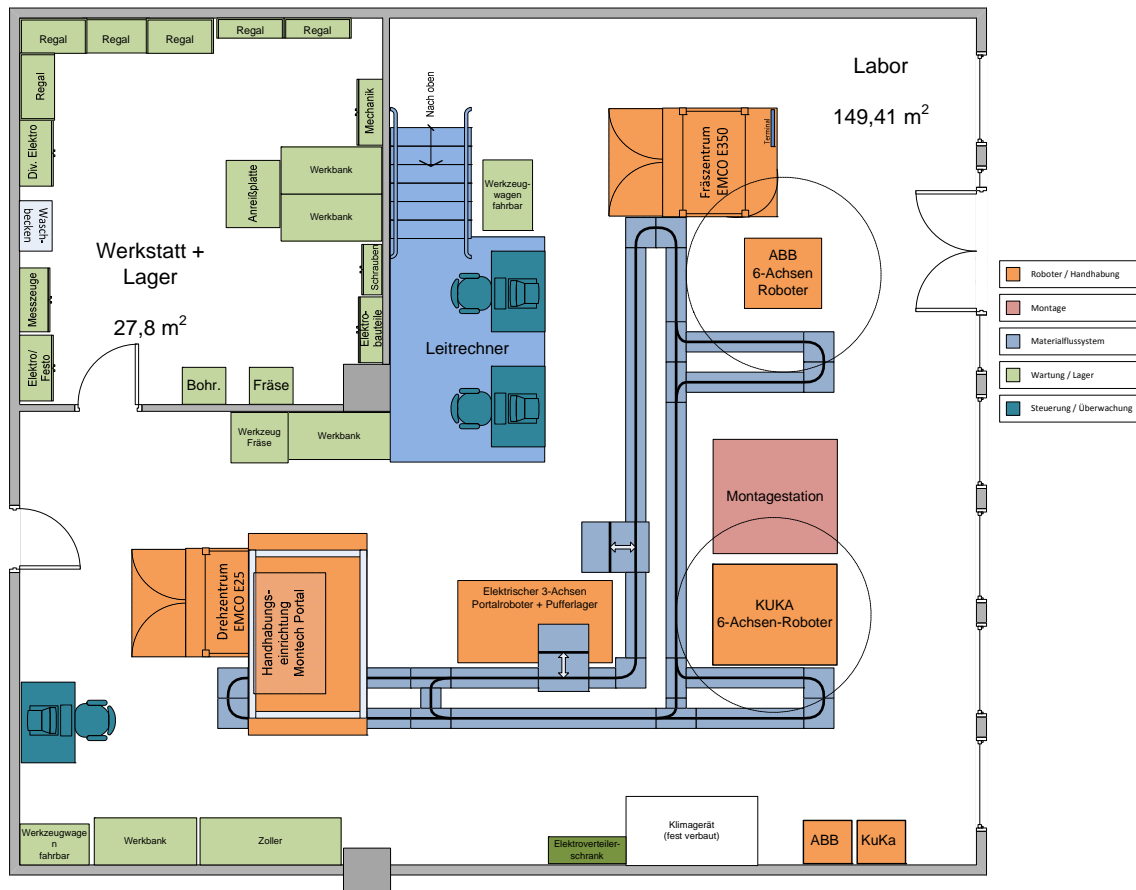


Bild A-1: Konzept Miniaturfertigungsanlage Fürstenallee

## A1.2 Demonstrator Produkt - Taschenlampe

Das Produkt was auf der Miniaturfertigungsanlage gefertigt werden soll ist eine Taschenlampe. Ein Teil der Komponenten wird in Eigenfertigung hergestellt und in der Montage um Zukaufteile ergänzt.

### Eigenfertigung:

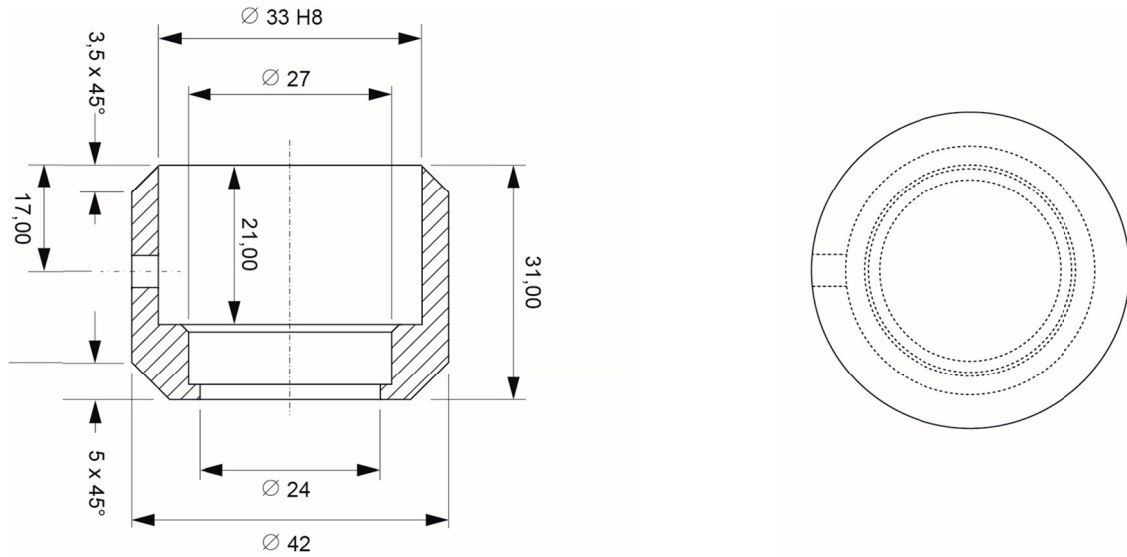


Bild A-2: Taschenlampenkopf

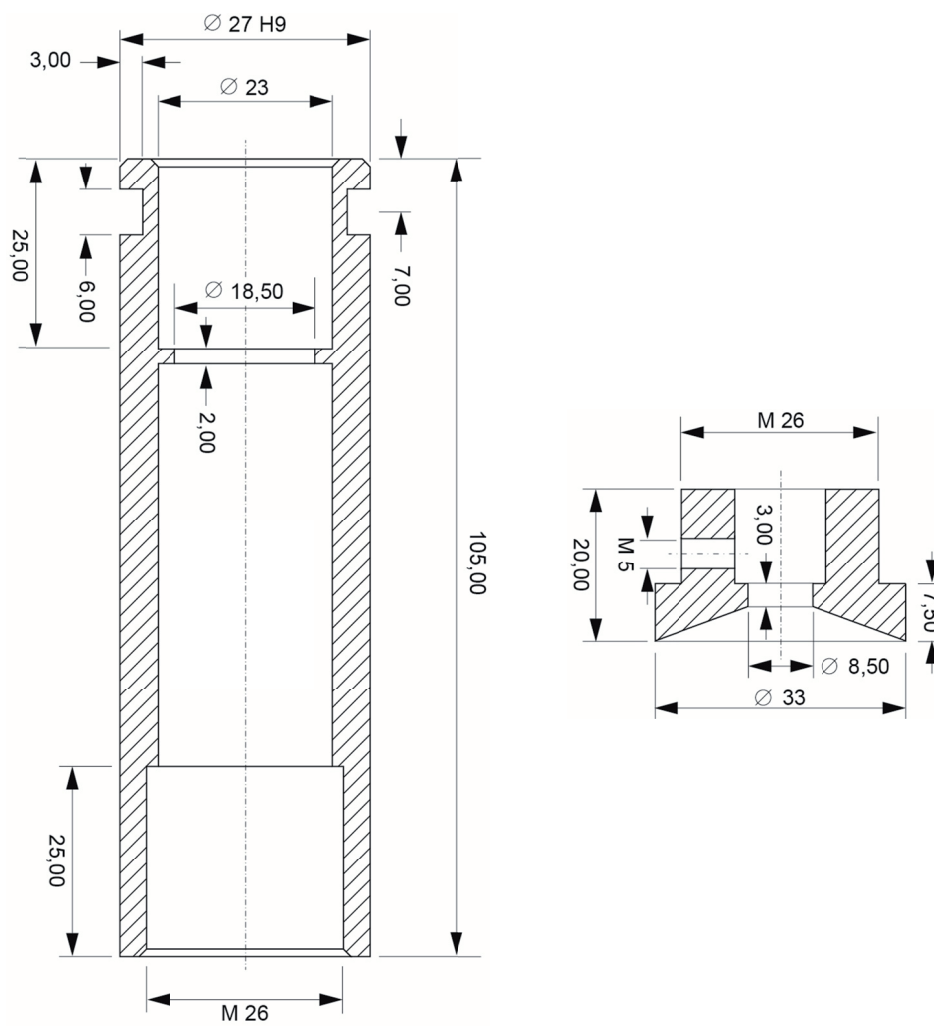


Bild A-3: Griffstück (links) und Schalterklappe (rechts)

**Zukaufteile:**

- Schalter
- LED-Modul
- Scheibe
- Batteriefach

### A1.3 Funktionshierarchie und Baustruktur des Demonstrators

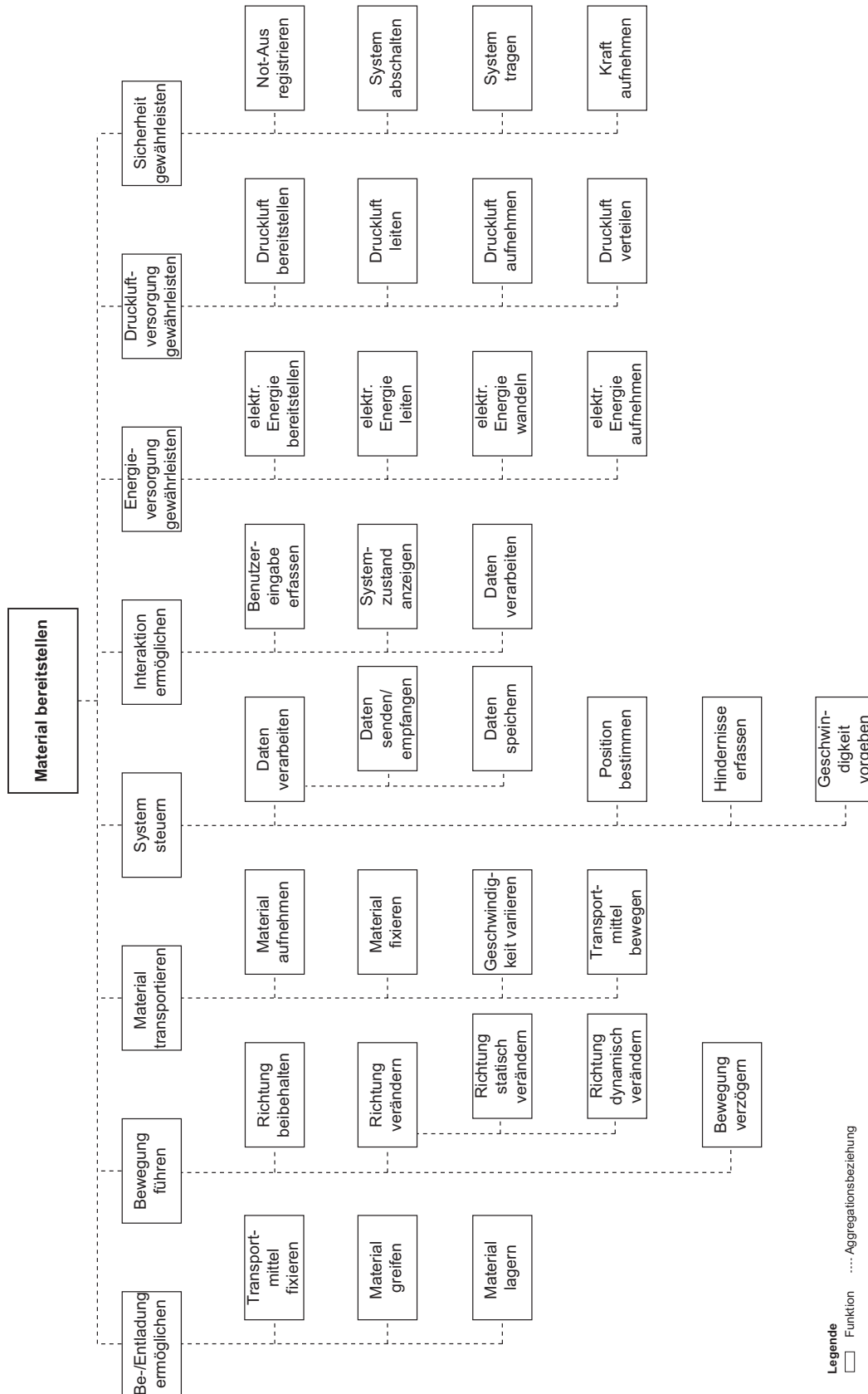


Bild A-4: Partialmodell Funktionen

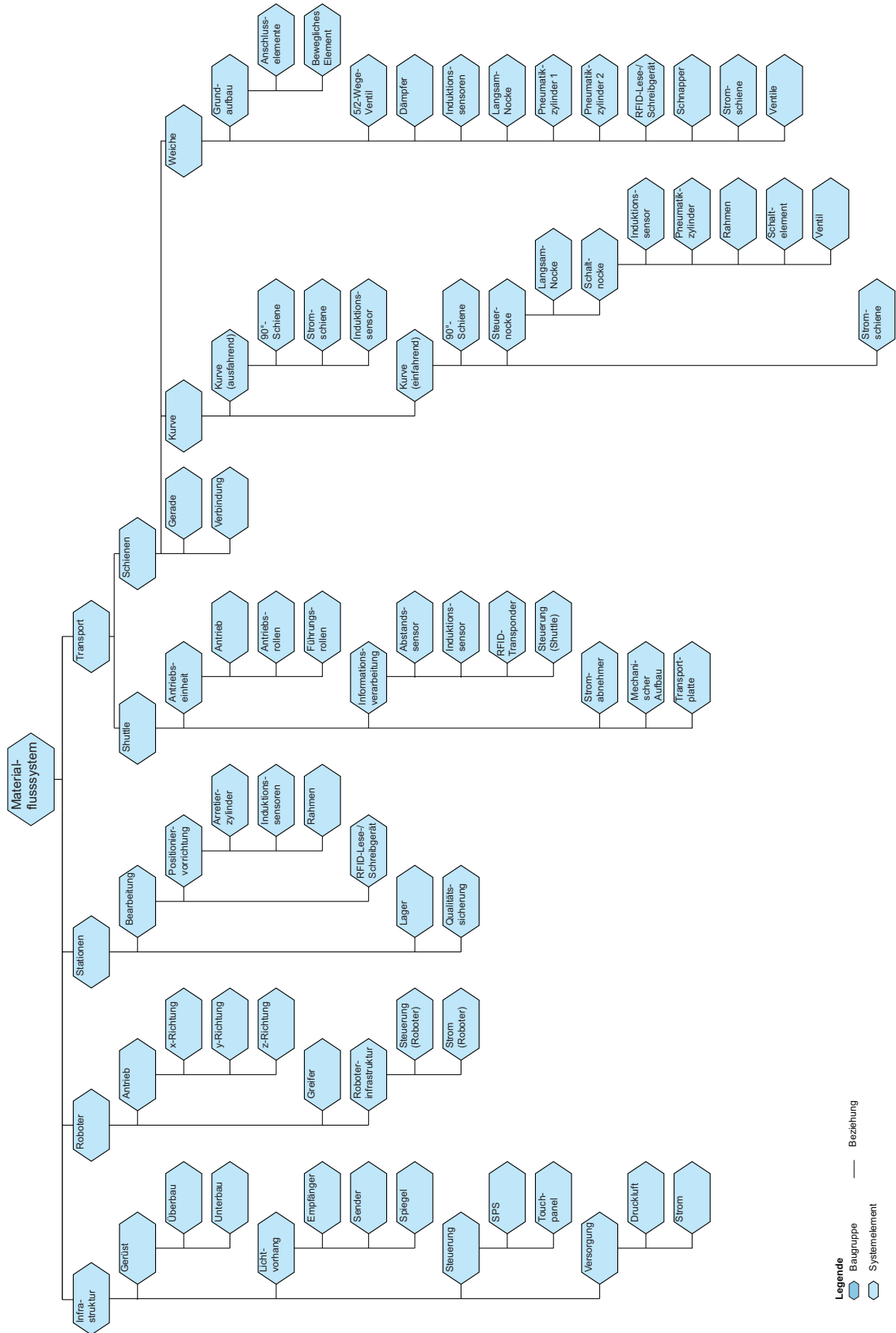


Bild A-5: Partialmodell Baustruktur









Tabelle A-4: Produktstruktur nach der Simulierbarkeit

Aggregationsbeziehungen zwischen Zeilen und Spalten		●		◆	
		Aggregationsbeziehung	geänderte Aggregationsbeziehung	Aggregationsbeziehung	geänderte Aggregationsbeziehung
Systemelemente		Überbau			
		Unterbau			
Systemelemente		Empfänger			
		Sender			
Systemelemente		Spiegel			
		SPS			
Systemelemente		Touchpanel			
		Druckluft			
Systemelemente		Strom			
		x-Richtung			
Systemelemente		y-Richtung			
		z-Richtung			
Systemelemente		Greifer			
		Steuerung (Roboter)			
Systemelemente		Strom (Roboter)			
		Arretier Zylinder			
Systemelemente		Induktionssensoren			
		Rahmen			
Systemelemente		RFID-Lese-/Schreibgerät			
		Lager			
Systemelemente		Qualitätssicherung			
		Antrieb			
Systemelemente		Antriebsrollen			
		Führungsrollen			
Systemelemente		Abstandssensor			
		Induktionssensor			
Systemelemente		RFID-Transponder			
		Steuerung (Shuttle)			
Systemelemente		Stromabnehmer			
		Mechanischer Aufbau			
Systemelemente		Transpaltle			
		Gerade			
Systemelemente		Verbindung			
		90°-Schiene			
Systemelemente		90°-Schiene			
		Langsam-Nocke			
Systemelemente		Induktionssensoren			
		90°-Schiene			
Systemelemente		Langsam-Nocke			
		Induktionssensoren			
Systemelemente		Pneumatikzylinder			
		Rahmen			
Systemelemente		Schaltlement			
		Ventil			
Systemelemente		Stromschiene			
		Anschlusselemente			
Systemelemente		Bewegliches Element			
		5/2-Wege-Ventil			
Systemelemente		Dämpfer			
		Induktionssensoren			
Systemelemente		Langsam-Nocke			
		Pneumatikzylinder			
Systemelemente		RFID-Lese-/Schreibgerät			
		Schnapper			
Systemelemente		Stromschiene			
		Ventile			

Funktionsträger





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

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

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

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

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



## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 314 VON DETTEN, M.: Reengineering of Component-Based Software Systems in the Presence of Design Deficiencies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 314, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-33-5
- Bd. 315 MONTEALEGRE AGRAMONT, N. A.: Immunorepairing of Hardware Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 315, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-34-2
- Bd. 316 DANGELMAIER, W.; KLAAS, A.; LAROQUE, C.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 316, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-35-9
- Bd. 317 PRIESTERJAHN, C.: Analyzing Self-healing Operations in Mechatronic Systems. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 317, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-36-6
- Bd. 318 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 9. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5. und 6. Dezember 2013, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 318, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-37-3
- Bd. 319 GAUSEMEIER, S.: Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 319, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-38-0
- Bd. 320 GEISLER, J.: Selbstoptimierende Spurführung für ein neuartiges Schienenfahrzeug. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 320, Paderborn, 2013 – ISBN 978-3-942647-39-7
- Bd. 321 MÜNCH, E.: Selbstoptimierung verteilter mechatronischer Systeme auf Basis paretooptimaler Systemkonfigurationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 321, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-40-3
- Bd. 322 RENKEN, H.: Acceleration of Material Flow Simulations - Using Model Coarsening by Token Sampling and Online Error Estimation and Accumulation Controlling. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 322, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-41-0
- Bd. 323 KAGANOVA, E.: Robust solution to the CLSP and the DLSP with uncertain demand and online information base. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 323, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-42-7
- Bd. 324 LEHNER, M.: Verfahren zur Entwicklung geschäftsmodell-orientierter Diversifikationsstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 324, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-43-4
- Bd. 325 BRANDIS, R.: Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 325, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-44-1
- Bd. 326 KÖSTER, O.: Systematik zur Entwicklung von Geschäftsmodellen in der Produktentstehung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 326, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-45-8
- Bd. 327 KAISER, L.: Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstrukturen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 327, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-46-5
- Bd. 328 KRÜGER, M.: Parametrische Modellordnungsreduktion für hierarchische selbstoptimierende Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 328, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-47-2

## Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 329 AMELUNXEN, H.: Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 329, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-48-9
- Bd. 330 KEIL, R.; SELKE, H. (Hrsg.): 20 Jahre Lernen mit dem World Wide Web. Technik und Bildung im Dialog. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 330, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-49-6
- Bd. 331 HARTMANN, P.: Ein Beitrag zur Verhaltensantizipation und -regelung kognitiver mechatronischer Systeme bei langfristiger Planung und Ausführung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 331, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-50-2
- Bd. 332 ECHTERHOFF, N.: Systematik zur Planung von Cross-Industry-Innovationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 332, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-51-9
- Bd. 333 HASSAN, B.: A Design Framework for Developing a Reconfigurable Driving Simulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 333, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-52-6
- Bd. 334 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 10. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 20. und 21. November 2014, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 334, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-53-3
- Bd. 335 RIEKE, J.: Model Consistency Management for Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 335, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-54-0
- Bd. 336 HAGENKÖTTER, S.: Adaptive prozessintegrierte Qualitätsüberwachung von Ultraschalldrahtbondprozessen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 336, Paderborn, 2014 – ISBN 978-3-942647-55-7
- Bd. 337 PEITZ, C.: Systematik zur Entwicklung einer produktlebenszyklusorientierten Geschäftsmodell-Roadmap. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 337, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-56-4
- Bd. 338 WANG, R.: Integrated Planar Antenna Designs and Technologies for Millimeter-Wave Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 338, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-57-1
- Bd. 339 MAO, Y.: 245 GHz Subharmonic Receivers For Gas Spectroscopy in SiGe BiCMOS Technology. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 339, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-58-8
- Bd. 340 DOROCIAC, R.: Systematik zur frühzeitigen Absicherung der Sicherheit und Zuverlässigkeit fortschrittlicher mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 340, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-59-5
- Bd. 341 BAUER, F.: Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 341, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-60-1
- Bd. 342 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M.; MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): 12. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 342, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-61-8
- Bd. 343 GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): 10. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 343, Paderborn, 2015 – ISBN 978-3-942647-62-5