

# **Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
**Dipl. Wirtsch.-Ing. Annika Kufner**  
geboren in Nürnberg

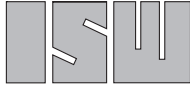
Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Peter Göhner  
Tag der Einreichung: 01.06.2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2011

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen  
und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart

# **ISW/IPA Forschung und Praxis**

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für  
Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Verl



Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



Annika Kufner

# Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simula- tion von Montagemaschinen

Nr. 188

D 93

ISBN 978-3-939890-94-2  
Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2012.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

## **Geleitwort des Herausgebers**

In der Reihe „ISW/IPA Forschung und Praxis“ wird fortlaufend über Forschungsergebnisse des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart (ISW) und des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) berichtet. Die Institute stehen unter gemeinsamer Leitung von Professor Alexander Verl und beschäftigen sich sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch im Bereich der angewandten Forschung mit der Weiterentwicklung und Optimierung der Automatisierung in der Produktionstechnik. Fraunhofer IPA und ISW repräsentieren Deutschlands größte Forschungseinrichtung im Bereich der Produktionsautomatisierung.

Besonderes Augenmerk wird auf die Systeme Werkzeugmaschine und Roboter gelegt. Die Arbeiten des ISW konzentrieren sich im Besonderen auf die Bereiche Numerische Steuerungstechnik, Bewegungssteuerung, Planungs- und Leitsysteme, Softwaretechnik, Simulationstechnik und Antriebstechnik. Am Fraunhofer IPA konzentriert man sich im Bereich der Automatisierungstechnik auf die Themen: Servicerobotik, Industrierobotik, Montageautomatisierung, Orthopädiesysteme, Prozessautomatisierung (insbesondere im Lifesciencebereich), Messtechnik, Prüftechnik, Bildverarbeitung sowie die Automatisierung in der Reinst- und Mikroproduktion. Dabei stehen Grundlagenforschung und anwenderorientierte Entwicklung in einem stetigen Austausch, wodurch ein ständiger Technologietransfer zur Praxis sichergestellt wird.

Die Buchreihe erscheint in zwangloser Folge und stützt sich auf Berichte über abgeschlossene Forschungsarbeiten und Dissertationen. Sie soll dem Ingenieur bei der Weiterbildung dienen und ihm Hilfestellungen zur Lösung spezifischer Probleme geben. Für den Studierenden bietet sie eine Möglichkeit zur Wissensvertiefung. Sie bleibt damit unter erweitertem Namen und in der inzwischen dritten Generation in der bewährten Konzeption, die ihr die Vorgänger am ISW, Professor Gottfried Stute (1972 - 1982) und Professor Günter Pritschow (1984 - 2005), gegeben haben.

Der vorliegende Band beschäftigt sich mit der Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen. Um deren Potential im Engineering von Montagemaschinen wirtschaftlich nutzen zu können, ist es erforderlich, den Aufwand zur Erstellung der Simulationsmodelle zu reduzieren. Ziel ist es, eine Aufwandsreduktion durch eine automatisierte Modellerstellung zu erreichen. Die erarbeitete Methode zur automatisierten Modellerstellung basiert auf der Verarbeitung von Engineeringdokumenten, die im Engineeringprozess standardmäßig erstellt werden. Die Methode wird in einem Modellierungstool umgesetzt. Es zeigt sich, dass sich der Aufwand zur Modellerstellung in etwa halbieren lässt.

Der Herausgeber dankt der Druckerei für die drucktechnische Betreuung und dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme der Reihe in sein Lieferprogramm.

A. Verl



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion im Zentralbereich Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH. Wissenschaftlich wurde diese Arbeit am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart betreut.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm. Durch seine engagierte wissenschaftliche Betreuung, die fachlich wertvollen Diskussionen, seine freundliche Art und zuletzt durch die Übernahme des Hauptberichts hat er hauptsächlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des ISW, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Armin Lechler, für die unkomplizierte, direkte Hilfestellung und die offene Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Peter Göhner möchte ich meinen Dank für die Erstellung des Mitberichts aussprechen.

Die Robert Bosch GmbH hat meine Arbeit organisatorisch und inhaltlich unterstützt. Hier gilt mein persönlicher Dank meinem Abteilungsleiter Herrn Dipl.-Ing. Frank Westphal und meinem Gruppenleiter Herrn Dr.-Ing. Karsten Haug. Des Weiteren möchte ich Herrn Dr.-Ing. Sadi Yigit für die motivierende Einführung und Herrn Dr.-Ing. Philipp Dreiss für die Betreuung dieser Arbeit seitens der Robert Bosch GmbH danken. Herr Dr.-Ing. Philipp Dreiss hat durch seine konzeptionellen Anregungen grundlegend zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen. Er und Herr Dr.-Ing. Thomas Stiedl haben diese Arbeit fachlich durchgesehen und wichtige Verbesserungsvorschläge eingebracht. Ihnen bin ich wegen ihres Engagements, das über die Arbeitszeit hinausging, sehr dankbar. Des Weiteren hat Frau Dipl.-Inform. Marina Rödl als Diplomandin engagiert und zielführend zur Entwicklung und Implementierung des Modellierungstools beigetragen.

Bei den Kollegen aus meiner Abteilung bei der Robert Bosch GmbH bedanke ich mich herzlich für die bereitwillige Hilfestellung bei fachlichen Fragen zur Praxis und die angenehme, kollegiale Arbeitsatmosphäre.

Ein tiefer Dank gilt meinem Freund und meinen Eltern. Insbesondere meinem Vater, der mich bei der orthographischen Korrektur unterstützt hat.

Annika Kufner





## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b>	<b>12</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>14</b>
1.1 Motivation	14
1.2 Problemstellung	15
1.3 Aufbau der Arbeit	15
<b>2 Grundlagen</b>	<b>17</b>
2.1 Simulation im Engineering von Montagemaschinen	17
2.1.1 Montagemaschinen	17
2.1.1.1 Aufbau von Montagemaschinen	17
2.1.1.2 Engineering von Montagemaschinen	19
2.1.2 Simulation von Montagemaschinen	21
2.2 Hardware-in-the-Loop-Simulation	24
2.2.1 Simulationseigenschaften und -aufbau	25
2.2.2 Aufbau des Maschinenmodells für eine Montagemaschine	27
2.2.3 Nutzen der Hardware-in-the-Loop-Simulation im Engineering von Montagemaschinen	30
2.3 Zusammenfassung der Grundlagen	34
<b>3 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>35</b>
3.1 Beitrag eines simulationsgestützten Engineerings zur Erstellung von Maschinenmodellen	36
3.1.1 Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering	36
3.1.2 Standards für Informationsmodelle	42
3.2 Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten	44
3.3 Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Modellerstellung	50
3.4 Defizite der Ansätze zur aufwandsreduzierten Modellerstellung	53
3.4.1 Bewertungskriterien	53
3.4.2 Defizite	55
3.5 Ziel der Arbeit und Handlungsbedarf	58

3.6	Zusammenfassung des Stands der Forschung und Technik	60
<b>4</b>	<b>Anforderungen an die automatisierte Erstellung eines Maschinenmodells und Lösungskonzept</b>	<b>61</b>
4.1	Anforderungsanalyse	61
4.1.1	Vollständigkeit eines Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation	61
4.1.1.1	Erfassen der gesamten Maschine	63
4.1.1.2	Modellierung von Baueinheiten	65
4.1.1.3	Modellierung von Bauteilen	67
4.1.2	Modellierung in unterschiedlicher Detaillierung	69
4.1.2.1	Bedeutung der Detaillierung für die Modellierung	69
4.1.2.2	Definition von Modellierungstiefen	72
4.2	Anforderungen	75
4.3	Lösungskonzept	79
4.4	Zusammenfassung der Anforderungen und des Lösungskonzepts	84
<b>5</b>	<b>Methode zur automatisierten Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine</b>	<b>85</b>
5.1	Identifikation der relevanten Informationen in Engineeringdokumenten	85
5.1.1	Buskonfiguration	85
5.1.2	Ein- und Ausgangs-Liste	88
5.2	Definition des Modells der Struktur der Maschine	89
5.2.1	Hierarchische Struktur der Maschine	89
5.2.2	Anbindung an die Steuerung	94
5.3	Verfahren zur Transformation	97
5.3.1	Modellierung der hierarchischen Struktur der Maschine	97
5.3.2	Modellierung der Anbindung an die Steuerung	102
5.4	Zusammenfassung der Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine	105
<b>6</b>	<b>Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen</b>	<b>106</b>
6.1	Klassifikation des Verhaltens von Komponenten aus Bauteilen	106
6.2	Identifikation der relevanten Informationen in Engineeringdokumenten	112
6.2.1	Unternehmensspezifische Dokumentation von Basisfunktionen	112
6.2.2	Stromlaufplan	115
6.2.3	Informationsdefizit und weitere Engineeringdokumente	118

6.2.3.1	Informationsdefizit	119
6.2.3.2	Engineeringdokumente ohne relevanten Informationsbeitrag	122
6.3	Verhaltensmodelle für Basisfunktionen	125
6.3.1	Definition der Verhaltensmodelle	125
6.3.2	Verfahren zur Transformation	127
6.4	Verhaltensmodelle für Multifunktionen	132
6.4.1	Definition der Verhaltensmodelle	132
6.4.2	Verfahren zur Transformation	136
6.5	Zusammenfassung der Erstellung von Verhaltensmodellen	142
<b>7</b>	<b>Realisierung des Lösungskonzepts</b>	<b>143</b>
7.1	Realisierung des Lösungskonzepts durch ein Modellierungstool	143
7.2	Erprobung des Modellierungstools	146
7.2.1	Rahmenbedingungen der Erprobung	146
7.2.2	Ergebnisse der Erprobung	147
7.3	Bewertung der Aufwandsreduzierung durch den Einsatz des Modellierungstools	152
7.4	Zusammenfassung der Realisierung	153
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>154</b>
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>157</b>

**Abkürzungen**

3D	Dreidimensional
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
COM	Communication Port
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E/A-Liste	Eingangs-/Ausgangsliste
EN	Europäische Norm
HiLS	Hardware-in-the-Loop-Simulation
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organisation for Standardization
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
XML	Extensible Markup Language

**Abstract**

Manufacturers of assembly machines are demanded to build high quality complex machines in a short amount of time. To stay competitive, manufacturers have to improve their engineering process continuously. Simulation techniques are especially suited to improve the engineering process by supporting the calculation and validation of the machines.

The development of assembly machines focuses on the equipment concept and the cycle, which is operated to assemble the products. Hence the validation of the overall operation of the machine is an important task and one of the main purposes of a beneficial simulation. The upcoming Hardware-in-the-Loop-Simulation executes the machine operations on a virtual machine which is connected to the real controller. With this simulation it is possible to analyze, optimize and test the machine cycle before the equipment is built. Thus the Hardware-in-the-Loop-Simulation shows a high potential to save time, especially in the late and often time critical phases of the engineering process.

Although the Hardware-in-the-Loop-Simulation possesses a high potential it is expanding slowly into the engineering of assembly machines. A beneficial application often fails because of the time-consuming and costly machine modelling. Therefore this work aims to establish a method that significantly reduces the effort to build a machine model. Contrary to a manually built machine model, the model should be generated automatically on the basis of standardized engineering documents.

The method proposed in this work subdivides the automatically generated machine model into the machine structure and behaviour. For the model of the machine structure, modules, components, and connections are generated automatically out of the bus configuration and the I/O list. The behaviour is modelled by components which are assigned to the components of the machine structure. Behaviour models can be generated automatically for components which communicate with the controller by Boolean variables. For the generation, standardized functions are defined and logical chains are extracted out of the wiring diagram.

To verify the method a software solution is developed which executes the model generation. Although an automatically generated model needs manual rework, the application of the method shows a great reduction in the effort of modelling a machine model for the Hardware-in-the-Loop-Simulation.

## **1 Einführung**

### **1.1 Motivation**

Der Druck des Wettbewerbs spornt zur ständigen Verbesserung industrieller Prozesse an. So wird auch bei den Herstellern von Montagemaschinen fortwährend daran gearbeitet, die Prozesse des Engineerings effizienter zu gestalten. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Herstellers von Montagemaschinen zeichnet sich im Wesentlichen durch die qualitativ hochwertige Anfertigung komplexer Maschinen in möglichst kurzer Entwicklungszeit zu niedrigen Kosten aus. Neue Methoden und Werkzeuge des Engineerings sollen dazu beitragen, diese Fähigkeiten auszubauen.

Insbesondere die Simulation unterstützt den Engineeringprozess bei der Berechnung und der Absicherung der Funktionen von Maschinen. Beim Bau von Montagemaschinen liegt der Schwerpunkt in der Konzeption und Realisierung eines Ablaufs zur Montage von Produkten. Daher ist die Absicherung des gesamten Funktionsablaufs von Maschinen von großer Bedeutung.

Zur Absicherung von Eigenschaften einer Maschine eignet sich die Hardware-in-the-Loop-Simulation. Ihre Aufgabe besteht in der Simulation der Maschine in Kopplung mit der realen Steuerung.

Als realitätsnahes Analyseinstrument ist sie im Engineering in der Konstruktion, Inbetriebnahme und Instandhaltung nutzbringend einsetzbar. Montagemaschinen lassen sich bereits mit Hilfe der Simulation analysieren, bevor sie aufgebaut sind. Die Analyse verbessert das Verständnis über die Maschinen und es können entsprechend Maßnahmen zur Steigerung der Qualität der Montagemaschinen eingeleitet werden. Im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme kann die Steuerung mit der Hardware-in-the-Loop-Simulation in Betrieb genommen werden. Dadurch kann Zeit im Engineering eingespart werden, weil sich Engineeringprozesse parallelisieren lassen. Gerade in den späten Phasen des Engineeringprozesses, wie z. B. in der Inbetriebnahme, ist es oftmals aufgrund hohen Zeitdrucks von besonderem Wert Zeit einzusparen.

Trotz ihres Potentials konnte sich die Hardware-in-the-Loop-Simulation für Montagemaschinen bisher in der Praxis nur langsam durchsetzen.

## 1.2 Problemstellung

Der zögerliche Einsatz der Hardware-in-the-Loop-Simulation im Engineering von Montagemaschinen lässt sich mit dem hohen Aufwand zu deren Erstellung begründen. Bisweilen kann der Aufwand zur Simulation so hoch ausfallen, dass er den Nutzen übersteigt.

Der größte Aufwand ist für die Erstellung des Maschinenmodells, das Kernstück der Simulation, aufzubringen. Die Erstellung verlangt die Aggregation der Informationen über die Montagemaschine und deren Verarbeitung zu einem Maschinenmodell. Die Informationen über die Maschine betreffen sowohl alle Disziplinen des Engineerings als auch disziplinspezifische Details. Die Erstellung eines Maschinenmodells ist eine zeitintensive Aufgabe, die detaillierte Kenntnisse über die Maschine verlangt. Zur Erstellung des Maschinenmodells werden deshalb heute Experten benötigt. Ein Einsatz von Experten ist zum einen teuer und zum anderen im bisherigen Engineeringprozess nicht in Form von Kapazitäten eingeplant.

Es wird daher ein methodischer Ansatz gesucht, der die Erstellung des Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation effizienter und somit aufwandsärmer gestaltet. In vorliegender Arbeit wird der Ansatz verfolgt, ein Maschinenmodell nicht manuell, sondern automatisiert zu erstellen. Die automatisierte Modellerstellung soll von den Engineeringdokumenten gespeist werden, die im Engineeringprozess angefertigt werden.

Eine Reduzierung des Aufwands führt zu einem besseren Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen. Der wirtschaftliche Einsatz der Hardware-in-the-Loop-Simulation ermöglicht einen Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit in Bezug auf die Qualität, Komplexitätsbewältigung und die Termintreue im Engineering von Montagemaschinen.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

An die Einführung in die Arbeit schließt sich die Darstellung der Grundlagen und die Untersuchung des Stands der Forschung und Technik in den Kapiteln 2 und 3 an. Die automatisierte Erstellung eines Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation wird in den Kapiteln 4 bis 6 erarbeitet. Die Realisierung des Lösungskonzepts durch ein Modellierungstool folgt in Kapitel 7. Kapitel 8 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab.

In den Grundlagen wird in Kapitel 2.1 ein Einblick in das Engineering von Montagema-  
schinen und den dortigen Einsatz der Simulation gegeben. Kapitel 2.2 führt in die Hard-  
ware-in-the-Loop-Simulation ein.

In Kapitel 3, das dem Stand der Forschung und Technik gewidmet ist, werden Ansätze  
zur aufwandsreduzierten Erstellung von Maschinenmodellen untersucht (Kapitel 3.1 bis  
3.3). In Kapitel 3.4 wird die automatisierte Modellerstellung als geeignet identifiziert  
und Defizite aufgezeigt. In Kapitel 3.5 wird das Ziel der Arbeit formuliert und daraus  
der Handlungsbedarf abgeleitet.

Mit Kapitel 4 beginnt die Erarbeitung einer Methode zur automatisierten Modellerstel-  
lung. Zuerst werden durch eine Analyse in Kapitel 4.1 die Eigenschaften eines Maschi-  
nenmodells, die einerseits zwingend (4.1.1) und andererseits wählbar sind (4.1.2), aufge-  
zeigt. Daraus werden in Kapitel 4.2 die Anforderungen an ein Maschinenmodell aufge-  
stellt. In Kapitel 4.3 wird das Lösungskonzept zur automatisierten Modellerstellung dar-  
gelegt.

Das Lösungskonzept wird in Kapitel 5 und in Kapitel 6 verfeinert.

Kapitel 5 zeigt die Methode zur automatisierten Erstellung des Modells der Struktur der  
Maschine auf. In Kapitel 5.1 werden zunächst die relevanten Informationen in den Engi-  
neeringdokumenten identifiziert. In Kapitel 5.2 wird das Zielmodell konzipiert. Die  
Transformation der Engineeringdokumente in das Zielmodell folgt in Kapitel 5.3.

Kapitel 6 legt die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen dar  
und ist ähnlich gegliedert wie Kapitel 5. Zu Beginn werden jedoch Komponenten nach  
ihrem Verhalten klassifiziert und Informationsdefizite ermittelt.

In Kapitel 7 wird zuerst gezeigt, wie die Methode zur automatisierten Modellerstellung  
in einem Modellierungstool realisiert wurde. Die Erprobung des Modellierungstools  
erfolgt in Kapitel 7.2. In Kapitel 7.3 wird abschließend die Aufwandsreduzierung durch  
den Einsatz des Modellierungstools bewertet.

Kapitel 8 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende For-  
schungsarbeiten.



## 2 Grundlagen

In dieser Arbeit wird der Einsatz der Hardware-in-the-Loop-Simulation bei einem Hersteller von Montagemaschinen betrachtet. In Kapitel 2.1 wird in das Engineering und die Simulation von Montagemaschinen eingeführt. In Kapitel 2.2 wird die Hardware-in-the-Loop-Simulation, folgend HiLS genannt, betrachtet.

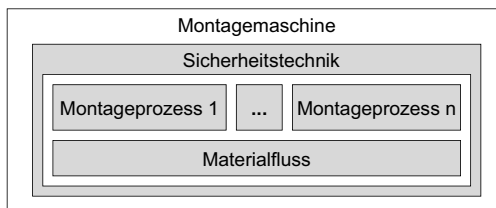
### 2.1 Simulation im Engineering von Montagemaschinen

In diesem Kapitel werden zunächst Montagemaschinen beschrieben (2.1.1.1) und dann neue Entwicklungen bei deren Engineering aufgezeigt (2.1.1.2). In Kapitel 2.1.2 wird der Einsatz der Simulation im Engineering von Montagemaschinen erläutert.

#### 2.1.1 Montagemaschinen

##### 2.1.1.1 Aufbau von Montagemaschinen

Eine Montagemaschine ist für einen oder mehrere Prozesse in der Montage eines Produktes bestimmt. Sie ist für ihren Einsatz speziell konstruiert und dementsprechend den Sondermaschinen zuzurechnen /1/. Die Montage schließt sich innerhalb des gesamten Produktionssystems der Teilefertigung an. Die Teilefertigung wird zumeist von Werkzeugmaschinen ausgeführt. Montagemaschinen fügen daraufhin die Teile zu einem Produkt zusammen /1/. Neben dem Fügen werden in dieser Arbeit sowohl Kontrollprozesse wie Messen und Prüfen als auch Sonderfunktionen wie z. B. Kennzeichnen als Montageprozesse bezeichnet /2/.



**Bild 2-1:** Bestandteile einer Montagemaschine

Eine Automatisierung der Montageprozesse ist nur mit Hilfe eines gesteuerten Materialflusses möglich. Das Bewirken des Materialflusses lässt sich unterteilen in das Fördern, Handhaben und Lagern der Werkstücke /3/. Um die Montageprozesse und den Materialfluss möglichst gefahrenfrei bewerkstelligen zu können, müssen Funktionen der Sicherheitstechnik in die Maschine integriert werden (Bild 2-1).

### **Bauteile und Baueinheiten einer Montagemaschine**

In dieser Arbeit wird folgende, in Kapitel 4.1.1 erweiterte, Definition vorgenommen:

Eine Montagemaschine besteht aus Bauteilen und Baueinheiten.

Bauteile erfüllen einfache Funktionen, oftmals nur im Zusammenhang mit anderen Bauteilen. Beispiele für Bauteile sind Ventile, Lampen oder Sensoren.

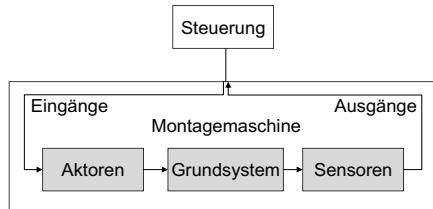
Dagegen agieren Baueinheiten weitestgehend eigenständig. Sie realisieren spezifische Funktionen und können eine integrierte Regelung besitzen. Da die von Baueinheiten umgesetzten Funktionen spezifisch und vielfältig sind, ist das Know-how oftmals beim Hersteller der Montagemaschine nicht vorhanden. So ist eine Baueinheit häufig eine Zulieferkomponente. Beispiele sind ein Laser, Achsen inklusive ihrer Antriebssteuerungen oder ein Identifikationssystem zur Nachverfolgung von Werkstücken. Eigenkonstruktionen von Baueinheiten sind eher selten und werden für gängige Prozesse, wie das Pressen ohne hohe erforderliche Genauigkeit, entwickelt.

### **Steuerung einer Montagemaschine**

Die Steuerung einer Montagemaschine wird von einer speicherprogrammierbaren Steuerung übernommen. Wenn Montageroboter eingesetzt werden, werden diese gesondert von einer Robotersteuerung gesteuert. Die Simulation einer Robotersteuerung wird nicht in dieser Arbeit, aber z. B. von Keibel /4/ untersucht. Numerische Steuerungen werden für Bewegungsabläufe mit hohen Genauigkeitsanforderungen und komplizierten Bahnen zumeist in Werkzeugmaschinen eingesetzt. Die Simulation von numerisch gesteuerten Maschinen wird von Kreuzsch /5/ und Röck /6/ betrachtet.

Bild 2-2 zeigt eine Montagemaschine in Verbindung mit einer Steuerung. Die Steuerung sendet Informationen an die Aktoren und erhält Informationen von den Sensoren. Die Informationen werden durch Ein- bzw. Ausgänge übertragen. Die Aktoren und Sensoren

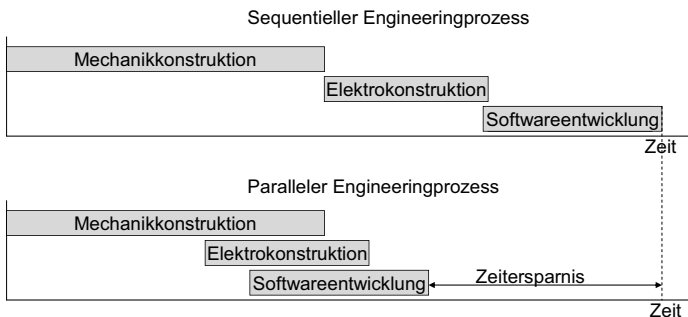
werden durch Bauteile und Baueinheiten realisiert. Während ein Bauteil einem Aktor oder einem Sensor entspricht, kann eine Baueinheit integriert ein oder mehrere Aktoren und Sensoren umfassen.



**Bild 2-2:** Montagemaschine als mechatronisches System, angelehnt an Isermann /7/

### 2.1.1.2 Engineering von Montagemaschinen

Eine Montagemaschine inklusive ihrer Steuerung stellt ein mechatronisches System dar, in dem die Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Softwaretechnik zusammenwirken /7/. Üblicherweise folgt der Mechanik- die Elektrokonstruktion. Darauf aufbauend wird die Software entwickelt. Da die unterschiedlichen Disziplinen integriert in einer Montagemaschine Anwendung finden, ist eine Absprache zwischen den Disziplinen zur Erstellung eines qualitativ hochwertigen Produktes notwendig. Zudem können durch eine verbesserte Kommunikation zwischen den Disziplinen deren Entwicklungen parallelisiert werden. Ein paralleler Engineeringprozess reduziert im Vergleich zu einem sequentiellen Engineeringprozess Zeit und somit Kosten (Bild 2-3).



**Bild 2-3:** Darstellung eines sequentiellen und eines parallelen Engineeringprozesses

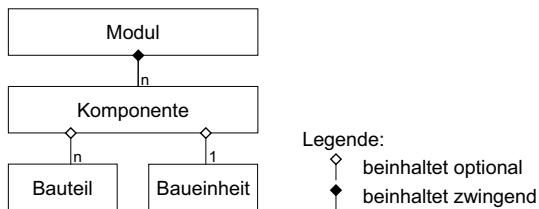
Jedoch wird zumeist heute noch ein sequentieller Engineeringprozess praktiziert /8/. Daher ist es im wissenschaftlichen /9/, /10/, aber auch im industriellen Umfeld ein großes Anliegen, die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Disziplinen zu intensivieren. Zur Verbesserung der Zusammenarbeit sind einerseits Änderungen in der Organisation des Engineeringprozesses vorzunehmen und andererseits neue disziplinübergreifende oder zumindest offene Engineeringwerkzeuge einzuführen.

### Modularisierung

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten werden im Engineering von Montagemaschinen seit Jahren in der Modularisierung gesehen. Nach Kluge et al. /11/ ist „ein Montagemodul ein lokal abgeschlossenes Teil eines Montagesystems, das eine oder mehrere in sich geschlossene Montagefunktionen übernimmt“. Durch Modularisierung soll sowohl eine Kostenersparnis durch Standardisierung und Wiederverwendung der Module beim Hersteller als auch eine erhöhte Wandlungsfähigkeit der Montagemaschine beim Kunden erzielt werden.

Nach Lechler et al. erfolgt die Modularisierung von Gesamtsystemen auf mehreren Ebenen /12/. Dies sind die System-, Maschinen-, Maschinenmodul- und die Komponentenebene.

In dieser Arbeit wird die Modularisierung einer Montagemaschine auf der Modul- und Komponentenebene angewandt (Bild 2-4). Es wird definiert, dass Komponenten wie Module in sich einen möglichst hohen und untereinander einen möglichst geringen funktionalen Zusammenhang aufweisen. Eine Komponente kann entweder aus ein oder mehreren Bauteilen oder aus einer Baueinheit bestehen.



**Bild 2-4:** Komposition eines Moduls und einer Komponente

Um den Vorteil der Wiederverwendung nutzen zu können, werden die Objekte aus der Modularisierung als Bausteine in einem Baukasten abgelegt. Das Baukastensystem sollte sich in den Bibliotheken der eingesetzten Engineeringwerkzeuge wieder finden.

### 2.1.2 Simulation von Montagemaschinen

Das V-Modell zeigt das angestrebte Vorgehen in einem mechatronischen Engineeringprozess nach der VDI-Richtlinie 2206 /13/. Es ist ein iterierender Prozess, der mehrere Phasendurchläufe kennt. Die Phasen unterteilen sich in den Systementwurf, den disziplinspezifischen Entwurf und die Systemintegration (Bild 2-5).

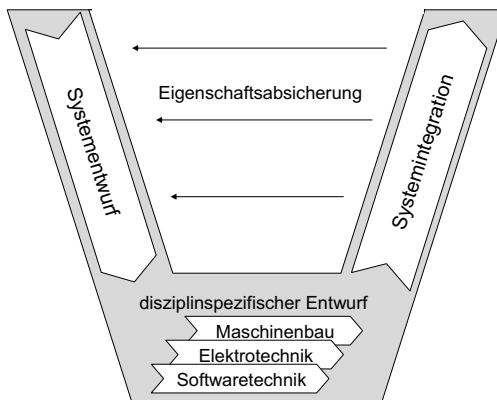


Bild 2-5: V-Modell aus der VDI-Richtlinie 2206 /13/

Der disziplinspezifische Entwurf kann mit der Simulation disziplinspezifischer Systeme unterstützt werden. Der Einsatz disziplinspezifischer Simulation dient der konstruktiven Auslegung einzelner Komponenten. Bei einer Montagemaschine sind dies insbesondere eine Mehrkörpersimulation, eine Simulation zum regelungstechnischen Entwurf und auf der Finite-Elemente-Methode basierende Simulationsverfahren.

Für den Systementwurf und die Systemintegration erfordert es eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Beim Systementwurf werden mechatronische Lösungen auf Basis der Anforderungen ermittelt. Bei der Systemintegration wird eine kompatible, verträgliche

und optimale Lösung identifiziert /13/. Bei einer Montagemaschine bezieht sich die Lösungsfindung auf das Gesamtkonzept der Montagemaschine.

### Disziplinübergreifende Simulation von Montagemaschinen

Simulation ist nach Shannon „der Prozess der Modellbeschreibung eines realen Systems und des anschließenden Experimentierens mit dem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Realität übertragbar sind“ /14/. Aufgrund der Komplexität einer Montagemaschine und der geforderten interdisziplinären Zusammenarbeit dient die Modellbeschreibung der Verbesserung des Verständnisses und der Kommunikation im Systementwurf und in der Systemintegration. Durch das Experimentieren mit dem Modell werden Erfahrungen über das Verhalten gesammelt. Die Experimentiererergebnisse dienen der Eigenschaftsabsicherung von Lösungen bei der Systemintegration.

Klemm et al. /10/ erweitern die Simulationsanwendung zur Eigenschaftsabsicherung auf die von Geisberger und Schmidt /15/ formulierten Quality Gates (Bild 2-6). Quality Gates sind Überprüfungspunkte am Ende einer Phase des Engineeringprozesses. Aufgabe der Simulation ist es, die Konstruktionsergebnisse auf ihren Erfüllungsgrad in Bezug auf die Prüfkriterien der Quality Gates zu untersuchen.

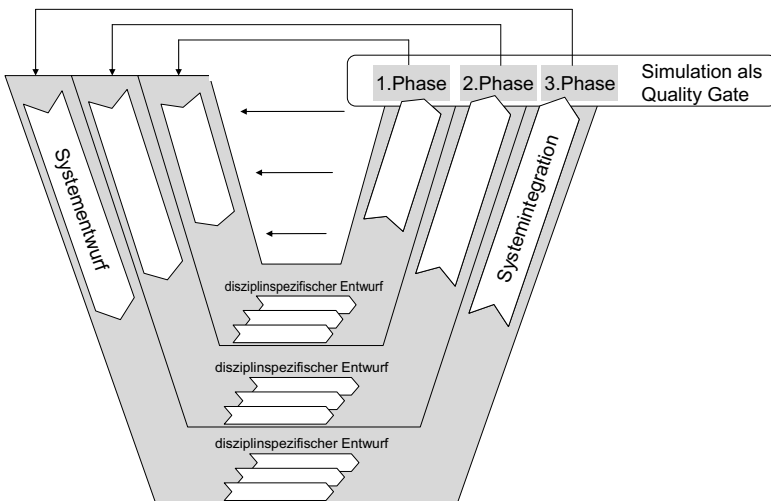


Bild 2-6: V-Modell, erweitert um die Quality Gates, angelehnt an Scheifele et al. /16/

Für die Eigenschaftsabsicherung in den unterschiedlichen Phasen des Engineeringprozesses werden auch unterschiedliche Maschinensimulationen benötigt. Die Maschinensimulation muss für den Reifegrad der Entwicklung der Montagemaschine geeignet sein. Haufe et al. /17/ stellen derartig unterschiedliche Maschinensimulationen vor.

Der Reifegrad wird nach dem Entwicklungsstand des gesteuerten und des ungesteuerten Verhaltens gegliedert. Das gesteuerte Verhalten orchestriert die Abläufe der Montagemaschine und wird von der Steuerung umgesetzt. Der Gegenpart zum gesteuerten Verhalten ist das ungesteuerte Verhalten. Dies entspricht dem Verhalten der mechatronischen Komponenten der Montagemaschine, die allein auf das gesteuerte Verhalten reagieren /18/.

Phase 1: Beim ersten Quality Gate wird ein grob dimensioniertes Modell einer Montagemaschine einer Prinzipprüfung unterzogen. Dies beinhaltet die Untersuchung der Machbarkeit und der Konsistenz des Maschinenkonzeptes. Zudem wird das interdisziplinäre Verständnis gefördert. Zur Simulation werden die Objekte, deren Bewegungsabläufe in einem Weg-Zeit-Diagramm festgelegt sind, mit den grob dimensionierten Objekten in einem 3D-CAD-Modell verknüpft. Die Simulation ist als Animation eines 3D-CAD-Modells zu verstehen.

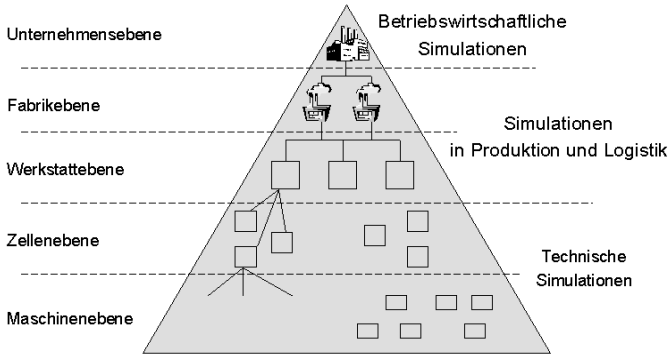
Phase 2: In dieser Phase ist das gesteuerte Verhalten in seinem logischen Ablauf beschrieben. Die ersten Tests beschränken sich auf wesentliche Steuersequenzen /17/. Dokumentationsmöglichkeiten sind z. B. Zustandsgraphen oder Petri-Netze. Ab diesem Reifegrad kann die dokumentierte Ablauflogik mit einem Maschinenmodell gekoppelt werden. Mitsamt einer Visualisierung auf Basis des 3D-CAD-Modells kann die Lösung vor der weiteren Konkretisierung geprüft und optimiert werden.

Phase 3: In Phase 3 steht die Montagemaschine vor der Inbetriebnahme. Bei diesem Reifegrad kann eine realitätsnahe Simulation durchgeführt werden. Das gesteuerte Verhalten ist durch das Steuerungsprogramm dokumentiert und das ungesteuerte Verhalten basiert auf den bereits detaillierten Konstruktionsdaten. Zu dieser Maschinensimulation gehört auch die HiLS. Auf sie wird in Kapitel 2.2 näher eingegangen.

## **Digitale Fabrik**

Die beschriebenen Maschinensimulationen sind in der Pyramide aus Bild 2-7 der technischen Simulation in der Maschinenebene zuzuordnen. Davon ist die Simulation in der

Werkstatt- und Fabrikebene zur Planung der Produktion und Logistik abzugrenzen. Auf der Werkstatt- und Fabrikebene werden oftmals die Werkzeuge der digitalen Fabrik eingesetzt.



**Bild 2-7:** Einsatzbereiche der Simulation in einem Unternehmen aus Dierßen /19/

Das Ziel der digitalen Fabrik ist nach Westkämper das „permanente Anpassen, Optimieren und Erstellen der zur Produktion notwendigen Unterlagen und Betriebsmittel“ /20/. Die Unterlagen und Betriebsmittel betreffen die wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik /21/. Für die digitale Fabrik genügen meist abstraktere Modelle, die darauf ausgerichtet sind, das Verhalten einer ganzen Fabrik über mehrere Tage hinweg zu simulieren.

Einen Überblick über die digitale Fabrik geben Engel et al. /22/. Weitere digitale Werkzeuge für die Fabrikplanung werden von Hirsch et al. klassifiziert und bewertet /23/.

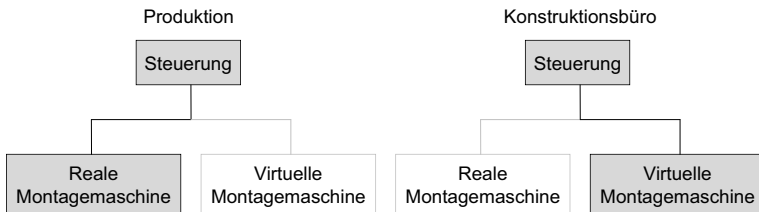
## 2.2 Hardware-in-the-Loop-Simulation

Bevor in Kapitel 3 auf die Erstellung eines Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation eingegangen wird, soll diese zuerst in Kapitel 2.2 eingeführt werden. Kapitel 2.2.1 beschreibt die Hardware-in-the-Loop-Simulation im Allgemeinen. Auf das Maschinenmodell wird in 2.2.2 näher eingegangen. In Kapitel 2.2.3 wird der Nutzen der HiLS aufgezeigt. Die Betrachtung der HiLS richtet sich auf die am Markt erhältlichen Lösungen und deren Tools.



### 2.2.1 Simulationseigenschaften und -aufbau

Bei einem hohen Reifegrad der Entwicklung einer Montagemaschine, wie in Phase 3 aus Bild 2-6, sollten die Ergebnisse einer Simulation zur Eigenschaftsabsicherung direkt in die Realität übertragbar sein. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wird das gesteuerte Verhalten so in die Simulation integriert, wie dies bei der Steuerung der realen Maschine der Fall ist. Das heißt, es wird die reale Steuerung eingesetzt. Die reale Maschine wird durch eine virtuelle Maschine ersetzt (Bild 2-8). Die virtuelle Maschine muss sich dann gegenüber der Steuerung weitestgehend wie die reale Maschine verhalten /24/.



**Bild 2-8:** Austauschbarkeit der virtuellen mit der realen Montagemaschine

Die Schnittstelle der virtuellen Maschine wird demzufolge von dem realen Zielsystem der Steuerung vorgegeben. Der Datenaustausch über diese Schnittstelle muss, wie im realen System, innerhalb der Zykluszeit der Steuerung garantiert sein. Ein zeitdeterministisches Verhalten muss daher sowohl von der Steuerung als auch von der virtuellen Maschine gewährleistet werden. Das zeitdeterministische Verhalten wird hierbei durch den Einsatz des realen Zielsystems der Steuerung und der Realisierung der virtuellen Maschine auf einem echtzeitfähigen System sichergestellt.

Die beschriebenen Anforderungen werden von einer HiLS erfüllt.

Bei der verwandten Software-in-the-Loop-Simulation wird die Steuerung nicht auf der Zielhardware ausgeführt, sondern die Steuerung wird ebenfalls simuliert. Dadurch wird die Schnittstelle zwischen der Steuerung und der virtuellen Maschine durch kein externes System festgelegt /25/. Wenn diese Schnittstelle exakt nachgebildet wird, ergibt sich bezüglich der Austauschbarkeit kein Unterschied zur HiLS. Die Schnittstelle und deren Verhalten kann aber auch von der realen Schnittstelle abweichen. In diesem Fall kann

der Datenaustausch vereinfacht umgesetzt oder die Zykluszeit gestreckt werden. Dann ist die Austauschbarkeit der virtuellen mit der realen Steuerung nicht mehr gegeben.

### Aufbau der Simulation

Eine Hardware-in-the-Loop-Simulation setzt sich aus einer virtuellen Maschine und der mit ihr verbundenen realen Steuerung zusammen. Die virtuelle Maschine besteht meistens, bei denen am Markt erhältlichen Simulationstools, aus zwei Modellen, dem Maschinenmodell und dem geometrischen Modell (Bild 2-9).

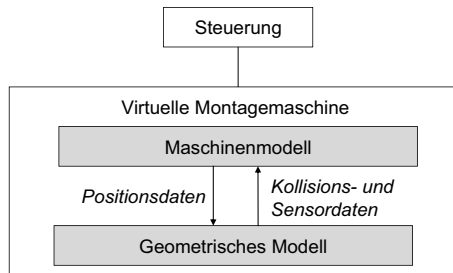


Bild 2-9: Aufbau einer Hardware-in-the-Loop-Simulation

Das Maschinenmodell ist Kernstück der virtuellen Maschine, da es die reale Maschine in Form eines mechatronischen Maschinenmodells abbildet. Es ist ein im Simulationstool lauffähiges Modell der Maschine. Basierend auf diesem Maschinenmodell wird der Zustand der Maschine berechnet.

Das geometrische Modell ist im Wesentlichen das 3D-CAD-Modell der Maschine. Es wird um die Festlegung der Bewegungsmöglichkeiten und -abhängigkeiten der Komponenten der Maschine erweitert. Zudem wird es um die 3D-Daten der Werkstücke ergänzt. Zur Visualisierung der Bewegungen erhält das geometrische Modell die Positionsdaten aus den Berechnungen des Maschinenmodells. Somit können die Bewegungsabläufe und der Materialfluss im geometrischen Modell simuliert werden. Das geometrische Modell erfasst Kollisionen zwischen Komponenten und übergibt diese als sogenannte Kollisionsdaten an das Maschinenmodell. Des Weiteren werden Sensordaten vom geometrischen Modell ermittelt und übertragen. Sie geben das Eindringen eines Werkstücks in den Detektionsbereich eines Sensors, wie z. B. einer Lichtschranke oder eines Magnetfeldes, an.

## 2.2.2 Aufbau des Maschinenmodells für eine Montagemaschine

Das Maschinenmodell bildet das ungesteuerte Verhalten der mechatronischen Komponenten der Montagemaschine als Reaktion auf die Steuerung ab (Kapitel 2.1.2).

### Schnittstelle zwischen der Steuerung und der virtuellen Maschine

Die Kommunikation zwischen der Steuerung und der virtuellen Maschine erfolgt über die bereits erwähnte Schnittstelle zum Datenaustausch. Über diese Schnittstelle werden das Eingangs- und das Ausgangsabbild der Maschine übertragen. Die Abbilder geben vor, wie die Ein- und Ausgänge zwischen der Steuerung und der Maschine ausgetauscht werden. In dieser Arbeit werden die Ein- und Ausgänge immer aus der Sicht der Maschine und nicht aus der Sicht der Steuerung betrachtet.

Das Eingangsabbild wird von der virtuellen Maschine empfangen und dort im Maschinenmodell eingelesen. Daraufhin wird der Maschinenzustand im Maschinenmodell innerhalb der Zykluszeit der Steuerung berechnet und das Ausgangsabbild generiert. Mit dem Einlesen dieses Abbildes durch die Steuerung und dem Abarbeiten des Steuerungsprogramms ist ein Zyklus durchlaufen und die Steuerung sendet erneut das Eingangsabbild an die virtuelle Maschine.

Damit das Verhalten der Maschine durch das Ausgangsabbild repräsentiert wird, muss es im Maschinenmodell modelliert sein. Das Verhalten wird in den Verhaltensmodellen strukturiert nach Komponenten abgebildet (Bild 2-10).

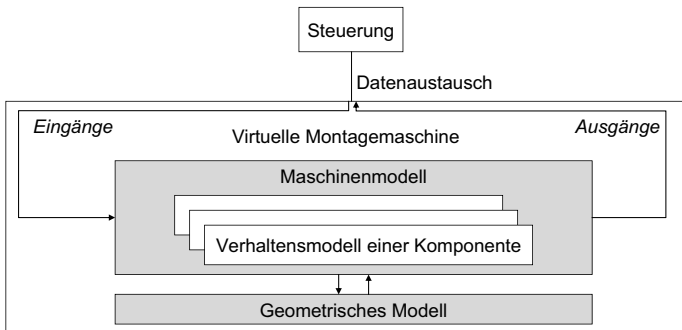
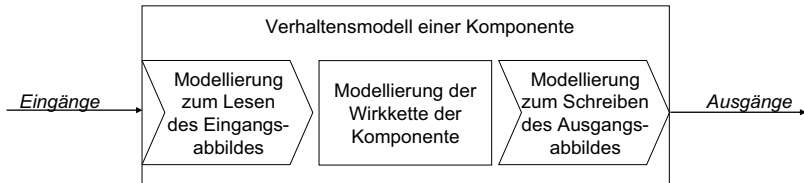


Bild 2-10: Aufbau des Maschinenmodells in der virtuellen Maschine

## Verhaltensmodell einer Komponente

Ein Verhaltensmodell besteht einerseits aus dem Abbild der Komponente durch deren Wirkkette. Auf Basis der logischen und physikalischen Wirkkette wird der Zustand der Komponente berechnet. Andererseits beinhaltet das Verhaltensmodell eine Modellierung zum Lesen des Eingangs- und zum Schreiben des Ausgangsabbildes ([Bild 2-11](#)). Des Weiteren sind eventuell Grenzen für die Zustände von Komponenten als auch Sonderfälle und Fehler der Maschine in den Verhaltensmodellen abzubilden.



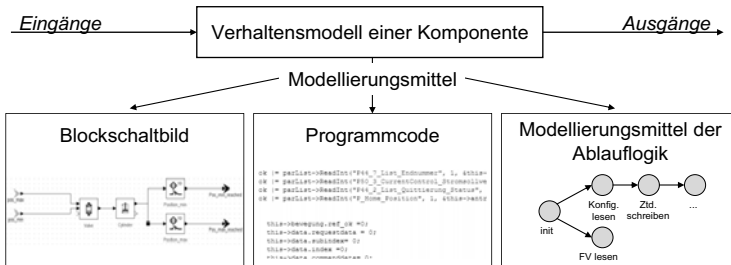
**Bild 2-11:** Prinzipieller Aufbau eines Verhaltensmodells einer Komponente

Durch die funktionale Gliederung verhält sich eine Komponente weitestgehend unabhängig von anderen Komponenten. Auftretende Wirkzusammenhänge zwischen Komponenten basieren vorwiegend auf dem Materialfluss.

## Modellierungsmittel für die Komponenten

Ein Modellierungsmittel wird in dieser Arbeit als Methode zur Darstellung eines Modells definiert. Für ein Modellierungsmittel wird eine Beschreibungssprache benötigt, die einen genauen Formalismus zur Modellierung definiert. Simulationstools bieten die Modellierung anhand einer oder mehrerer Modellierungsmittel in einer jeweils bestimmten Beschreibungssprache an.

Ein übliches Modellierungsmittel zur Abbildung des Verhaltens einer Komponente zur HiLS ist ein Blockschaltbild, ein Programmcode oder ein Modellierungsmittel der Ablauflogik ([Bild 2-12](#)). Andere Modellierungsmittel sind beispielsweise algebraische Gleichungssysteme, Listen oder Strukturdiagramme.



**Bild 2-12:** Unterschiedliche Modellierungsmittel zur Modellierung einer Komponente

Das Blockschaltbild ist das am häufigsten eingesetzte Modellierungsmittel. Es stellt Wirkketten übersichtlich dar, in dem es Blöcke durch Signale verbindet.

Ein Programmcode ist die flexibelste Modellierungsmethode und bietet einen großen Spielraum. In einem Programmcode sind die Wirkketten ebenfalls beschreibbar, wenn auch nicht in der Übersichtlichkeit wie sie ein Blockschaltbild bietet.

Modellierungsmittel der Ablauflogik sind z. B. Zustandsgraphen oder Petrinetze. Sie stellen einen Ablauf dar, der aus bedingten Übergängen von Zuständen besteht. Modellierungsmittel der Ablauflogik sind gut geeignet, wenn die Wirkkette einer Komponente situationsbedingt unterschiedliche Wirkzusammenhänge aufweist.

### Integration von Verhaltensmodellen

Neben der Modellierung im Simulationstool sind eventuell Verhaltensmodelle vorhergehender Entwicklungsschritte zur Integration in das Maschinenmodell geeignet. Oftmals werden im disziplinspezifischen Entwurf Berechnungen oder Analysen für einzelne Komponenten durchgeführt. Die erstellten Modelle sind zur Integration in das Maschinenmodell geeignet, wenn sich die Ein- und Ausgänge des Verhaltensmodells im Maschinenmodell wieder finden und die Berechnungen innerhalb der Zykluszeit der Steuerung abgeschlossen sind. Sinnvoll ist eine Integration allerdings nur, wenn das disziplinspezifische, detaillierte Modell einen Mehrwert zur Simulation des gesamten Verhaltens der Maschine leisten kann.

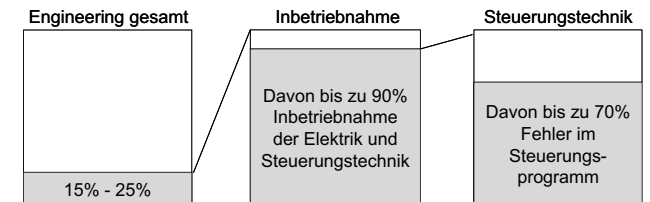
### 2.2.3 Nutzen der Hardware-in-the-Loop-Simulation im Engineering von Montagemaschinen

Die HiLS wird zur Maschinensimulation bei hohem Reifegrad eingesetzt. Der im Folgenden vorgestellte Einsatz lässt sich auf den in Kapitel 2.1.2 eingeführten Nutzen der Maschinensimulation zur Eigenschaftsabsicherung zurückführen.

Die HiLS benötigt zur Durchführung eine erste Version des Steuerungsprogramms. Ab dann kann sie sowohl vor als auch beim Aufbau der realen Maschine und während des Betriebes bei Änderungen eingesetzt werden. Der Einsatz der HiLS vor und während dem Aufbau der realen Maschine dient der virtuellen Inbetriebnahme /26/, /27/.

Zeugträger definiert: „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, technisch funktionsfähige Anlage“ /28/. Die Inbetriebnahme entspricht demzufolge der Eigenschaftsabsicherung an der realen Maschine. Bei der virtuellen Inbetriebnahme werden die Eigenschaften abgesichert, die an der virtuellen Maschine abprüfbar sind. Durch die harten Anforderungen bezüglich der Austauschbarkeit der realen Maschine mit der virtuellen Maschine gegenüber der Steuerung, kann insbesondere die Steuerungsinbetriebnahme mit Hilfe der virtuellen Maschine erfolgen. Bei dieser werden die Steuerungshardware und das -programm getestet.

Der VDW /29/ gibt an, dass die Beseitigung von Fehlern aus dem Steuerungsprogramm 70% der Zeit beansprucht, die zur Inbetriebnahme der Elektrik und Steuerungstechnik benötigt wird. Diese macht wiederum 90% der Durchlaufzeit für die gesamte Inbetriebnahme aus (Bild 2-13).



**Bild 2-13:** Anteile an der Durchlaufzeit einer Maschine, aus VDW-Bericht /29/

## **Einzelne Anwendungen innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme**

Der Test des Steuerungsprogramms anhand der virtuellen Maschine beinhaltet folgende Zielsetzungen:

- Aufdecken von Programmierfehlern

Nach Spath und Landwehr /30/ sind typische Fehler im Steuerungsprogramm unkorrekte Abläufe, fehlerhafte Verriegelungen, falsche Definition von Variablen wie z. B. Merkern und Mehrfachverwendungen von Variablen. Des Weiteren können nach Röck /6/ die Steuerungsfunktion geprüft und Laufzeitfehler entdeckt werden.

- Erkennen von Kollisionen

Kollisionen, d. h. Zusammenstöße, entstehen bei den Bewegungsabläufen der Maschine durch eine falsche Ansteuerung der Aktoren im Steuerungsprogramm. Mit Hilfe des geometrischen Modells der virtuellen Maschine werden Kollisionen detektiert.

- Test der Reaktion der Steuerung beim Auftreten von Fehlern und bei Funktionsunterbrechungen- oder -abbrüchen.

Die Fehlerszenarien müssen zur Simulation, wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, in das Maschinenmodell der virtuellen Maschine eingearbeitet werden. Gerade in Bezug auf sicherheitskritische oder kostspielige Tests ist die Übertragung auf die virtuelle Maschine nützlich.

Neben dem Test des Steuerungsprogramms kann auch die Absicherung der Taktzeit im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme durchgeführt werden. Zum einen kann die Taktzeit der Montagemaschine simulativ ermittelt, zum anderen auch optimiert werden. Die Möglichkeit, den Maschinenfunktionsablauf durch die HiLS beobachten zu können, erleichtert das Auffinden von Optimierungspotentialen im Ablauf der Maschine. Für Montagemaschinen finden sich diese zumeist in der Parallelisierung und in der feinen Abstimmung von Maschinenabläufen. Wenn die Optimierungsansätze vom Programmierer in das Steuerungsprogramm eingepflegt wurden, kann dieses wiederum anhand der virtuellen Maschine abgesichert werden.

Ein weiterer Nutzenaspekt innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme ist die Ermittlung von Werten, die den Komponenten der realen Maschine vorzugeben sind.

- Physikalische Parameter werden durch Setzen unterschiedlicher Werte im Maschinenmodell der virtuellen Maschine abgesichert und optimiert.
- Einstellvorgänge von Baueinheiten, die an der realen Maschine vorzunehmen sind, können in einigen Fällen auch an der virtuellen Maschine durchgeführt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Vorgabe der Ausgangsposition einer Achse.

### **Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme**

Der Test des Steuerungsprogramms, die Optimierung der Taktzeit und die Festlegung von Einstellungen sind Vorgänge zur Eigenschaftsabsicherung, die durch die HiLS nicht nur an der realen, sondern auch an der virtuellen Maschine ausführbar sind. Daraus ergibt sich folgender Nutzen:

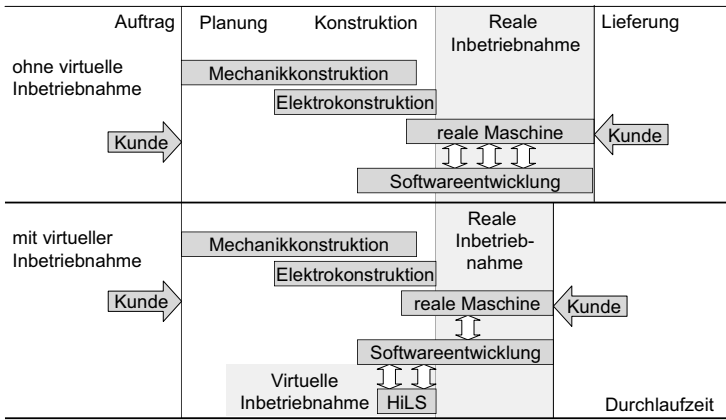
- Vorgänge zur Eigenschaftsabsicherung vorziehen und verkürzen

Die Eigenschaftsabsicherung kann in den Zeitraum vor dem Aufbau der realen Maschine vorgezogen werden, sodass an dieser Stelle ein paralleler Engineeringprozess ermöglicht wird. Die Analysemöglichkeiten sind an der virtuellen Maschine sowohl durch das Beobachten der Maschinenzustände als auch durch die Möglichkeit der Manipulation von Abläufen besser als an der realen Maschine. Somit lassen sich die Vorgänge zur Eigenschaftsabsicherung verkürzen. Dadurch kann die Maschine dem Kunden früher übergeben werden (Bild 2-14). In einer Studie verzeichnen Zäh et al. bei Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme eine Verkürzung der realen Inbetriebnahme um 75% /31/.

- Qualität steigern

Die reale Inbetriebnahme wird mit einem qualitativ hochwertigen Steuerungsprogramm und optimierten Abläufen gestartet. Die frühzeitige Reduzierung von Fehlerquellen ermöglicht einen effizienteren Engineeringprozess, da zeit- und kostenintensive konstruktive Nachbesserungen in der Mechanik, Elektrotechnik und Softwaretechnik abnehmen.





**Bild 2-14:** Durchlaufzeit einer Maschine mit virtueller Inbetriebnahme, aus Mewes /32/

### Weitere Anwendungen der Hardware-in-the-Loop-Simulation

Zu Beginn dieses Kapitels wurde bereits erwähnt, dass die HiLS auch während des Betriebes der Montagemaschine eingesetzt werden kann. Sie dient dann zur Absicherung von veränderten Steuerungsprogrammen. Diese ergeben sich, wenn eine neue Fertigungsvariante produziert oder der bisherige Maschinenfunktionsablauf zur Reduzierung der Taktzeit optimiert werden soll. Des Weiteren ist die Simulation zur Schulung der Mitarbeiter, zur Präsentation beim Kunden und zur Unterstützung des Service nützlich /33/.

In dem Verbundprojekt Ramp-up/2 /34/, /35/ wird die Verkürzung des Fertigungsanlaufs durch den Einsatz unterschiedlicher virtueller Methoden angestrebt. Die Hardware-in-the-Loop-Simulation wird hier gemeinsam mit anderen Simulationsanwendungen aus den Bereichen der NC-Steuerungen und der Fertigungsleittechnik eingesetzt /36/.

Einen neuartigen Ansatz stellt das simulationsbasierte Condition Monitoring dar /37/, /38/, /39/. Hier läuft eine HiLS parallel, also zeitgleich, zum Betrieb der Maschine. Die Zustände der realen und der virtuellen Maschine werden verglichen, um Abweichungen im Verhalten zu detektieren.

### **2.3 Zusammenfassung der Grundlagen**

Zuerst wurde der Kontext aufgezeigt, in dem die HiLS eingesetzt werden soll. Dieser beinhaltet den Aufbau von Montagemaschinen und neue Ansätze im Engineering, wie die Parallelisierung des Engineeringprozesses und die Modularisierung. Die Simulation im Engineering von Montagemaschinen wurde im Zusammenhang mit dem V-Modell aus der VDI-Richtlinie 2206 vorgestellt. Aus dem V-Modell ergeben sich Maschinensimulationen unterschiedlicher Reifegrade.

Im zweiten Teil des Kapitels wurde in die HiLS eingeführt. Sie stellt die technische Grundlage zur Erstellung eines Maschinenmodells dar. Es wurden die Eigenschaften der Simulation und der Aufbau eines Maschinenmodells aufgezeigt. Um die Motivation aus Kapitel 1.1 zu untermauern, wurde im letzten Abschnitt der Nutzen des Einsatzes der HiLS dargestellt.

### 3 Stand der Forschung und Technik

Die Problemstellung in Kapitel 1.2 dieser Arbeit zeigt auf, dass der Aufwand für die Hardware-in-the-Loop-Simulation ursächlich ist für den langsamen Einzug in die industrielle Anwendung. Der Aufwand zur Simulation liegt wiederum, wie in der Problemstellung beschrieben, überwiegend in der Erstellung des Maschinenmodells. Demzufolge wird im Folgenden die aufwandsarme Erstellung von Maschinenmodellen zur HiLS betrachtet. Im Allgemeinen wird versucht durch eine geeignete Modellierungsmethode den Aufwand zu reduzieren. Die Modellierungsmethode bezieht sich auf das Vorgehen zur Erstellung eines lauffähigen Maschinenmodells und deren Eingliederung in den Engineeringprozess. Die aufwandsreduzierenden Modellierungsmethoden stehen der konventionellen Methode gegenüber, bei der das Maschinenmodell zum Zeitpunkt der Steuerungsprogrammierung manuell und ohne jegliche Vorarbeiten erstellt wird. Dies ist aufwändig, fehleranfällig und verlangt den zeitintensiven Einsatz von Experten.

Es haben sich in der Forschung und Technik drei grundsätzlich unterschiedliche Modellierungsmethoden zur aufwandsarmen Erstellung herauskristallisiert. Diese werden in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 vorgestellt. Sie besitzen folgende Zielrichtung:

- Kapitel 3.1: Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering
  - Entstehung des Modells durch Mitwachsen in der Detaillierungsstufe der Entwicklung
- Kapitel 3.2: Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten
  - Entstehung des Modells aus Bausteinen, die aus einem Baukasten zusammengesetzt werden
- Kapitel 3.3: Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Modellerstellung
  - Entstehung des Modells durch Automatisierung der Modellierung auf Basis der Engineeringdokumente

In Kapitel 3.4 folgt die Ermittlung der Defizite der Modellierungsmethoden. In Kapitel 3.5 wird dann das Ziel der Arbeit formuliert und der Handlungsbedarf bei der automatisierten Modellerstellung festgestellt.

### **3.1 Beitrag eines simulationsgestützten Engineerings zur Erstellung von Maschinenmodellen**

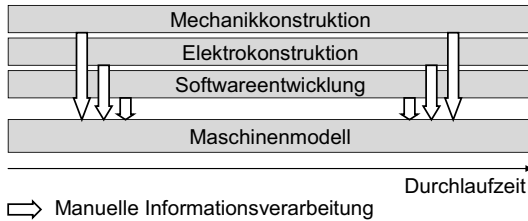
#### **3.1.1 Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering**

Der erste Ansatz wird unter dem Begriff des simulationsgestützten Engineerings vorgestellt. Das simulationsgestützte Engineering beschreibt allerdings nicht die Modellierungsmethode an sich, sondern bezeichnet den durchgängigen Einsatz der Simulation im Engineeringprozess.

Ein simulationsgestützter Engineeringprozess beeinflusst die Erstellung des Maschinenmodells zur HiLS. Die Modellbildung wird hierbei konstruktionsbegleitend und in den Engineeringprozess integriert durchgeführt. Der Detaillierungsgrad des Maschinenmodells wird parallel mit dem Engineeringprozess erhöht. Somit ist es möglich, einhergehend mit der Verfeinerung der Konstruktion, Maschinensimulationen, z. B. in den drei Phasen aus Kapitel 2.1.2, vorzunehmen. Des Weiteren können für disziplinspezifische Simulationen Teile des Maschinenmodells detailliert und erweitert werden. Am Ende des Engineeringprozesses wird das Maschinenmodell zu einem Maschinenmodell für die HiLS ausgebaut.

Bild 3-1 zeigt die parallele Erstellung des ablauffähigen Maschinenmodells durch die manuelle Verarbeitung der Informationen aus der Mechanik- und Elektrokonstruktion sowie aus der Softwareentwicklung. Die unterschiedlichen Disziplinen sind zur vereinfachten Darstellung ebenfalls parallel gezeichnet, was aber im realen Engineeringprozess nicht unbedingt der Fall sein muss.

Das Maschinenmodell beruht im Wesentlichen auf den Informationen der Mechanik- und Elektrokonstruktion. Für eine HiLS werden jedoch auch Informationen aus der Softwaretechnik benötigt, um die Schnittstelle zur Steuerung im Maschinenmodell abzubilden (Kapitel 2.2.1). Aus diesem Grund wird die Softwareentwicklung in den Bildern 3-1 bis 3-7 mit aufgeführt.



**Bild 3-1:** Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering

Der Beitrag des simulationsgestützten Engineerings zur Reduktion des Aufwands für die HiLS ist schwer zu erfassen, da sich der Aufwand zur Erstellung des Maschinenmodells auf den gesamten Engineeringprozess mit mehreren Maschinensimulationen verteilt. Der Aufwand ist speziell der HiLS kaum zuordenbar.

Für eine aufwandsarme Erstellung des Maschinenmodells bei dem simulationsgestützten Engineering lässt sich dennoch wie folgt argumentieren:

- Dadurch, dass das Maschinenmodell für die HiLS am Ende des Engineeringprozesses erstellt wird, vereint es alle Festlegungen, die innerhalb des Engineeringprozesses der Maschine getroffen wurden. Somit wird ein hoher Detaillierungsgrad erreicht.
- Durch die durchgängige Verwendung des Maschinenmodells werden die in den vorhergehenden Phasen durchgeführten Modellierungen wieder verwendet. Somit entsteht kein Mehraufwand durch mehrmalige Modellierung /40/, /41/.
- Zudem wird das Maschinenmodell in den jeweils vorhergehenden Maschinensimulationen verifiziert. Daraus ergibt sich eine hohe Entwicklungssicherheit /42/, durch die sich der Modellierungsaufwand bei den jeweiligen Verfeinerungen des Maschinenmodells reduziert.

Fleischer und Munzinger /41/ zeigen diese Modellierungsmethode an Werkzeugmaschinen auf. Sie untergliedern den Entwicklungsprozess einer Werkzeugmaschine entsprechend der VDI-Richtlinie 2221 /43/ in die Phasen Konzept, Entwurf, Ausarbeitung und Erprobung. Die beiden Autoren ziehen den Schluss, dass „ein geeignetes Simulationsmodell in seinem Detaillierungsgrad mit dem Reifegrad der Maschinenentwicklung mitwachsen sollte, um in jeder Phase des Entwicklungsprozesses, die an es gestellten

Anforderungen erfüllen zu können [...]. Die Detaillierungen sollen innerhalb ein und desselben Modells erfolgen“ /41/.

Die Gewährleistung der Durchgängigkeit eines Maschinenmodells über die Phasen des Engineeringprozesses hinweg ist anspruchsvoll. Hohe Anforderungen gelten dem Modellierungsmittel (Kapitel 2.2.2) zur Abbildung des Verhaltens der Maschine. Diese resultieren aus den Anforderungen der unterschiedlichen Engineeringphasen und Disziplinen.

### Simulationsgestütztes Engineering mit Aufbau eines Informationsmodells

Eine weitere Möglichkeit, in jedem Entwicklungsstand über ein Maschinenmodell zu verfügen, ist es, ein interdisziplinäres Informationsmodell als Master des Entwicklungsprozesses aufzubauen /44/. Bild 3-2 zeigt das simulationsgestützte Engineering mit Aufbau eines Informationsmodells.

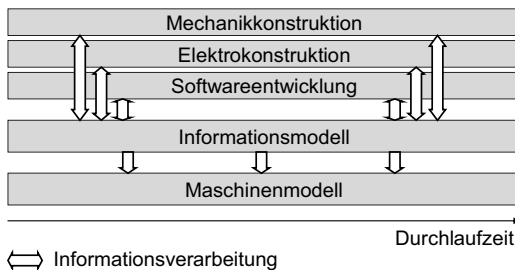


Bild 3-2: Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering mit Aufbau eines Informationsmodells

Das Informationsmodell steht im durchgängigen Informationsaustausch mit den einzelnen Disziplinen. Es wird einerseits gespeist von den Informationen aus den Disziplinen; andererseits gibt es ein interdisziplinäres Grundgerüst für die Konstruktion der einzelnen Disziplinen vor. Aus dem Informationsmodell wird in den unterschiedlichen Phasen des Engineeringprozesses das Maschinenmodell ausgeleitet. Ein Maschinenmodell muss aus einem Informationsmodell ausgeleitet werden, da das Informationsmodell selbst nicht simulationsfähig ist. Teile des Informationsmodells können, als Grundlage für disziplinspezifische Simulationen, je nach Bedarf ebenfalls ausgeleitet und detailliert werden.

Die Informationsmodelle verschiedener wissenschaftlicher Ansätze werden in dieser Arbeit nach ihrer Homogenität der Modellierung unterschieden. Wenn mehrere Modellierungsmittel eingesetzt werden, um alle Informationen modellieren zu können, wird die Modellierung als heterogen bezeichnet. Ziel ist eine homogene Modellierung, da sie anhand eines Modellierungsmittels formuliert ist. Je umfangreicher der Informationsgehalt ist, desto schwieriger ist es, ein homogenes Modell zu erstellen.

Gerade die Integration von Modellen aus unterschiedlichen Werkzeugen in ein Informationsmodell gestaltet sich schwierig, da sich die Modellierungsmittel und Beschreibungssprachen oftmals stark unterscheiden. Dieser Problemstellung hat sich das Projekt „Wieder verwendbare Modelle für die virtuelle wissensbasierte Produktentwicklung“ /45/ angenommen.

Das simulationsgestützte Engineering mit Aufbau eines Informationsmodells wird z. B. von einem Arbeitskreis des BMBF-Projekts Produktion und Fertigungstechnologien /44/ vorgeschlagen. Das Informationsmodell ist in diesem Fall disziplinneutral.

Brecher und Karlberger /46/ stellen ein interdisziplinäres, abstraktes Systemmodell vor, das die wesentlichen Systemeigenschaften und Anforderungen einer Maschine beschreibt.

An der TU München /47/, /48/ wurde eine Funktionsbeschreibung als Informationsmodell entwickelt. Dieses dient ebenfalls als Master, das den Engineeringprozess durchgängig begleitet. Für die Anwendung in den unterschiedlichen Disziplinen, aber auch zur Erstellung des Maschinenmodells, muss es verfeinert und erweitert werden. Im Rahmen des Projekts AutoVIBN /49/, /50/ wurde an der Ausleitung eines Maschinenmodells aus der Funktionsbeschreibung gearbeitet. Die Funktionsbeschreibung beinhaltet die Struktur, das Verhalten und die Störfälle einer Maschine. Gemeinsam mit Daten aus der Mechanik- und Elektrokonstruktion der Maschine kann dann automatisiert zu jeglichen Reifegraden ein Maschinenmodell ausgeleitet werden. Für ein Maschinenmodell zur HiLS wird zusätzlich eine Schnittstellenbeschreibung zwischen der Maschine und der Steuerung benötigt.

Bathelt erarbeitet eine erweiterte Funktionsstruktur als Informationsmodell für die interdisziplinäre Entwicklung /51/. Die erweiterte Funktionsstruktur bildet neben den klassischen Funktionen in der VDI-Richtlinie 2221 /43/ auch die Ablauflogik der Steuerung ab.

Eine Modellierung kann so stark heterogen ausgeprägt sein, dass sie nicht mehr als Informationsmodell, sondern als Informationsumgebung zu bezeichnen ist. Eine Informationsumgebung speichert die Informationen aus der Konstruktion zumeist in ihrem ursprünglichen Format strukturiert ab. Ihr Ziel ist ein vollständiger Informationsaustausch über die Disziplinen hinweg. Dies ist notwendig, da es kein System gibt, welches jedwede Engineeringaufgabe löst /52/.

Klemm et al. /10/ unterscheiden bezüglich der Homogenität der Modellierung zwischen einer Engineering-Datenbasis und einer Integrationsplattform. Während in der Engineering-Datenbasis als Informationsumgebung Daten mehrerer Werkzeuge verknüpft werden, besitzt die Integrations-Plattform ein Informationsmodell.

Ein weiteres Beispiel ist die in dem Projekt MIKADO /53/ entwickelte Mechatronik-Kooperationsplattform. Die Informationsumgebung vernetzt und integriert disziplinspezifische Modelle und unterstützt die disziplin- und unternehmensübergreifende Zusammenarbeit durch die Bereitstellung der Informationen /54/.

Innerhalb des Projektes Föderal ist die Föderale Informations-Architektur konzipiert worden /55/. Sie ist eine modulare und offene Systemplattform, die ebenfalls disziplinspezifische Werkzeuge integriert. Die Plattform beinhaltet allerdings ein Informationsmodell, das die disziplinspezifischen und die interdisziplinären Informationen in Form eines semantischen Netzes abspeichert.

Kiefer entwirft ein Datenmodell für das Engineering automatisierter Fertigungszellen aus dem Karosserierohbau /56/. Das PPR-Datenmodell (Produkt-Prozess-Ressource-Datenmodell) dient als interdisziplinärer Planungsmaster, der alle Disziplinen integriert. Die Modellierung im PPR-Datenmodell ist heterogen und beinhaltet Verknüpfungen zwischen den verwendeten Produkten, Prozessen und Ressourcen. Aus dem PPR-Datenmodell kann die Grundlage für ein Maschinenmodell zur HiLS ausgeleitet werden.

### **Simulationsgestütztes Engineering in Verbindung mit baukastenbasiertem Engineering**

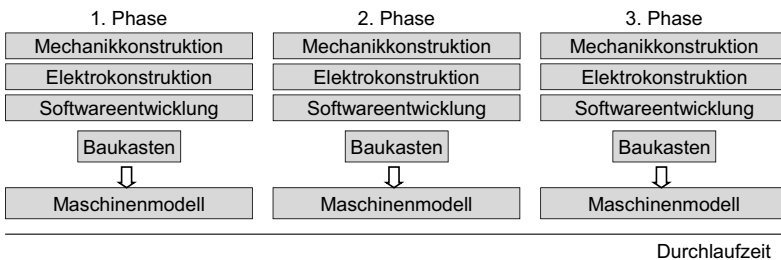
Ein weiteres Vorgehen zur Erstellung des Maschinenmodells im Rahmen des simulationsgestützten Engineerings sieht die Verwendung von Baukästen vor (Bild 3-3). Das baukastenbasierte Erstellen von Maschinenmodellen wird in Kapitel 3.2 näher beschrieben.



ben. Dennoch wird das Vorgehen aus Bild 3-3 primär dem simulationsgestützten Engineering zugeordnet.

Es wird vorrangig von dem Forschungsprojekt Aquimo getrieben /57/. Die Simulation begleitet auch bei diesem Vorgehen den Engineeringprozess und es werden Maschinenmodelle in den unterschiedlichen Reifegraden erstellt.

Allerdings findet kein kontinuierlicher Informationsaustausch zwischen der Entwicklung und dem Maschinenmodell statt. Das Maschinenmodell wird jeweils am Ende einer Phase des Engineeringprozesses nach dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 /13/ aus einem Baukasten heraus erzeugt.



**Bild 3-3:** Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering aus Baukästen

Für das Vorgehen bedarf es mehrerer Baukästen, die jeweils auf den Reifegrad abgestimmte Bausteine enthalten. Alternativ können die Bausteine in ihrer Detaillierung variabel sein.

Im Forschungsprojekt Aquimo /57/, /58/ ist ein Baukasten für die erste Phase des Engineeringprozesses mit so genannten Entwurfskomponenten und für die dritte Phase ein Baukasten zur HiLS umgesetzt worden. Das Ziel ist erreicht, wenn zu allen Quality Gates (Kapitel 2.1.2) bedarfs- und entwicklungsstandgerechte Maschinenmodelle aufwandsarm zur Verfügung stehen /59/.

### 3.1.2 Standards für Informationsmodelle

In diesem Kapitel werden Informationsmodelle betrachtet, die durch den Rückhalt größerer Organisationen das Potential aufweisen, in Zukunft allgemeine Standards darzustellen. Ein allgemeiner Standard zur Modellierung hat den Vorteil, dass die Informationsmodelle auch unternehmensübergreifend durchgängig sind.

Folgend werden AutomationML und SysML vorgestellt. AutomationML ist ein heterogenes Informationsmodell, das als Austauschformat die Konstruktionsergebnisse der Disziplinen zusammenträgt. SysML ist ein disziplinneutrales Informationsmodell, das sowohl zur Konzeption in einem frühen Reifegrad als auch zur späteren Detaillierung der Maschine eingesetzt werden kann.

#### AutomationML

AutomationML wurde erstmals 2008 von dem industriegetriebenen AutomationML-Konsortium /60/ vorgestellt. Das Maschinenmodell entsteht durch die Vereinigung der Informationen aus den unterschiedlichen Werkzeugen der verschiedenen Disziplinen. Dadurch ermöglicht es einen durchgängigen Informationsfluss /61/. Die Modellierung wird in AutomationML mit drei Modellierungsmitteln und deren Beschreibungssprachen umgesetzt.

- Die Maschinentopologie wird in einem Strukturdiagramm abgebildet. Die verwendete Beschreibungssprache ist das Datenformat CAEX /61/. CAEX ist XML-ähnlich und gemäß der IEC 62424 /62/ definiert. Modelle für Objekte der Maschine aus anderen Modellierungsmitteln können in der Struktur der Maschine referenziert werden.
- Die Geometrie und die Kinematik der Maschine werden in einem 3D-CAD-Modell repräsentiert. Die zugehörige Beschreibungssprache ist das Dateiformat Collada der Khronos Group /61/.
- Das Ablaufverhalten wird in einem Modellierungsmittel der Ablauflogik beschrieben /63/. Es erfolgt in der Ablaufsprache nach IEC 61131-3 /64/ in PLCopen XML /65/.

Ein Nachteil der AutomationML ist die ausschließliche Modellierung des diskreten Verhaltens der Maschine. Anhand der Ablaufsprache können nur logische und keine physikalischen Modelle erstellt werden. Somit ist es nicht vorgesehen, dynamisches Verhalten

abzubilden. Eine Erweiterung von Bergert et al. um hybride State Charts ermöglicht es in AutomationML auch kontinuierliche Funktionen abzubilden /66/.

## **SysML**

SysML wurde 2006 von der OMG /67/ spezifiziert und übernimmt einen Großteil der Modellierungsmöglichkeiten von UML2 /68/. SysML erweitert und verändert die UML2 für die Systemmodellierung /69/.

SysML unterteilt das Informationsmodell in ein Struktur- und in ein Verhaltensmodell und bietet dazu folgende Modellierungsmittel /69/:

- Das Strukturmodell zeigt die hierarchische Strukturierung der Objekte einer Maschine. Es umfasst zudem ein Parameterdiagramm, das die Objekte der Maschine durch mathematische Gleichungen beschreibt.
- Das Verhaltensmodell bedient sich der Modellierungsmittel der Ablauflogik, um das Verhalten von Objekten zu beschreiben. Die Modellierungsmittel sind Zustandsdiagramme, Aktivitätsdiagramme und Sequenzdiagramme aus der UML2.
- Weder dem Struktur- noch dem Verhaltensmodell zugeordnet ist das Anforderungsdiagramm. Es beschreibt die Anforderungen an die Maschine.

SysML unterstützt alle Phasen des Engineeringprozesses, dient jedoch nicht dem Austausch von Daten aus unterschiedlichen Engineeringwerkzeugen. Es gibt z. B. keine Möglichkeit zur Integration eines 3D-CAD-Modells. Deshalb zählen Brecher und Karlberger /46/ die Kopplung eines SysML-Modells mit disziplinspezifischen Engineeringwerkzeugen zu den noch ungelösten Herausforderungen.

Wie Andel et al. /70/ aus der Praxis berichten, sind zur Erstellung von Informationsmodellen die Möglichkeiten der allgemeinen UML ebenfalls ausreichend. Insgesamt heben Andel et al. bei der Modellierung mit UML die gute Verständlichkeit über alle Disziplinen hinweg positiv hervor.

Hummel et al. /71/ kritisieren die fehlenden Modellierungsmöglichkeiten von SysML in Bezug auf den Materialfluss und die Kollisionsdetektion. Sie stellen ein ebenfalls disziplinutrales Informationsmodell vor, das Speicherobjekte beinhaltet, die die geometrischen Eigenschaften für jedes Objekt der Maschine verfolgen.

## Weitere Standards

Da sich das Interesse dieser Arbeit auf Informationsmodelle zur interdisziplinären Maschinensimulation begrenzt, ist die vorgestellte Auswahl klein.

Wenn allein der Austausch von CAD-Daten betrachtet wird, ist das STEP-Format relevant. Es ist ein Standard zur technischen Produktbeschreibung /72/. Die Geometrie, die Topologie, das Material und die Prozessstruktur einer Maschine können im STEP-Format beschrieben werden /73/. Es fehlt jedoch die Möglichkeit zur Modellierung des Verhaltens. Daher ist STEP nicht geeignet.

Ein Maschinenmodell kann mit der offenen Sprache Modelica /74/ erstellt werden. Diese ist jedoch eine Beschreibungssprache. Daher beinhaltet sie keine grundlegenden Festlegungen, wie eine Maschine abzubilden ist.

### 3.2 Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten

Bei der folgenden Modellierungsmethode werden Ansätze wissenschaftlicher Arbeiten zusammengefasst, bei denen das Maschinenmodell zur HiLS aus Bausteinen eines mechanischen Baukastens erstellt wird. Die Modellierungsmethode ist dem baukastenbasierten Engineering zuzuordnen. Die Bausteine entsprechen Simulationsmodellen für die Objekte aus der Modularisierung der Maschine. Zur Bildung von Varianten können die Bausteine parametrisiert werden. Die Erstellung des Maschinenmodells erfolgt durch die Konfiguration der Bausteine (Bild 3-4). Die Konfiguration beinhaltet die Auswahl der Bausteine, deren Parametrierung und die Zusammenstellung zu einem Maschinenmodell.

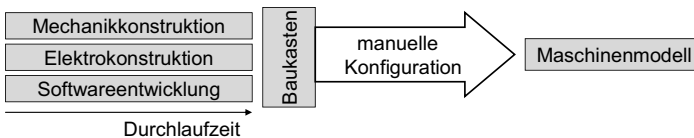


Bild 3-4: Manuelle Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten

Im Unterschied zur kontinuierlichen Verfeinerung und Erweiterung des Maschinenmodells beim simulationsgestützten Engineering ist die Erstellung des Maschinenmodells

aus einem Baukasten statisch. Die Erstellung des Maschinenmodells findet zum Zeitpunkt der Hardware-in-the-Loop-Simulation, folglich bei Abschluss einer ersten Version eines Steuerungsprogramms, statt. Der Baukasten enthält speziell für die HiLS geeignete Simulationsmodelle.

Die Aufwandsreduzierung bei der Anwendung dieser Modellierungsmethode ergibt sich gegenüber der konventionellen Modellierung aus der Wiederverwendung der Simulationsmodelle /75/, /76/. Daneben sind die Simulationsmodelle durch mehrmalige Verwendung auf ihre Richtigkeit geprüft, sodass die Erstellung eines Maschinenmodells aus einem Baukasten weniger fehleranfällig ist als eine manuelle Erstellung.

Die einmalige Modellierung eines Simulationsmodells wird von einem Simulationsexperten übernommen. Für die Konfiguration von Maschinenmodellen aus dem Baukasten ist dann jeweils ein geringer Einsatz von Simulationsexperten nötig.

### **Aufbau eines Baukastens**

Elementar für das Gelingen des baukastenbasierten Erstellens von Maschinenmodellen ist eine geeignete Modularisierung (Kapitel 2.1.1.2). Die Herausforderung lässt sich in zwei Aspekte aufteilen.

- Alle Disziplinen müssen mit der Definition der Bausteine vereinbar sein.
- Die Hierarchieebene, auf der die Bausteine gründen, muss auf die zu realisierenden Maschinen angepasst sein.

Die erste Herausforderung hat ihren Ursprung in der Tatsache, dass durch eine funktionale Untergliederung der Maschine mechatronische Objekte entstehen. Um durchgängig alle Disziplinen zu repräsentieren, müssen die disziplinspezifischen Sichtweisen auf die Untergliederung der Maschine abgestimmt werden /77/. Problematisch ist hierbei nach Possel-Dölken /78/, dass die funktionalen Zusammenhänge aus mechanischer, elektrischer oder softwaretechnischer Sicht zu unterschiedlichen Objekten führen. Demzufolge weisen die Komponenten oftmals unterschiedliche Granularität auf. Fritsch /79/ weist darauf hin, dass in der Regel in den bestimmten Disziplinen bereits unterschiedliche, nicht untereinander abgestimmte Modularisierungsansätze existieren. Dieser Problematik ist mit einem interaktiven Prozess zu begegnen, indem die mechatronischen Objekte solange angepasst, verändert und abgestimmt werden, bis sie mit allen Disziplinen vereinbar sind /80/.

Die zweite Herausforderung besteht in der Entscheidung, welcher hierarchischen Ebene der Modularisierung die Objekte angehören sollen. Sowohl Stationen, Module als auch Komponenten können die Basis zur Erstellung von Bausteinen sein /12/. Die in einer Ebene gebildeten Objekte müssen allerdings abgeschlossen und autark sein /12/. Tomaszonas schlägt eine komponentenbasierte Modellierung vor /75/, /76/. Bild 3-5 zeigt die Pyramide der hierarchischen Ebenen nach Kiefer et al. /81/. Kiefer et al. empfehlen eine Verhaltensmodell-Bibliothek für die Funktionsgruppenebene. Diese entspricht in der Begrifflichkeit dieser Arbeit der Modulebene. Die Funktionsgruppen sind unternehmensspezifisch, d.h. sie sind auf den Engineeringprozess eines Herstellers von Montagemaschinen zugeschnitten. Sie werden aus unternehmensneutralen, also herstellerübergreifenden, Komponenten zusammengesetzt.

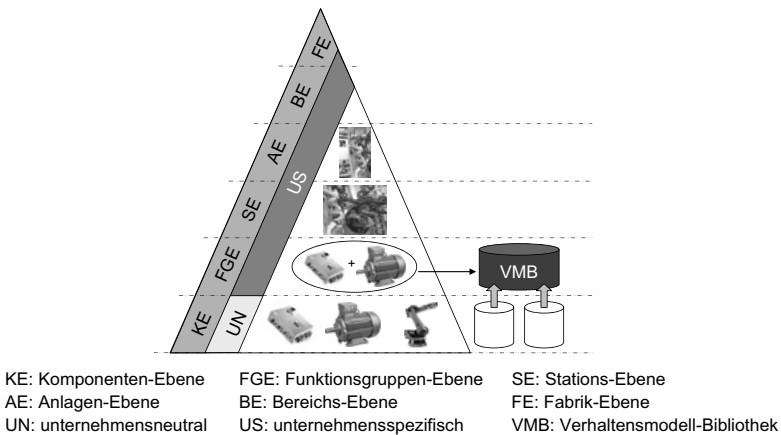


Bild 3-5: Hierarchische Ebenen, auf der die Bausteine eines Baukastens gründen, aus Kiefer et al. /81/

Die Entscheidung über die Mächtigkeit der Bausteine sollte sich nach den zu realisierenden Maschinen richten. Die ingenieurtechnische Leistung besteht beim baukastenbasierten Engineering in der Auswahl, Kombination und Integration der Bausteine /82/. Bei dem Bau von Maschinen kann es sich um Einzelfertigungen, eine Serien- oder um eine variantenreiche Serienfertigung handeln. Ziel ist es, die Amortisationszeit des Aufwands zur Erstellung eines Bausteins möglichst kurz zu halten /77/.

Demzufolge empfiehlt es sich bei einer Serienfertigung durch die hohe Stückzahl gleicher Maschinen, den Baukasten auf der Modul- oder auf der Stationsebene aufzubauen.

Bei einer ausgeprägten Einzelfertigung wird eine Maschine nicht einer anderen gleichen. Es kommt nur bei eingekauften Bauteilen und Baueinheiten zu einer Wiederverwendung. Auf eine unternehmensspezifische Modularisierung kann dann verzichtet werden. Es können allerdings Simulationsmodelle für Bauteile und Baueinheiten als Bibliothekselemente hinterlegt werden.

Die Entscheidung bei einer variantenreichen Serienfertigung stellt die größte Herausforderung dar. Sie bewegt sich im Spannungsfeld zwischen der Komponenten- und der Modulebene.

### **Bereitstellung von Simulationsmodellen durch den Lieferanten**

Der Aufwand zur Erstellung der Simulationsmodelle reduziert sich für einen Hersteller, wenn Zulieferer Simulationsmodelle für ihre Bauteile oder ihre Baueinheiten mitliefern.

Im Verbundprojekt GUSMA /83/ wird die unternehmensübergreifende Simulation von Arbeitsmaschinen untersucht. Arbeitsmaschinen sind Gesamtsysteme, die stark vom Know-how der Zulieferer abhängig sind. Daher wird angestrebt, dass die Zulieferer die Simulationsmodelle stellen, so dass der Hersteller diese zur Simulation nur noch zusammenführen muss.

Im Fall von Montagemaschinen werden zumeist die Bauteile und Baueinheiten von einem Zulieferer bezogen. Bergert und Diedrich /84/ fordern, dass die Zulieferer ihren Lieferumfang um das Simulationsmodell erweitern. Der Lieferumfang umfasst bereits ein 3D-CAD-Modell und bei Baueinheiten die Spezifikation des Abbildes zur Kommunikation mit der Steuerung. Dadurch wird nicht nur der Aufwand für den Hersteller einer Montagemaschine reduziert, sondern in vielen Fällen erst eine Simulation ermöglicht. Zur Erstellung eines Simulationsmodells ist ein Detailwissen erforderlich, welches sich teils schwer oder nicht aus dem Beobachten des Verhaltens des Bauteils oder der Baueinheit erschließen lässt. Demzufolge halten es Bergert und Diedrich für unabdingbar, dass die Simulationsmodelle vom Lieferanten bereitgestellt werden.

Damit eine Übergabe von Simulationsmodellen möglich ist, müssen diese standardisiert in einer systemneutralen Beschreibungssprache, wie z. B. AutomationML, modelliert

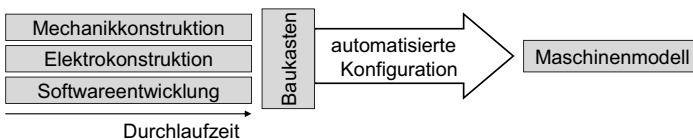
werden /81/. Alternativ können geeignete Transformatoren für die Übergabe der Simulationsmodelle bereitgestellt werden.

### Manuelle Konfiguration des Maschinenmodells

Nachdem ein Baukasten aufgebaut ist, kann ein Maschinenmodell zur HiLS manuell durch Konfiguration erstellt werden. Die Konfiguration kann entweder frei oder nach einem Vorgehen mit definierten Dokumenten durchgeführt werden. Tomaszunas bezieht sich in seiner komponentenbasierten Modellierung auf die so genannte ROOM-Methode, die unterschiedliche Modellierungsmittel zur Erstellung der Bausteine des Baukastens und zur Konfiguration der Maschinenmodelle definiert /75/. Zur Konfiguration wird ein Bauplan herangezogen. Der Bauplan stellt alle benötigten Komponenten und die Wirkverknüpfungen zwischen deren Ein- und Ausgängen in einem Schaltplan dar. Darauf aufbauend kann das Maschinenmodell manuell erstellt werden.

### Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Konfiguration der Bausteine

Nach Verl et al /59/ entfaltet der baukastenbasierte Ansatz seine volle Leistungsfähigkeit erst über eine automatisierte Konfiguration der Maschinenmodelle. In [Bild 3-6](#) ist die erweiterte, baukastenbasierte Modellierungsmethode dargestellt.



**Bild 3-6:** Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Konfiguration der Bausteine aus einem Baukasten

Das grundlegende Modell für eine automatisierte Konfiguration wird in dieser Arbeit als Metamodell bezeichnet. Es gibt die Module und Komponenten sowie deren Zusammenhänge in der Montagemaschine vor. Ein Beispiel für ein solches Metamodell wäre der Bauplan aus dem manuellen Vorgehen von Tomaszunas /75/.

Aufbauend auf der Föderalen Informations-Architektur der Föderal-Initiative /55/ werden im Folgeprojekt Aquimo /58/ Engineeringdokumente unterschiedlicher Disziplinen



und das Maschinenmodell automatisiert konfiguriert. Das Metamodell entspricht einem Installationsdiagramm, in dem Aktoren und Sensoren an Steuerungskomponenten angeschlossen sind /58/. Die Bausteine aus dem mechatronischen Baukasten besitzen Parameter, die mit Regeln belegt werden können. Alternativ zum Installationsdiagramm kann ein Maschinenmodell auch durch das Aufstellen von unternehmensspezifischen Regeln und das Setzen von projektspezifischen Parameterwerten automatisiert konfiguriert werden.

Reinhart et al. /85/ stellen eine Lösung zur teilautomatisierten Konfiguration vor. Das Metamodell wird in einer abstrakten Modellierungsumgebung, der Entwicklungsplattform, erstellt. In der Entwicklungsplattform sind die Bausteine bekannt. Zur Modellierung des Metamodells werden die Schnittstellen der benötigten Bausteine manuell gekoppelt und die Parametrierungen vorgenommen. Durch das erhöhte Abstraktionsniveau der Entwicklungsplattform lässt sich die Konfiguration effizienter durchführen. Aus den Simulationsmodellen des Baukastens und dem Metamodell aus der Entwicklungsplattform wird daraufhin ein lauffähiges Maschinenmodell zur HiLS generiert.

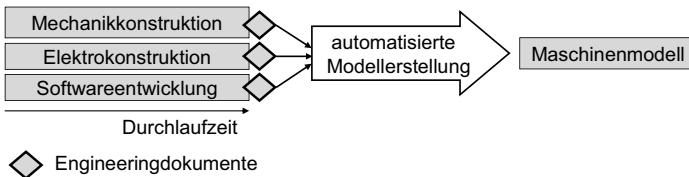
Bergert und Kiefer /86/ stellen einen Ansatz zur automatisierten Konfiguration vor, der auf eine ausgeprägte unternehmensinterne Standardisierung aufgebaut ist. Die Bibliothek besteht aus unternehmensspezifischen Bausteinen, wie sie in Bild 3-5 gezeigt sind. Die Bausteine besitzen die vom Unternehmen standardisierten Signalnamen und Schnittstellen. Ihre Kombinationsmöglichkeiten sind durch unternehmensspezifische Regeln festgelegt. Darauf basierend kann das Maschinenmodell automatisiert anhand einer Modulliste und einer fabrikspezifischen Parameterliste konfiguriert werden.

Einen allgemein für Automatisierungssysteme geltenden Ansatz stellen Ryssel et al. /87/ vor. Sie generieren sowohl Varianten für die Bausteine des Baukastens als auch Maschinenmodelle im Sinne des Generative Programming. Übersetzt in die Begrifflichkeit dieser Arbeit wird für die automatisierte Konfiguration ein Metamodell benötigt, das eine Modulliste, eine Schnittstellenliste und eine Parameterliste umfasst.

Wagner /88/ untersucht einen Fall, in dem die Schnittstellen technische Abhängigkeiten von den gewählten Bausteinen oder deren Parametrierung aufweisen. Dann müssen die Bausteine auf die Ausprägungen angepasst werden. Dazu stellt Wagner ein agentenorientiertes Unterstützungskonzept vor, das die Abhängigkeiten erkennt und die Bausteine gegebenenfalls anpasst.

### 3.3 Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Modellerstellung

Bei der als letztes vorgestellten Modellierungsmethode handelt es sich um eine automatisierte Erstellung des Maschinenmodells. Die Grundlage einer automatisierten Modellerstellung sind nicht die Bausteine aus einem Baukasten, sondern die Engineeringdokumente aus dem Engineeringprozess (Bild 3-7). Das Maschinenmodell wird automatisch und aufwandsarm nach Fertigstellung der relevanten Engineeringdokumente generiert. Die verwendeten Engineeringdokumente gehen standardmäßig als Ergebnisse aus den Konstruktionen der einzelnen Disziplinen hervor. Es wird demzufolge kein zusätzlich erstelltes Informationsmodell oder Metamodell benötigt.



**Bild 3-7:** Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Modellerstellung

#### Ansätze im Umfeld der automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells

Bei der automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells zur HiLS werden die disziplinspezifischen Engineeringdokumente eingelesen, analysiert und die gewonnenen Informationen zu einem interdisziplinären Maschinenmodell verknüpft. Dieses Vorgehen ist von einem Vorgehen zu unterscheiden, welches ebenfalls Engineeringdokumente einliest, aber daraus ein disziplinspezifisches Engineeringdokument, wie z. B. das Steuerungsprogramm, automatisch erstellt.

Maurmaier et al /89/ generieren automatisch Schaltpläne und Quellcode für Automatisierungssysteme aus Matlab/Simulink-Modellen. Das vorgestellte, allgemeingültige Konzept, ein Quellmodell in ein Zielmodell zu transformieren, ist jedoch auch für die automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen relevant. Maurmaier et al. unterteilen die Schritte zur Modelltransformation in strukturaufbauende, selektierende, konfigurierende und übersetzende Transformationsvorschriften.

Juhász und Schmucker /90/ beschäftigen sich mit der Anreicherung von 3D-CAD-Modellen zu Modellen für die Mehrkörpersimulation.

Barbieri et al. /91/ untersuchen zur Erstellung virtueller Welten die Generierung der kinematischen Ketten aus 3D-CAD-Modellen. In ihrem Ansatz muss die Kinematik der Maschine bereits während der Mechanikkonstruktion in dem 3D-CAD-Modell definiert werden.

Des Weiteren werden Forschungsarbeiten zur automatisierten Modellerstellung unternommen, bei denen das resultierende Modell allerdings nicht dem Maschinenmodell einer Montagemaschine entspricht.

Im Projekt Fluidtronic /92/ wird ein Maschinenmodell aus einem Schaltplan mit elektronischen, hydraulischen und pneumatischen Komponenten erstellt /93/. Das resultierende Modell bildet die Grundlage zur HiLS eines fluidtechnisch-mechatronischen Systems. Den Fokus der Simulation bilden Effekte wie Reibung, Ölalterung, Verschleiß sowie Schmutzbelastung in fluidtechnischen Systemen /94/. Bei der Modellerstellung handelt es sich um eine Kopplung zwischen dem disziplinspezifischen Werkzeug zur Schaltplanerstellung und dem Simulationstool.

Selke /95/ zielt ebenfalls auf eine automatische Simulationsmodellgenerierung ab. Seine Arbeit liegt allerdings in einem anderen Bereich. Sie beschäftigt sich mit der Schaffung von Verbindungen zu betrieblichen Informationssystemen, um automatisiert ein Simulationsmodell zur Produktionsplanung und -steuerung zu generieren.

### **Ansatz zur automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells**

Die automatisierte Erstellung eines Maschinenmodells zur HiLS aus Engineeringdokumenten wird von Schob et al. verfolgt /96/, /97/, /98/. Der Ansatz von Schob et al. ist auf Sondermaschinen zugeschnitten. Deshalb soll er im Folgenden näher erläutert werden.

Die in dieser Arbeit betrachtete automatisierte Modellerstellung ist für Schob et al. eine Instanz einer allgemeinen „Modell-zu-Modell-Transformation“ unter Verwendung von Metamodellen /96/. Zur Transformation zwischen einzelnen Modellen und deren Metamodellen werden Adapter eingesetzt. Bei der betrachteten Instanz werden die Engineeringdokumente zur Modellerstellung und das Maschinenmodell über Adapter angebunden /51/.

Grundsätzlich wird bei Schob et al. sowohl das Maschinenmodell als auch das geometrische Modell generiert. Das geometrische Modell wird als zweiteilig, bestehend aus einer

Visualisierung und einem kinematischen Modell, verstanden /97/. Zur Simulation des Maschinenfunktionsablaufs benötigt das kinematische Modell die kinematischen Ketten. Diese werden aus dem 3D-CAD-Modell gewonnen. Dazu werden Algorithmen eingesetzt, die die Freiheitsgrade der einzelnen geometrischen Objekte heranziehen /97/.

Für das Maschinenmodell wird die Beschreibungssprache Modelica /74/ und deren Bibliotheken verwendet. Automatisiert erstellt werden die Verhaltensmodelle für Bauteile. Baueinheiten, d. h. die Realisierung komplexer Funktionen, werden in den Arbeiten von Schob et al. nicht erwähnt. Daher wird angenommen, dass diese in den betrachteten Maschinen nicht vorzufinden sind. Das Verhalten der Bauteile der Maschine wird aus dem Stromlauf- und aus dem Fluidplan gewonnen. Beide Pläne werden im selben Werkzeug Eplan erstellt. Über eine Programmierschnittstelle werden die verbauten Bauteile, deren Verkabelung und die ihnen zugewiesenen Eingangs- bzw. Ausgangsklemmen extrahiert. Bei der Extraktion werden einzelne, vorher zu definierende Teilelemente eines Bauteils registriert. Diese müssen erst gruppiert werden, um zu identifizieren, um welches Bauteil es sich handelt /96/.

Die Informationen aus den Engineeringdokumenten sind nach Schob et al. lückenhaft. Die Zusammenhänge zwischen den Bauteilen in den Schaltplänen, die eine Aktor-Sensor-Beziehung aufweisen, können oftmals nicht einander zugeordnet werden. Dann müssen diese Informationen manuell eingegeben werden /97/. Ein Beispiel ist die, nicht in Schaltplänen dokumentierte, Wirkung eines Ventils auf die Endschalter eines Zylinders. Die Verbindung zwischen dem geometrischen Modell und dem Maschinenmodell muss ebenfalls manuell erfolgen, da die Assoziation zwischen einem Objekt im Schaltplan und einem geometrischen Objekt im 3D-CAD-Modell nicht dokumentiert ist.

Des Weiteren muss der Aufbau der Maschine anhand einer Auflistung von Modulen als zusätzliches Dokument vorgegeben werden. Den Modulen können manuell Parameter zugeordnet werden /98/. Der geplante Aufbau dient zur Modellerstellung und als Vorlage zur automatisierten Konsistenzprüfung gegenüber der Richtigkeit der aus den Engineeringdokumenten extrahierten Informationen.

### 3.4 Defizite der Ansätze zur aufwandsreduzierten Modellerstellung

#### 3.4.1 Bewertungskriterien

Um die geeignete Modellierungsmethode zur Reduktion des Aufwands zu identifizieren, müssen zuerst die Bewertungskriterien festgelegt werden.

Die Bewertungskriterien ergeben sich erstens aus den zwingenden Anforderungen des bestehenden Engineeringprozesses. Zweitens sind die Rahmenbedingungen, die sich auf den Bau von Montagemaschinen beziehen, zu berücksichtigen. Als letztes betreffen die Bewertungskriterien die Modellierungsmöglichkeiten für das resultierende Maschinenmodell. Diese sollten möglichst umfangreich sein. Bild 3-8 gibt eine Übersicht über die Bewertungskriterien für eine Modellierungsmethode.

Durch die Bewertungskriterien wird der in dieser Arbeit betrachtete Fall definiert. Die Bewertungskriterien können bei der Prüfung eines anderen Falls, z. B. bei der Neuaufstellung eines Engineeringprozesses oder bei der Produktion von Serienmaschinen, stark unterschiedlich ausfallen. Jede Modellierungsmethode ist geeignet, den Aufwand zur Modellerstellung in einem bestimmten Fall zu reduzieren.

A Anforderung aus dem Engineeringprozess
A1 Keine Änderung des Engineeringprozesses
A2 Keine zusätzliche Dokumentation
R Rahmenbedingungen bei Montagemaschinen
R1 Primär Neukonstruktionen
R2 Baueinheiten oft von einem Lieferanten
M Modellierungsmöglichkeiten
M1 Vollständigkeit im Abbild der Maschine

Bild 3-8: Übersicht der Bewertungskriterien für eine Modellierungsmethode

A: Anforderungen, die ihren Ursprung im bestehenden Engineeringprozess haben:

- A1: Die Anforderung besteht darin, dass der Engineeringprozess nicht aufgrund der HiLS verändert werden soll. Die Umstellung des Engineeringprozesses, z. B. nach dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206, ist ein tief greifender und langfristiger Eingriff. Dieser ist nur unter Einbeziehung aller Aspekte des Engineeringprozesses zu verändern. Wenn allerdings die HiLS einmal erfolgreich eingeführt wurde, und die Verantwortlichen nicht mehr auf ihren Nutzen verzichten möchten, wird die Erstellung des Maschinenmodells bei einer Neugestaltung des Engineeringprozesses eine wichtige Rolle einnehmen.
- A2: Da keine weiteren Dokumentationsaufgaben den bestehenden Engineeringprozess belasten sollen, stehen nur die im Engineeringprozess bereits fest vorgesehenen Engineeringdokumente zur Verfügung. Es soll auch möglichst keine weitere Bearbeitung der Dokumente nötig sein. Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Bereitstellung der Informationen zur Erstellung des Maschinenmodells einfach sein soll.

R: Rahmenbedingungen, die sich auf den Bau von Montagemaschinen beziehen:

- R1: Montagemaschinen weisen durch ihre produktspezifische Anfertigung eine hohe Varianz an unterschiedlichen Lösungen auf. Primär handelt es sich um Neukonstruktionen, die einzeln oder in geringer Stückzahl gefertigt werden.
- R2: Die meisten Bauteile werden vielfach eingesetzt und beruhen auf einem bekannten Standardverhalten. Dagegen werden Baueinheiten oftmals nur einmalig verbaut und als Komplettlösung eingekauft. Bei eingekauften Baueinheiten liegt das Know-how, insbesondere bezüglich deren Verhalten, auf Seiten der Zulieferer.

M: Möglichkeiten zur Modellierung des Maschinenmodells:

- M1: Die HiLS soll ohne Einbindung realer Maschinenkomponenten durchgeführt werden. Daher muss, wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, jede Komponente im Ausgangsabbild der virtuellen Maschine auf dieselbe Weise präsent sein wie im Ausgangsabbild der realen Maschine. Die Modellierungsmethode muss die Möglichkeit bieten, das Maschinenmodell vollständig zu erstellen.

Die Bewertungskriterien richten sich auf die Erstellung des Maschinenmodells. Die Erstellung des geometrischen Modells wird nicht in Bezug auf ihre aufwandsarme Erstellung geprüft, da angenommen wird, dass dessen automatisierte Ausleitung in Kürze von Werkzeugen aus der Mechanik übernommen wird /90/, /91/. Während der Mechanik-konstruktion werden dann die kinematischen Beziehungen zwischen den geometrischen Objekten der Maschine im CAD-Modell definiert, um sie für weitere Schritte im Engineeringprozess, insbesondere zur Maschinensimulation, bereitzustellen.

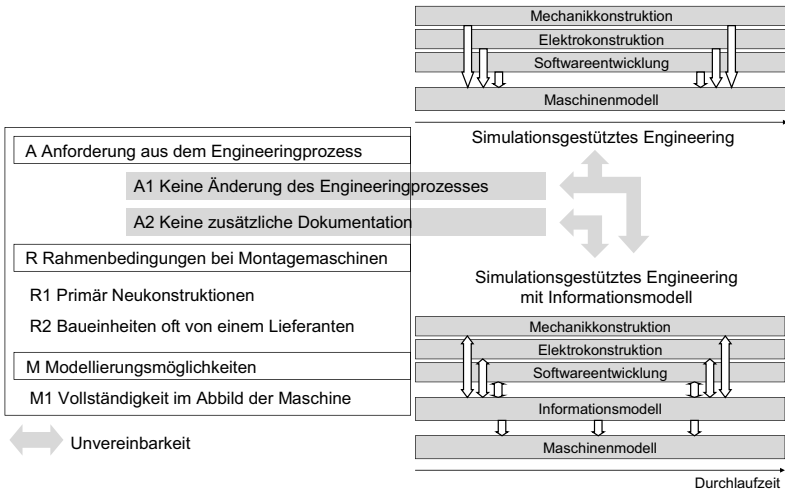
### **3.4.2 Defizite**

Im Folgenden werden die Modellierungsmethoden anhand der Bewertungskriterien auf ihre Eignung zur aufwandsarmen Erstellung von Maschinenmodellen geprüft.

#### **Erstellung des Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering**

Zuerst werden die Anforderungen aus dem bestehenden Engineeringprozess herangezogen. Die Anforderung A1 lässt sich nicht mit der Erstellung des Maschinenmodells bei einem simulationsgestützten Engineeringprozess vereinbaren. Da die Modellbildung konstruktionsbegleitend und in den Engineeringprozess integriert durchgeführt wird, bringt dieser Lösungsansatz eine Änderung des Engineeringprozesses mit sich. Daher muss die Modellierungsmethode des simulationsunterstützten Engineerings ausgeschlossen werden (Bild 3-9).

Die Erstellung eines Maschinenmodells bei simulationsgestütztem Engineering mit Aufbau eines Informationsmodells ist des Weiteren aufgrund der Anforderung A2 nicht geeignet. Anforderung A2 besagt, dass keine zusätzliche Dokumentation erforderlich sein soll. Dies widerspricht der Erstellung eines Informationsmodells.

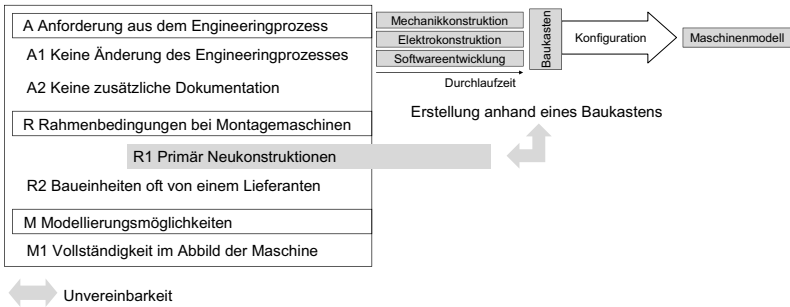


**Bild 3-9:** Ausschluss des simulationsgestützten Engineerings

### Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten

Die Rahmenbedingung R1 besagt, dass Montagemaschinen im betrachteten Fall primär Neukonstruktionen darstellen. Dies spricht gegen die Modellierungsmethode, das Maschinenmodell aus einem Baukasten zu erstellen (Bild 3-10). Die jeweils neuen Konstruktionslösungen lassen keine hohe Wiederverwendung von Simulationsmodellen aus dem Baukasten zu. Es handelt sich hier nicht um eine variantenreiche Serienfertigung, die sich aus der Parametrierung von Bausteinen speisen lässt. Zwar werden Bauteile standardmäßig verbaut und Baueinheiten als Komplettlösung eingesetzt, aber diese setzen sich zu keinen Bausteinen zusammen, die baugleich oder in ähnlicher Form wieder verwendet werden. Da sich aber die Aufwandsreduzierung aus einer hohen Wiederverwendung der Simulationsmodelle aus dem Baukasten ergibt, ist diese Methode für Montagemaschinen nicht geeignet.





**Bild 3-10:** Ausschluss der Erstellung eines Maschinenmodells aus einem Baukasten

### Erstellung des Maschinenmodells durch automatisierte Modellerstellung

Die Modellierungsmethode, das Maschinenmodell automatisiert zu erstellen, erfüllt die herangezogenen Bewertungskriterien. Die Modellerstellung verlangt weder eine Änderung des Engineeringprozesses (A1) noch die Erstellung eines zusätzlichen Dokuments (A2). Der Rahmenbedingung, dass die betrachteten Maschinen primär Neukonstruktionen sind (R1), trägt sie ebenfalls Rechnung. Durch eine Verarbeitung der Informationen aus den Engineeringdokumenten wird durch diese Modellierungsmethode ein individuelles Maschinenmodell erstellt. Inwieweit die Konstruktionslösungen voneinander abweichen, spielt durch die individuelle Generierung eines Maschinenmodells für jede Maschine keine Rolle.

Die Schwierigkeiten bei der automatisierten Modellerstellung rühren aus der Abhängigkeit von der Dokumentation über die Maschine. Da bei der Modellierungsmethode allein auf dokumentierte Informationen zurückgegriffen wird, besteht die Gefahr, dass die benötigten Informationen nicht vorhanden sind. Dies ist unter der Rahmenbedingung R2 der Fall. Wenn eine Baueinheit vom Lieferanten bezogen wird, ist das Verhalten innerhalb der Baueinheit zumeist unbekannt. Die Anbindung an die Steuerung und die Integration in die Montagemaschine sind in Handbüchern dokumentiert. Aus Handbüchern ist es aber meistens nicht möglich, automatisiert ausgewählte Informationen zu extrahieren. Daher schränkt die Rahmenbedingung R2 das Konzept zur automatisierten Modellerstellung ein (Bild 3-11).

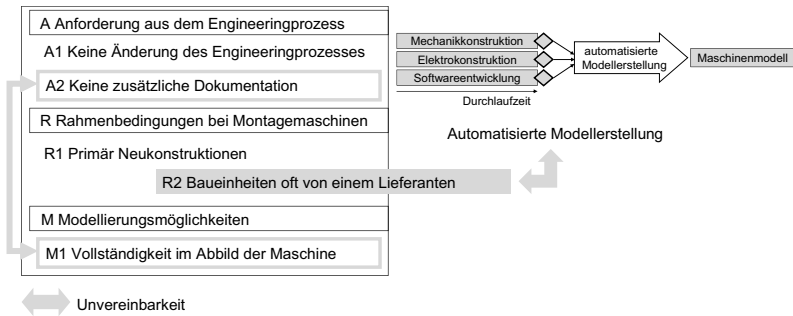


Bild 3-11: Herausforderung der automatisierten Modellerstellung

Abgesehen von den Baueinheiten kann es weitere Einschränkungen durch die Abhängigkeit von der Dokumentation über die Maschine geben. Die Herausforderung der automatisierten Modellerstellung liegt darin, auftretende Dokumentationslücken auf Basis der vorhandenen Informationen zu schließen. Wenn die benötigten Informationen nicht erschlossen werden können, kann entweder ein zusätzliches Dokument erstellt oder auf eine manuelle Eingabe zurückgegriffen werden. Ersteres widerspricht der Anforderung A2 und Letzteres der Vollständigkeit des Abbildes der Maschine M1. Diese Herausforderung ist links in [Bild 3-11](#) durch eine wechselseitige Pfeilverbindung illustriert.

Trotz der Schwierigkeit alle benötigten Informationen bereitzustellen, ist die automatisierte Modellerstellung die am besten geeignete Modellierungsmethode, da sie die Anforderungen A1 und A2 und die Rahmenbedingung R1 erfüllt.

### 3.5 Ziel der Arbeit und Handlungsbedarf

Im Fokus steht die aufwandsarme Erstellung von Maschinenmodellen unter Beibehaltung des bestehenden Engineeringprozesses, ohne Anfertigung einer zusätzlichen Dokumentation und unter besonderer Beachtung der geringen Wiederverwendbarkeit von Modulen im Sondermaschinenbau. Es wird daher angestrebt, das Maschinenmodell zur Simulation am Ende des Engineeringprozesses automatisiert aus den vorhandenen Engineeringdokumenten zu erstellen.

Bei der automatisierten Modellerstellung soll das Maschinenmodell für die HiLS vollständig erstellt werden. Es muss auf Basis einer Anforderungsanalyse ein ganzheitlicher

Ansatz erarbeitet werden. Ziel ist es, dass die virtuelle Maschine aus Sicht der Steuerung tatsächlich das Pendant zur realen Maschine ist. Dementsprechend spielt die Modellierung der Schnittstelle und die Strukturierung der Maschine zur vollständigen Erfassung aller Module und Komponenten der Maschine eine große Rolle. Darauf aufbauend soll durch die Einbeziehung möglichst vieler Engineeringdokumente eine breite Informationsbasis geschaffen werden, anhand derer das Verhalten der Komponenten weitestgehend modelliert werden kann.

### **Handlungsbedarf bei der automatisierten Modellerstellung**

Um aufzuzeigen, wie groß die Abdeckung zwischen einem automatisiert erstellten Maschinenmodell und einem vollständigen Maschinenmodell ist, werden Anforderungen an das Maschinenmodell benötigt. Es wurde bisher in keiner wissenschaftlichen Arbeit systematisch und umfassend erarbeitet, welche Anforderungen für ein, zur HiLS lauffähiges, Maschinenmodell erfüllt sein müssen. Durch die Anforderungen muss auch beantwortet werden, wie die Schnittstelle zwischen der Steuerung und der virtuellen Maschine im Maschinenmodell zu modellieren ist.

Des Weiteren muss festgelegt werden, wie der Aufbau eines Maschinenmodells zu strukturieren ist. Die Struktur der Maschine soll durch eine automatisierte Modellerstellung im Maschinenmodell aufgebaut werden. Hierfür wurde bisher noch keine Methode erarbeitet.

Die Verhaltensmodellierung umfasst die Modellierung von Bauteilen und von Baueinheiten. Für die Modellierung von Baueinheiten ist zu berücksichtigen, dass sie eventuell von einem Lieferanten bezogen werden.

Für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Bauteile wurde von Schob et al. /96/, /97/, /98/ ein Verfahren entwickelt (Kapitel 3.3). Die Informationen zur Erstellung der Verhaltensmodelle der Bauteile speisen sich aus dem Stromlauf- und Fluidplan. Das 3D-CAD-Modell wird zur Erstellung des geometrischen Modells herangezogen, welches in dieser Arbeit nicht betrachtet wird. Durch die begrenzte Auswahl an Dokumenten oder auch durch die begrenzte Erstellung von Dokumenten in dem von Schob et al. betrachteten Engineeringprozess ist die zur Verfügung stehende Information über die Maschine beschränkt. Auf Basis der verwendeten Schaltpläne können nach Schob et al. oftmals keine Zusammenhänge zwischen Aktoren und Sensoren automatisiert modelliert werden. Es besteht somit ein Handlungsbedarf in Bezug auf die Schaf-

fung einer breiteren Informationsbasis zur vollständigen Modellierung des Verhaltens von Bauteilen, insbesondere bei der Modellierung von einfachen Zusammenhängen zwischen Aktoren und Sensoren.

### **3.6 Zusammenfassung des Stands der Forschung und Technik**

Die Problemstellung dieser Arbeit zeigte auf, dass der Aufwand für die konventionelle Modellerstellung zur HiLS im Verhältnis zum Nutzen oft noch zu groß ist. Im Stand der Forschung und Technik wurden daher Ansätze untersucht, die den Aufwand gegenüber einer konventionellen Modellerstellung reduzieren. Die Ansätze wissenschaftlicher Arbeiten wurden in drei Modellierungsmethoden unterteilt. Dies sind das simulationsgestützte und das baukastenbasierte Engineering sowie die automatisierte Modellerstellung.

Um eine geeignete Modellierungsmethode zu identifizieren, wurden Bewertungskriterien aufgestellt. Die Bewertungskriterien betreffen den vorliegenden Engineeringprozess, die Rahmenbedingungen aus dem Bau von Montagemaschinen und die Modellierungsmöglichkeiten einer Methode. Anhand der Bewertungskriterien ist zum einen gezeigt worden, dass die automatisierte Modellerstellung die geeignete Modellierungsmethode ist. Zum anderen wurde der Handlungsbedarf in Bezug auf das Ziel der Arbeit identifiziert.

## **4 Anforderungen an die automatisierte Erstellung eines Maschinenmodells und Lösungskonzept**

In Kapitel 4 werden die Anforderungen an ein Maschinenmodell analysiert (Kapitel 4.1) und festgelegt (Kapitel 4.2). Aufbauend auf den Anforderungen wird in Kapitel 4.3 das Lösungskonzept zur automatisierten Modellerstellung erarbeitet.

### **4.1 Anforderungsanalyse**

In Kapitel 4.1.1 wird durch eine Analyse ermittelt, was für die Vollständigkeit eines Maschinenmodells zur HiLS vorausgesetzt wird. Die Vollständigkeit muss gegeben sein. Die Modellierungstiefe, welche in Kapitel 4.1.2 eingeführt wird, ist wählbar. Sie beeinflusst die Anwendungsmöglichkeiten der Simulation. Die Analyse bildet die Basis zur Formulierung der Anforderungen an ein automatisch erstelltes Maschinenmodell in Kapitel 4.2.

#### **4.1.1 Vollständigkeit eines Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation**

Wenn die Vollständigkeit eines Maschinenmodells gegeben ist, ist die Simulation ohne Einbindung realer Maschinenkomponenten lauffähig. Die Lauffähigkeit der Simulation bezieht die Fähigkeit zur logisch richtigen Berechnung der Maschinenzustände mit ein, da die Steuerung bei logisch falsch belegten Ausgängen den Ablauf des Steuerungsprogramms stoppt.

Das Maschinenmodell ist dann vollständig, wenn es aus Sicht der Steuerung nicht von der realen Maschine zu unterscheiden ist. Um zu erkennen, wie dies im Maschinenmodell zu gewährleisten ist, wird die Schnittstelle zwischen der Steuerung und der Maschine analysiert.

Die Schnittstelle wird bei dem Engineering der Montagemaschine konfiguriert. Die Konfiguration beinhaltet die Auslegung des Eingangs- und des Ausgangsabbildes der Maschine (Kapitel 2.2.2). Die Abbilder geben durch Zuweisung von Adressen die Struktur vor, in der die Eingänge und Ausgänge zwischen der Steuerung und der Maschine übertragen werden.

Die Abbilder stellen somit aus informationstechnischer Sicht die Schnittstelle dar, die die Austauschbarkeit der virtuellen mit der realen Maschine gewährleistet. Jede Komponente muss im Ausgangsabbild der virtuellen Maschine auf dieselbe Weise präsent sein wie im Ausgangsabbild der realen Maschine. Daher ist es das Eingangs- bzw. das Ausgangsabbild, das vollständig interpretiert bzw. generiert werden muss. Die folgenden Abschnitte zeigen auf, wie ein Maschinenmodell modelliert sein muss, um dies zu gewährleisten.

Dazu gehört einerseits, dass die gesamte Adressbreite des Eingangs- und des Ausgangsabbildes der Maschine modelliert wird (4.1.1.1). Andererseits muss innerhalb der Verhaltensmodelle das Eingangsabbild korrekt gelesen, die Maschinenzustände logisch richtig berechnet und das Ausgangsabbild korrekt geschrieben werden. Die Modellierung ist nicht für jede Komponente gleich. Es bestehen Unterschiede in deren Ein- und Ausgangsabbildern. Der Unterschied spiegelt sich darin wider, ob eine Komponente durch eine Baueinheit realisiert wird oder aus Bauteilen zusammengesetzt ist. Daher wird die Modellierung von Baueinheiten (4.1.1.2) und von Bauteilen (4.1.1.3) separat betrachtet. Im Folgenden werden zur Erweiterung der Definition von Baueinheiten und Bauteilen aus Kapitel 2.1.1.1 deren unterschiedliche Ein- und Ausgangsabbilder beschrieben:

- Komposition der Komponente aus einer Baueinheit

Das Ein- und Ausgangsabbild der Komponente entspricht einem Protokoll, das durch die Baueinheit festgelegt ist. Es werden meist mehrere Ein- und Ausgänge zu einem Steuerbefehl im Eingangsabbild oder einer Statusmeldung im Ausgangsabbild kombiniert. Die Kombination wird nach einem vorgegebenen Aufbau anhand ebenfalls vorgegebener Parameter zusammengestellt. Die Vorgaben stammen aus der Protokolldefinition des Herstellers der Baueinheit. Eine Baueinheit belegt einen Adressraum in der Datenstruktur des Abbildes.

- Komposition der Komponente aus Bauteilen

Es handelt sich um eine Komponente, deren Abbild aus einem oder mehreren, beim Datenaustausch unabhängigen, binären oder analogen Ein- und Ausgängen besteht. Sie belegen in der Datenstruktur des Abbildes eine oder mehrere Adressen. Ein Beispiel hierfür ist ein Vereinzler am Förderband. Er wird durch eine Bauteilkombination von einem Ventil, einem Zylinder und zwei Endschaltern realisiert. Die Kombination besitzt zwei Eingänge zur Ansteuerung des Ventils. Das Ventil leitet die Bewegung des Zylinders ein und daraufhin wird in einer der beiden Endlagen der End-

schalter betätigt. Sowohl das Ventil als auch die Endschalter sind als binärer Eingang bzw. Ausgang im Eingangs- bzw. Ausgangsabbild an einer Adresse zu finden.

#### 4.1.1.1 Erfassen der gesamten Maschine

Durch das Maschinenmodell muss die gesamte Adressbreite des Eingangsabbildes interpretiert und des Ausgangsabbildes generiert werden. Die Adressen des Eingangs- und des Ausgangsabbildes sind in der Konfiguration der Schnittstelle dokumentiert. Die physische Verbindung zwischen der Steuerung und der Maschine wird zumeist durch einen Feldbus realisiert. Dann wird das entsprechende Dokument als Buskonfiguration bezeichnet. Wenn ein Feldbus das gesamte Abbild der Maschine überträgt, wird zur Dokumentation der Konfiguration der Schnittstelle allein die Buskonfiguration benötigt.

Die Buskonfiguration beinhaltet die Adressen des Eingangs- und des Ausgangsabbildes der Maschine gegliedert nach den Knoten. Ein Knoten ist eine am Bus angeschlossene steuerungstechnische Einheit. An einen Knoten werden Bauteile über binäre oder analoge Ein- und Ausgänge an ein steuerungstechnisches Gerät angebunden. Baueinheiten werden je nachdem, mit welcher technischen Schnittstelle sie ausgestattet sind, über ein geeignetes steuerungstechnisches Gerät oder direkt über den Feldbus an die Steuerung angeschlossen (Bild 4-1).

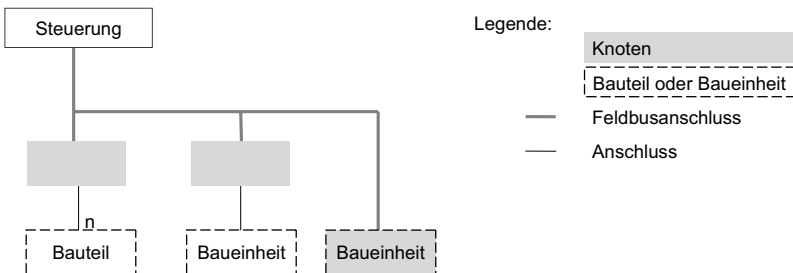
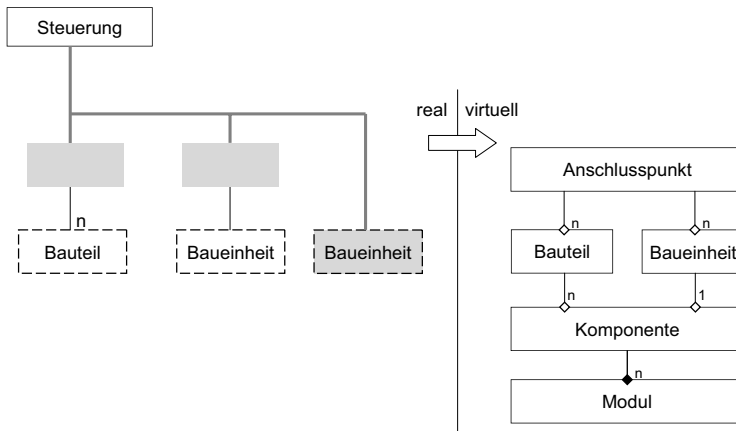


Bild 4-1: Knoten einer realen Montagemaschine

Wie in Bild 4-2 dargestellt, müssen alle an einen Knoten und somit an der Steuerung angeschlossenen Bauteile und Baueinheiten im Maschinenmodell abgebildet werden.

Die steuerungstechnischen Geräte an den Knoten müssen nicht im Maschinenmodell abgebildet werden, da deren Simulation von konfigurierbaren Hardwarekomponenten der virtuellen Maschine übernommen wird.

Anschlusspunkte bilden die Anbindung des Maschinenmodells zu den simulierten Knoten. Im Maschinenmodell ist für jeden Eingang bzw. Ausgang ein Anschlusspunkt zu setzen. Die Ein- und Ausgänge müssen mit den zugehörigen Bauteilen und Baueinheiten verbunden werden.



**Bild 4-2:** Abbildung der realen Maschine im Maschinenmodell

Auf der Grundlage der im Maschinenmodell abgebildeten Bauteile und Baueinheiten werden die Komponenten der Maschine erstellt. Die Komponenten werden wiederum zu Modulen zusammengefasst. Sowohl Komponenten als auch Module werden aufgrund eines funktionalen Zusammenhangs gebildet (Kapitel 2.1.1.1 und 2.1.1.2). Es ergibt sich die in Bild 4-2 dargestellte hierarchische Struktur der Maschine. Die hierarchische Struktur der Maschine wird in dem Modell der Struktur der Maschine abgebildet.

Eine Strukturierung ist keine zwingende Voraussetzung zur Vollständigkeit eines Maschinenmodells. Dennoch schafft sie einen Überblick über die Maschine und fördert eine vollständige Modellierung. Zudem wird durch die Bildung von Komponenten deutlich, welche Ein- und Ausgänge Wirkzusammenhänge aufweisen. Wenn Bauteile in einer Komponente keine geschlossene Wirkkette bilden, müssen weitere Bauteile modelliert



werden. Diese weiteren Bauteile müssen nicht direkt mit der Steuerung kommunizieren. Sie müssen abgebildet werden, weil nur durch den von ihnen eingebrachten Wirkzusammenhang die Wirkkette geschlossen wird.

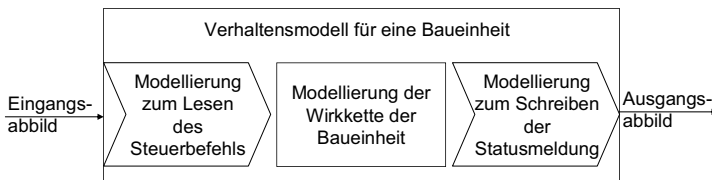
Bei einer Bauteilkombination von z. B. einem Ventil, einem Zylinder und zwei Endschaltern stehen sowohl das Ventil als auch die Endschalter in direkter Verbindung mit der Steuerung. Das Verhalten des Zylinders muss ebenfalls abgebildet werden, da er den Wirkzusammenhang zwischen den Eingängen des Ventils und den Ausgängen der Endschalter schließt.

### **Geeignete Modellierungsmittel**

Als Modellierungsmittel eignet sich ein Blockschaltbild. Durch ein Blockschaltbild, das das Konzept der Hierarchisierung inkludiert, können die Komponenten als Bestandteile der Module dargestellt werden. Zudem können die Anschlusspunkte durch Signalverbindungen an die Bauteile und Baueinheiten angebunden werden.

#### **4.1.1.2 Modellierung von Baueinheiten**

Neben der gesamten Adressbreite der Ein- und Ausgangsabbilder muss zur Vollständigkeit eines Maschinenmodells das Verhalten in den einzelnen Komponenten logisch richtig modelliert werden. Die Modellierung des Verhaltens teilt sich, wie in Kapitel 2.2.2 eingeführt, in die Modellierung der Wirkketten und in die Modellierung zum Lesen des Eingangs- und zum Schreiben des Ausgangsabbildes auf. In diesem Abschnitt werden Komponenten aus Baueinheiten betrachtet. Bild 4-3 zeigt den Aufbau eines Verhaltensmodells für eine Baueinheit.



**Bild 4-3:** Prinzipieller Aufbau eines Verhaltensmodells für eine Baueinheit

## **Modellierung des Kommunikationsverhaltens**

Die Modellierung zum Lesen des Eingangs- und zum Schreiben des Ausgangsabbildes muss dasselbe Kommunikationsverhalten garantieren wie die reale Baueinheit. Dies gilt sowohl für die Initialisierungsphase als auch für den regulären Betrieb unter unterschiedlichen Einstellungen, wie z. B. den Betriebsarten.

Die Modellierung gibt an, wie die mehreren Bytes langen Steuerbefehle und Statusmeldungen nach der Protokolldefinition des Herstellers der Baueinheit zu lesen und zu schreiben sind. Die für die Modellierung benötigte Protokolldefinition wird vom Lieferanten meistens in Form eines Handbuchs herausgegeben.

## **Modellierung der Wirkkette**

Die Wirkkette modelliert die von der Baueinheit eigenständig ausgeführte Funktion. Wie die Rahmenbedingung R2 des Kapitels 3.4.1 besagt, sind die Wirkketten häufig unbekannt, da es sich bei einer Baueinheit zumeist um eine Zuliefererkomponente handelt. Eine Modellierung der Wirkkette erfordert daher die Offenlegung des Verhaltens der Baueinheit durch den Hersteller oder eine aufwändige Identifikation des Verhaltens durch Tests. Alternativ und idealerweise liefert der Hersteller das Verhaltensmodell.

## **Geeignete Modellierungsmittel**

Als Modellierungsmittel empfehlen sich zum Lesen und Schreiben der Abbilder ein Programmcode oder ein Modellierungsmittel der Ablauflogik (Kapitel 2.2.2).

Durch den Programmcode werden in jedem Zyklus der Steuerung auf Basis der implementierten Regeln die Eingänge interpretiert und die Ausgänge der Baueinheit für die Steuerung generiert. Ein Modellierungsmittel der Ablauflogik eignet sich für sich wiederholende Kommunikationsschritte, da dieselben Zustände zyklisch durchlaufen werden können. Ein Blockschaltbild zeigt sich bei der Modellierung der Ein- und Ausgangsabbilder als unflexibel, da allein die starre Belegung der Adressen über Signale zur Verfügung steht.

Für die Modellierung der Wirkketten eignen sich Blockschaltbilder, da sie sowohl einfache logische Zusammenhänge als auch rechenintensivere physikalische Wirkketten modellieren können. Dies gilt ebenfalls für den Programmcode, da er flexibel gestaltet wer-

den kann. In einem Modellierungsmittel der Ablauflogik lässt sich ein Verhalten, das auf einer komplexen Abfolge beruht, sehr gut modellieren, während sich physikalische Wirkketten nur begrenzt abbilden lassen.

#### 4.1.1.3 Modellierung von Bauteilen

In diesem Abschnitt wird das Verhalten von Komponenten aus Bauteilen betrachtet. Das Verhalten einer Komponente aus Bauteilen gründet überwiegend auf den Wirkzusammenhängen zwischen den Bauteilen. Eine Komponente kann aber auch nur aus einem Bauteil bestehen. Bild 4-4 zeigt den prinzipiellen Aufbau für ein Verhaltensmodell für die Bauteile einer Komponente.

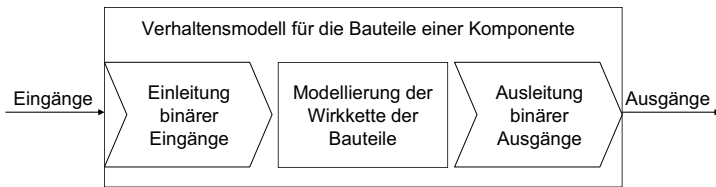


Bild 4-4: Prinzipieller Aufbau eines Verhaltensmodells für die Bauteile einer Komponente

#### Modellierung des Kommunikationsverhaltens

Die Kommunikation von Bauteilen mit der Steuerung beschränkt sich auf die Übertragung von binären oder analogen Signalen.

Binäre Signale sind Signale, die eine boolesche Variable übertragen. Sie belegen im Adressraum eines Feldbusses ein Bit. Die Modellierung des Kommunikationsverhaltens beinhaltet bei binären Signalen das Lesen und Schreiben einer der beiden Zustände „0“ oder „1“ an den zugehörigen Adressen der Ein- und Ausgänge. Die Anforderungen an die Abbildung eines solchen Kommunikationsverhaltens sind so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Es handelt sich nicht um eine eigenständige Modellierung des Kommunikationsverhaltens sondern um eine Weiterleitung der Ein- und Ausgänge.

Die Modellierung des Kommunikationsverhaltens ist für analoge Signale nicht vernachlässigbar. Bei einem analogen Signal wird in den meisten Fällen eine ganze Zahl oder

eine Fließkommazahl übertragen. Dies bedeutet, dass nur durch die Kombination von mehreren Bits der Ein- oder Ausgang des Bauteils gelesen oder geschrieben werden kann. Ein Bauteil, das über ein analoges Signal kommuniziert, belegt einen Adressraum am Feldbus.

Das Kommunikationsverhalten zieht umfassende Auswirkungen bei der Modellierung nach sich. Demzufolge wird an dieser Stelle festgelegt, dass Bauteile, die über einen analogen Ein- bzw. Ausgang mit der Steuerung kommunizieren, im Folgenden den Baueinheiten zugeordnet werden. Der Betrachtung aus Sicht der Modellierung wird folglich Priorität eingeräumt.

### **Modellierung der Wirkkette**

Die Modellierung der Wirkkette von Bauteilen kann einen unterschiedlichen Grad an Komplexität aufweisen. Der Grad der Komplexität definiert sich durch die der Komponente innewohnende Art und Anzahl an Wirkzusammenhängen.

Geringe Komplexität weist z. B. ein Drucksensor auf, der überprüft, ob ein Lagerplatz mit Werkstücken belegt ist. Wenn dies der Fall ist, ist der binäre Ausgang des Drucksensors „1“. Die Steuerung verarbeitet den Ausgang zusammen mit anderen Zuständen für die Freigabe des Produktionsstarts. Im Maschinenmodell besteht kein Wirkzusammenhang zu einem anderen Bauteil. Das Verhaltensmodell für den Drucksensor besteht dementsprechend nur aus der alternativen Belegung von „0“ oder „1“.

Demgegenüber sind z. B. die Abschaltkreise zur Gewähr von Sicherheitsbedingungen von hoher Komplexität. Eine große Anzahl von Bauteilen prüft an unterschiedlichen Stellen den Zustand der Montagemaschine ab und bündelt diese durch elektrische Verschaltung zu wenigen Ausgängen. Dies führt zu einer komplexen logischen Wirkkette.

Eine vollständige Modellierung, die die Maschinenzustände logisch richtig berechnet, verlangt die Abbildung der Wirkzusammenhänge unabhängig davon, von welcher Komplexität sie sind.

## **Geeignete Modellierungsmittel**

Die Modellierung des Lesens und Schreibens von Ein- und Ausgängen beschränkt sich auf deren Ein- und Ausleitung. Diese können in einem Blockschaltbild modelliert werden, in dem die Anschlusspunkte mit den Bauteilen über Zweipunkt-Signallinien verbunden werden.

Zur Modellierung von Bauteilen ist ein Blockschaltbild ebenfalls geeignet, da es sowohl logische als auch physikalische Wirkketten übersichtlich darstellt.

### **4.1.2 Modellierung in unterschiedlicher Detaillierung**

Die Vollständigkeit der Modellierung wird gefordert, um eine lauffähige Simulation zu garantieren. Dagegen ist die Detaillierung der Modellierung des Verhaltens der Baueinheiten und Bauteile wählbar. Ziel dieses Kapitels ist es, zu verdeutlichen, welche Wahlmöglichkeiten für die Detaillierung bestehen. Die Detaillierung von Modellierungen wurde bereits in Kufner et al. /99/ veröffentlicht.

#### **4.1.2.1 Bedeutung der Detaillierung für die Modellierung**

Die Detaillierung eines Maschinenmodells zur HiLS ist nicht einhergehend mit der Reife der Entwicklung der Montagemaschine, wie dies beim simulationsgestützten Engineering der Fall ist. Die Konstruktion der Montagemaschine ist zum Zeitpunkt der Erstellung des Maschinenmodells nahezu beendet. Die Schnittstelle zur Steuerung muss in jedem Fall im Maschinenmodell in Form der Modellierung des Eingangs- und Ausgangsabbilds exakt und somit in höchster Detaillierung nachgebildet werden. Es geht daher allein um die Detaillierung der Wirkketten in den Verhaltensmodellen im Hinblick auf deren reales Pendant.

#### **Wahl der Detaillierung im Hinblick auf die Anwendung**

Bei einer manuellen Modellierung gilt die Regel, dass der Aufwand zur Erstellung umso höher liegt, je detaillierter ein Modell ist. Indes sind die Anwendungsmöglichkeiten bei einer detaillierten Modellierung vielfältiger (Bild 4-5).

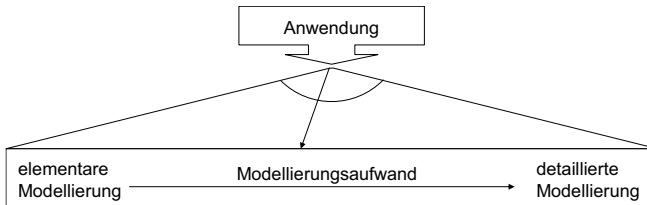


Bild 4-5: Wahl der Detaillierung anhand der Anwendung

Wird demzufolge eine elementare Modellierung vorgenommen, ist der Aufwand gering und der Nutzen auf wenige Anwendungsmöglichkeiten beschränkt. Werden die Verhaltensmodelle detailliert modelliert, steigt der Aufwand, aber auch der Nutzen, da weitere Anwendungen der Simulation möglich sind. Demzufolge wird das beste Nutzen/Aufwand-Verhältnis erzielt, wenn die Detaillierung des Maschinenmodells gerade für die Anwendung der Simulation ausreicht. Um die Detaillierung möglichst genau den Anforderungen aus der Anwendung anzupassen, muss nicht die gesamte Maschine, d. h. alle Baueinheiten und Bauteile, in der gleichen Detaillierung abgebildet werden. Vielmehr sind, je nach Bedarf, Komponenten der Maschine in unterschiedlicher Detaillierung zu modellieren. Es ist jedoch darauf zu achten, dass durch die unterschiedlichen Detaillierungen von Komponenten keine unerwünschten Wechselwirkungen auftreten.

### **Forderung nach abgrenzbaren Detaillierungsgraden**

Um bei einer gegebenen Anwendung die richtige Detaillierung in der Spannweite zwischen einer elementaren und einer detaillierten Modellierung auszuwählen, müssen abgrenzbare Detaillierungsgrade zur Verfügung stehen. Diese dienen nicht nur zur Auswahl der Detaillierung des Maschinenmodells, sondern auch zur Kommunikation zwischen den Beteiligten. Daher wird nach einer Definition von Detaillierungsgraden für ein Maschinenmodell zur HiLS verlangt.

Dierßen /19/ differenziert allein zwischen einem logischen und einem physikalischen Simulationsmodell, die als Signalsimulation und als mechatronische Simulation bezeichnet werden.

Die VDI-Richtlinie 2206 spricht bezüglich der erforderlichen Güte eines Modells von einer Modellierungstiefe. Diese variiert je nach Anwendung im Hinblick auf die Berücksichtigung physikalischer Effekte /13/. Die Modellierungstiefen entsprechen den gesuch-

ten Detaillierungsgraden. Sie werden aber von der VDI-Richtlinie 2206 nicht differenzierter betrachtet und somit werden auch keine Tiefestufen gebildet.

Stattdessen werden Modelle anhand ihres Abstraktionsgrades kategorisiert /13/. Die Abstraktionsgrade sind auf eine unterschiedliche Darstellungsform eines Modells ausgerichtet. In Reihenfolge ansteigender Abstraktion lauten sie folgendermaßen:

- topologisches Modell,
- physikalisches Modell,
- mathematisches Modell,
- numerisches Modell.

Ein Modell in einer bestimmten Modellierungstiefe kann in den unterschiedlichen Abstraktionsgraden dargestellt werden. Die Modellierungstiefen eines Maschinenmodells unterscheiden sich durch unterschiedliche Detaillierung. Eine größere Detaillierung spiegelt sich in einem höheren Informationsgehalt eines Modells wider. Bei einer sehr geringen Modellierungstiefe kann es der Fall sein, dass aufgrund des geringen Informationsgehalts keine sinnvolle Darstellung des Modells auf allen Abstraktionsebenen möglich ist.

Die Abstraktionsgrade entsprechen nicht der verlangten Abgrenzung von Detaillierungsgraden. Zudem werden die in der VDI-Richtlinie 2206 /13/ erwähnten Modellierungstiefen nicht differenziert beschrieben. Daher werden in dieser Arbeit Modellierungstiefen für Maschinenmodelle zur HiLS definiert.

#### 4.1.2.2 Definition von Modellierungstiefen

Bild 4-6 zeigt das Ergebnis der Definition von Modellierungstiefen. Es haben sich fünf Ebenen herauskristallisiert, die in ihrer Detaillierung gut voneinander abgrenzbar sind.

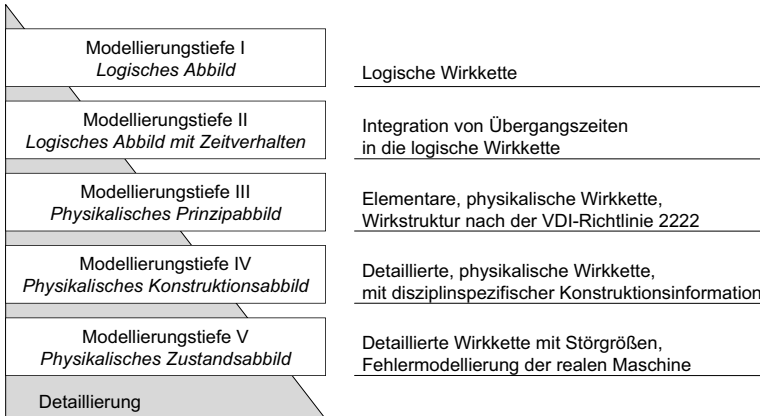


Bild 4-6: Darstellung der Modellierungstiefen

Im Folgenden werden die Modellierungstiefen aus Bild 4-6 näher erläutert. Die Verhaltensmodelle müssen immer eine Modellierung zum Lesen und Schreiben des Eingangs- und Ausgangsabbildes beinhalten. Somit enthält ein Modell jeder Modellierungstiefe die exakte Modellierung des Kommunikationsverhaltens.

##### **Modellierungstiefe I:**

Die Wirkkette besteht in der Modellierungstiefe I allein aus dem logischen Zusammenhang zwischen den Aktoren und den Sensoren bzw. deren Ein- und Ausgängen. Von welchem physikalischen Prinzip, einer mechanischen, elektrischen oder pneumatischen, oder von welchem softwaretechnischen Ursprung der Wirkzusammenhang herrührt, spielt hierbei keine Rolle.



**Modellierungstiefe II:**

Aufbauend auf dem logischen Abbild werden in den Wirkketten Übergangszeiten integriert. Die Übergangszeit entspricht der Aktionszeit des betrachteten Wirkzusammenhangs zwischen einem Aktor und einem Sensor. Die Aktionszeit kann durch Messungen an bereits eingesetzten Komponenten oder durch Schätzung von Experten festgelegt werden.

**Modellierungstiefe III:**

Das physikalische Prinzipabbild stellt zu den Modellierungstiefen I und II einen Paradigmenwechsel dar. Es werden nicht mehr die logischen Zusammenhänge, sondern die grundlegenden physikalischen Wirkprinzipien modelliert. Die Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen werden durch Faustformeln abgeschätzt. Faustformeln sind unter Ingenieuren interdisziplinär verständlich und gründen zumeist auf den Grundrechenarten. Insgesamt lehnt sich die Detaillierung des physikalischen Prinzipabbildes an die Detaillierung der Skizze der Wirkprinzipien nach der VDI-Richtlinie 2222 an /43/.

**Modellierungstiefe IV:**

Das physikalische Konstruktionsabbild detailliert das physikalische Prinzipabbild durch disziplinspezifische Informationen. Dadurch wird die detaillierte Modellierung physikalischer Effekte möglich. Die Informationen stammen aus den finalen Konstruktionsunterlagen und Berechnungen der einzelnen Disziplinen. Bei der Betrachtung von Bewegungen werden bei der Modellierungstiefe IV die dynamischen Eigenschaften von Bauteilen und Baueinheiten berücksichtigt.

**Modellierungstiefe V:**

Beim physikalischen Konstruktionsabbild wird eine Maschine modelliert, die sich nach den Konstruktionsannahmen verhält. Dagegen nähert sich das Zustandsabbild an die reale, zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtete, Maschine an. Es werden an der Maschine bestehende Fehler in das Maschinenmodell integriert. Dazu müssen Störgrößen, welche durch eine fehlerhaft gefertigte Einzelkomponente oder durch eine fehlerbehaftete Montage sowie durch Verschleiß und Verformung entstehen, erfasst werden.

## Grenzen der Detaillierung

Mit einem Simulationstool zur HiLS ist eine Maschine im Allgemeinen in jeder Modellierungstiefe modellierbar. Die Grenze der Detaillierung liegt auf der Seite des Systems bei der echtzeitfähigen Berechnung des Maschinenzustandes /100/. Dies bedeutet, dass der Maschinenzustand nur bis zu einem gewissen Komplexitätsgrad der Wirkzusammenhänge in der Taktzeit der Steuerung berechnet werden kann. Daher ist eine echtzeitfähige Berechnung des Maschinenzustandes bei einer Abbildung der Maschine in den Modellierungstiefen IV und V nicht garantiert. Die Rechenzeit lässt sich allerdings durch Modellreduktion, durch ein geeignetes Simulationstool und einen leistungsfähigen Rechner für die virtuelle Maschine signifikant reduzieren.

## Modellierung zweier Komponenten in unterschiedlichen Modellierungstiefen

Zur Verdeutlichung der Modellierungstiefen sollen im Folgenden die Wirkketten für eine Komponente aus Bauteilen und für eine Baueinheit dargestellt werden.

Die erste Komponente besteht aus einem Ventil, einem bistabilen, pneumatischen Zylinder und zwei Endschaltern. Die Wirkzusammenhänge zwischen den Bauteilen sollen in einem Blockschaltbild abgebildet werden. Bild 4-7 zeigt die Wirkkette der Komponente in zwei unterschiedlichen Modellierungstiefen.

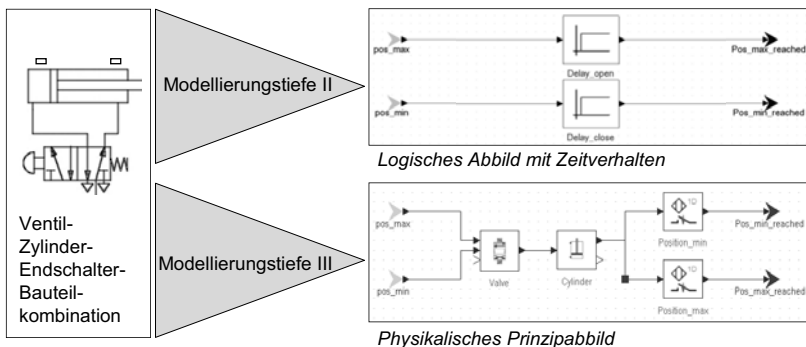


Bild 4-7: Abbild einer Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination /101/ in den Modellierungstiefen II und III, modelliert mit /102/

In der Modellierungstiefe II werden die beiden binären Eingänge des Ventils mit den binären Ausgängen der Endschalter verbunden, wobei ein Signalwechsel nach einer Übergangszeit umgesetzt wird. Die im Verhaltensmodell einzutragende Übergangszeit entspricht der Aktionszeit, die der Zylinder benötigt, um geöffnet bzw. geschlossen zu werden.

In der Modellierungstiefe III wird die physikalische Wirkkette von den Eingängen über das Ventil, den Zylinder und die Endschalter hin zu den Ausgängen anhand von unternehmensübergreifenden Bibliothekskomponenten eines Simulationstools modelliert. Für diese Modellierungstiefe werden Informationen, wie z. B. der Volumenstrom oder die Länge und Durchmesser des Zylinders, benötigt. Die Wirkkette eines Verhaltensmodells der Modellierungstiefe IV besitzt dieselbe Darstellung. Die implementierten physikalischen Zusammenhänge berücksichtigen allerdings spezielle Eigenschaften wie z. B. das Material oder Reibungseffekte.

Das zweite Beispiel ist eine Baueinheit, die aus einer Antriebssteuerung und einer Achse mit einem Greifer besteht. Auf Basis der Wirkkette wird die Positionierung des Greifers berechnet. Eine Modellierung in der Modellierungstiefe II ist schwierig zu realisieren, da es sich um variable Fahrwege handelt, und dementsprechend sehr viele unterschiedliche Aktionszeiten für diese vorgegeben und jeweils ausgewählt werden müssten. In der Modellierungstiefe III wird das Fahrprofil über die Zeit durch eine einfache Faustformel anhand der Geschwindigkeit berechnet. Eine Modellierung in der Modellierungstiefe IV bildet zusätzlich die dynamischen Eigenschaften der Achse, wie z. B. das Schwingungsverhalten, ab. Dies bedeutet die Implementierung einer gewöhnlichen Differenzialgleichung mit den Parametern des dynamischen Systems.

Allgemein ist anzumerken, dass die Modellierungstiefen IV und V eine wichtige Rolle für die Modellierung der Werkstückbearbeitung bei Werkzeugmaschinen spielen. Eine solch detaillierte Betrachtung wird bei der Simulation von Montagemaschinen nicht fokussiert.

## **4.2 Anforderungen**

Die Anforderungen, die an ein Maschinenmodell für eine Montagemaschine zur HiLS gestellt werden, betreffen sowohl die Vollständigkeit (Kapitel 4.1.1) als auch die Wahl der Modellierungstiefe (Kapitel 4.1.2).

## Anforderungen für ein vollständiges Maschinenmodell

Die Vollständigkeit im Abbild der Maschine im Maschinenmodell stellt eine Voraussetzung für eine lauffähige Simulation dar. Die Bestandteile, die zur Vollständigkeit des Maschinenmodells notwendig sind, wurden in Kapitel 4.1.1 beschrieben. Sie bilden zwingende Anforderungen an ein Maschinenmodell und können daher direkt aus der Analyse übernommen werden. In Bild 4-8 sind die Anforderungen aufgelistet.

A1 Modell der Struktur der Maschine
Darstellung der Komponenten und Module
Anbindung des Maschinenmodells an die Steuerung
A2 Verhaltensmodelle für Baueinheiten
Modellierung zum Lesen und Schreiben der Ein- und Ausgangsabbilder
Modellierung der Wirkketten
A3 Verhaltensmodelle für Bauteile
Modellierung der Wirkketten

**Bild 4-8:** Anforderungen für ein vollständiges Maschinenmodell

Das Modell der Struktur der Maschine besteht im Wesentlichen aus der Darstellung der Module und Komponenten der Maschine. Des Weiteren beinhaltet es für jeden Ein- oder Ausgang einen Anschlusspunkt. Dieser wird im Rahmen der Anbindung des Maschinenmodells an die Steuerung modelliert. Die Anforderungen an die Verhaltensmodelle für Baueinheiten und Bauteile A2 und A3 sind direkt aus der Modellierung von Baueinheiten (Kapitel 4.1.1.2) und der Modellierung von Bauteilen (Kapitel 4.1.1.3) abgeleitet.

### Analyse der Anforderungen an die Modellierungstiefe

Eine Formulierung der Anforderungen ist bezüglich der Modellierungstiefe weniger eindeutig als bezüglich der Vollständigkeit. Es muss eine geeignete Modellierungstiefe gewählt werden. Die notwendige Modellierungstiefe ist, wie in Bild 4-5 illustriert, von der Anwendung, d.h. dem Ziel der Simulation, abhängig.

Die in dieser Arbeit vorrangig angestrebte Anwendung ist nach Kapitel 2.2.3 die virtuelle Inbetriebnahme. Die virtuelle Inbetriebnahme umfasst den Steuerungstest, die Absicherung der Taktzeit, die Ermittlung von Parametern und die Durchführung von Ein-

stellvorgängen. Für diese Anwendungen ist eine geeignete Modellierungstiefe zu identifizieren.

Der Steuerungstest dient dazu, Programmierfehler und logische Fehler im Ablauf zu erkennen. Die für den Steuerungstest notwendige Detaillierung hat Tomaszunas /75/ analysiert. Tomaszunas weist einer Montagemaschine einen diskreten Produktionsprozess zu, bei dem die von der Steuerung ausgelösten Abläufe zumeist auf Signalwechsel zurückzuführen sind. Die Aktionen der Aktoren und die Reaktionen der Sensoren stellen Ereignisse dar, die im Ablauf der Montagemaschine ein Wechselspiel bilden. Daher verhält sich die Montagemaschine nach Tomaszunas aus Sicht der Steuerung wie ein ereignisdiskretes System. Auf die in Kapitel 4.1.2.2 definierten Modellierungstiefen übertragen, entspricht ein ereignisdiskretes System einem logischen Abbild mit Zeitverhalten, d. h. die Modellierungstiefe II. Nach der Analyse von Tomaszunas ist die Modellierungstiefe II ausreichend. Die Aussage wird für diese Arbeit übernommen, jedoch hinzugefügt, dass Kollisionen nur durch die Berechnung von Fahrwegen erkannt werden können. Fahrwege müssen über eine Faustformel anhand der Geschwindigkeit und der Zeit berechnet werden. Dies entspricht der Modellierungstiefe III. Zur Berücksichtigung dynamischer Aspekte müssen die Fahrwege in der Modellierungstiefe IV berechnet werden.

Die virtuelle Inbetriebnahme umfasst des Weiteren die Absicherung der Taktzeit. Die Taktzeit kann nicht mit einem Modell in der Modellierungstiefe I ermittelt werden, da das logische Abbild dieser Modellierungstiefe kein Zeitverhalten integriert. In der Modellierungstiefe II kann in den meisten Fällen die Taktzeit ermittelt und Optimierungspotentiale im Steuerungsprogramm identifiziert werden. Für die Abstimmung von Maschinenabläufen ist es allerdings meistens unumgänglich, die Dauer der Fahrwege zu berechnen und Kollisionen zu erkennen. Daher gilt auch hier, wie beim Steuerungstest, dass die Modellierungstiefe II ausreicht, solange keine Komponenten abzubilden sind, für die Fahrwege berechnet werden müssen.

Auf die Berechnung eines Fahrweges kann verzichtet werden, wenn es ausschließlich notwendig ist zu wissen, wann ein Objekt sein Ziel erreicht hat. Dies gilt oftmals für die Fahrwege eines Zylinders. Zumeist ist es nur von Bedeutung, wann der Zylinder ganz ausgefahren also z. B. der Greifer offen ist. Dann genügt die Modellierungstiefe II, bei der nach Ablauf der Aktionszeit die Position des Objekts ruckartig auf die Zielposition gesetzt wird.

Der Verfahrensweg muss im Verhaltensmodell einer Komponente berechnet werden, wenn die exakte Positionierung des Objekts im Zeitverlauf relevant ist. Dazu wird meistens in der realen Maschine die Bewegung geregelt. Der Aktor und die Regelung einer Bewegung bilden eine Baueinheit. Daher kann angenommen werden, dass Verfahrenwege dann zu berechnen sind, wenn es sich um eine Baueinheit handelt.

Die Ermittlung von Parameterwerten ist eine weitere Anwendung innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme. Sie bezieht sich meistens auf physikalische Parameter. Demzufolge ist für die Absicherung von Parameterwerten eine physikalische Modellierung ab der Modellierungstiefe III erforderlich.

Bei der Durchführung von Einstellvorgängen an Baueinheiten handelt es sich selten um logische Einstellungen. Daher wird je nach Einstellvorgang mindestens ein Verhaltensmodell der Modellierungstiefe III benötigt.

Modellierungstiefe der Verhaltensmodelle für Baueinheiten	
Modellierungstiefe	Anwendung
II	Steuerungstest, Taktzeitoptimierung
III oder IV	Berechnung von Verfahrenwegen, Ermittlung von Parameterwerten, Durchführung von Einstellvorgängen
Modellierungstiefe der Verhaltensmodelle für Bauteile	
Modellierungstiefe	Anwendung
II	Steuerungstest, Taktzeitoptimierung
III oder IV	Ermittlung von Parameterwerten

**Bild 4-9:** Geforderte Modellierungstiefe für die Wirkketten von Verhaltensmodellen

### **Geforderte Modellierungstiefe für die virtuelle Inbetriebnahme**

**Bild 4-9** fasst die Anforderungen an die Modellierungstiefen für die Wirkketten der Verhaltensmodelle zusammen. Für Baueinheiten gibt es einige Anwendungen, die eine größere Modellierungstiefe als die Modellierungstiefe II erfordern. Dies sind geregelte Bewegungen oder Einstellungen, die während der Inbetriebnahme an der Baueinheit vorzunehmen sind. Bei Bauteilen genügt meistens die Modellierungstiefe II. Ausgenommen

ist die Ermittlung von Parameterwerten. Ein Beispiel hierfür wäre die Einstellung des Drucks bei pneumatischen Bauteilen.

Für die virtuelle Inbetriebnahme soll eine Modellierungstiefe gewählt werden, die nach Bild 4-10 ein gutes Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand zeigt. Die Modellierungstiefe sollte deshalb möglichst gering aber ausreichend sein.

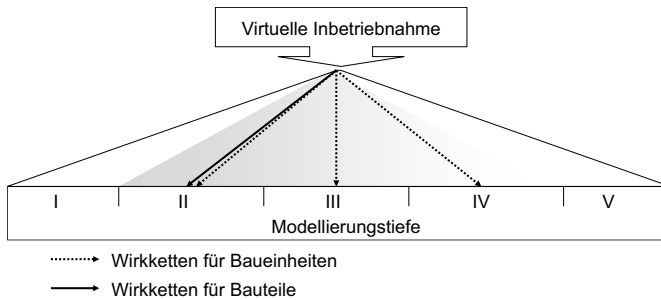


Bild 4-10: Wahl der Modellierungstiefe für die virtuelle Inbetriebnahme

Bei den Verhaltensmodellen für Baueinheiten ist die notwendige Modellierungstiefe stark von der Baueinheit abhängig und kann daher nicht allgemein festgelegt werden.

Für Verhaltensmodelle für Bauteile ist es möglich, in der Modellierungstiefe II zu modellieren, wenn darauf verzichtet wird, Parameterwerte zu ermitteln. Hieraus ergibt sich ein hohes Einsparpotential bezüglich des Aufwands zur Modellierung von Bauteilen. Falls neben dem Steuerungstest und der Absicherung der Taktzeit die Ermittlung von Parametern einen sehr hohen Nutzen aufzeigen sollte, muss die benötigte Detaillierung im Maschinenmodell nachgezogen werden.

### 4.3 Lösungskonzept

Gemäß den Anforderungen an ein Maschinenmodell aus Kapitel 4.2 wird im Folgenden ein Lösungskonzept zur automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells vorgestellt. Entsprechend den Anforderungen wird ein Modell der Struktur der Maschine (Kapitel 4.1.1.1) mit Modulen, Komponenten und Ein- und Ausgängen als auch Verhaltensmodelle für Baueinheiten und Bauteile erstellt. Das Konzept ist in Bild 4-11 dargestellt.

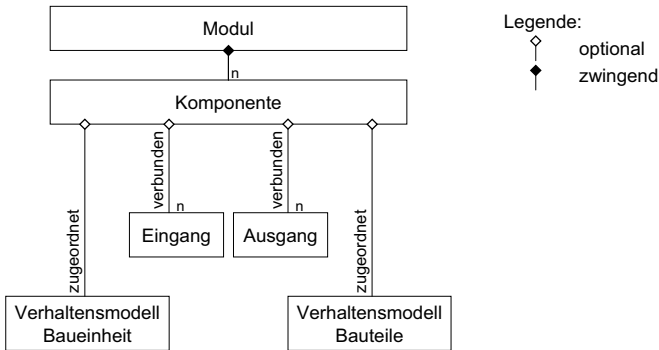


Bild 4-11: Aufbau der Modellierung eines Maschinenmodells

Um die Anschaulichkeit des Lösungskonzepts zu erhöhen, stellt [Bild 4-12](#) ein schematisches Maschinenmodell für eine beispielhaft aufgebaute kleine Maschine dar. In dem Bild wird deutlich, dass die Verhaltensmodelle jeweils für eine Komponente erstellt und dieser zugeordnet werden.

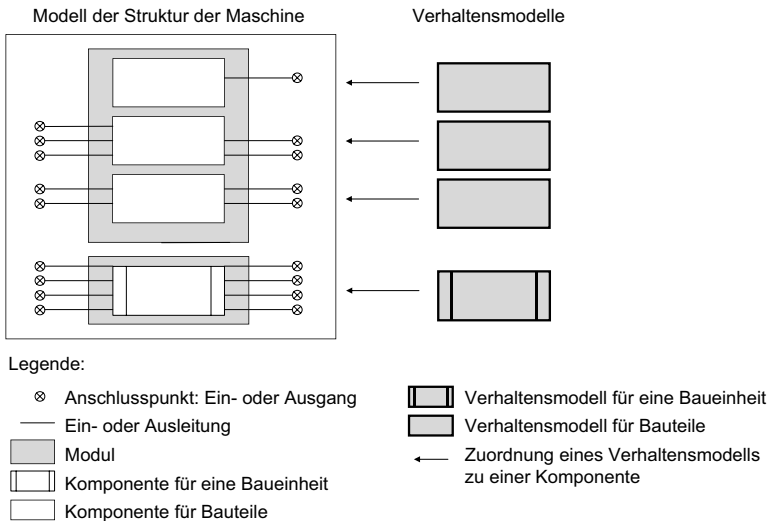


Bild 4-12: Schematisiertes Maschinenmodell einer Montagemaschine



Die Unterscheidung zwischen Struktur und Verhalten einer Maschine ist ein nahe liegender Ansatz zum Aufbau eines Modells. Die Informationsmodelle AutomationML und SysML basieren ebenfalls auf dieser Unterscheidung (Kapitel 3.1.2). Auf diesen Modellierungen wird weiterhin nicht aufgebaut. Es wird ein lauffähiges, speziell für die HiLS einer Montagemaschine geeignetes, Maschinenmodell konzipiert.

### **Erstellung von Verhaltensmodellen für Baueinheiten**

Um die automatisierte Erstellung der Struktur der Maschine und der Verhaltensmodelle für Baueinheiten und Bauteile leisten zu können, müssen die relevanten Informationen in Engineeringdokumenten festgehalten sein. Engineeringdokumente können nur das beinhalten, was im Engineeringprozess entworfen wurde. Im Rahmen des Engineerings einer Montagemaschine wird deren Struktur festgelegt. Es wird bestimmt, welche Bestandteile die Maschine umfassen soll und wie diese mit der Steuerung verbunden werden. Der Einsatz einzelner Bauteile wird ebenfalls im Engineeringprozess durch die Mechanik- und Elektrokonstruktion festgelegt. Durch diese beiden konstruktiven Aufgaben wird eine produktspezifische Montagemaschine entwickelt (Kapitel 2.1.1.1).

Dagegen wird eine Baueinheit in der Regel nicht speziell für eine Maschine entworfen. Nach Rahmenbedingung R2 werden Baueinheiten oftmals von einem Lieferanten bezogen (Kapitel 3.4.1). In diesem Fall wird die Wirkkette einer Baueinheit nicht vom Hersteller der Montagemaschine festgelegt (Kapitel 4.1.1.2). Demzufolge existiert bei ihm kein Engineeringdokument über die Wirkkette der Baueinheit. Daher kann diese auch nicht vom Hersteller der Montagemaschine automatisiert aus den Dokumenten erstellt werden.

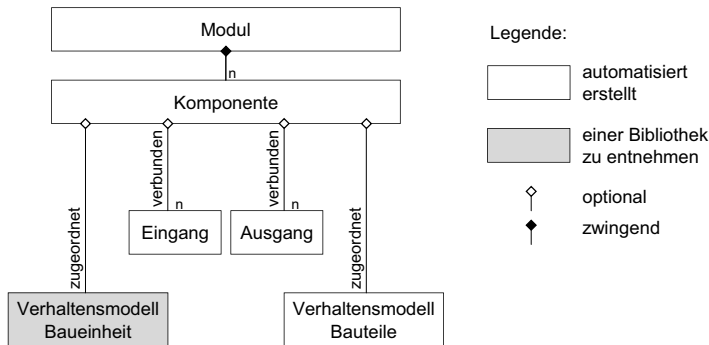
Neben dem Dokumentationsdefizit bei eingekauften Baueinheiten ist bei jeder Baueinheit eine Modellierung zum Lesen und Schreiben des Eingangs- und Ausgangsabbildes zu erstellen. Die Dokumentationsgrundlage des Eingangs- und Ausgangsabbildes ist ein Handbuch des Lieferanten. Die Modellierung zum Lesen und Schreiben des Ein- und Ausgangsabbildes wird z. B. durch einen Programmcode realisiert (Kapitel 4.1.1.2). Eine automatisierte Erstellung der Modellierung müsste daher aus einem textuellen, individuell verfassten Handbuch einen Programmcode generieren. Diese Aufgabe wurde bisher nicht gelöst.

Aufgrund fehlender Dokumentation über das Verhalten von gelieferten Baueinheiten und der anspruchsvollen Modellierung zum Lesen und Schreiben der Ein- und Aus-

gangsabbilder müssen Verhaltensmodelle für Baueinheiten manuell modelliert werden. Ein manuell modelliertes Verhaltensmodell einer Baueinheit wird zur Wiederverwendung als Bibliothekskomponente abgelegt.

### Gesamtkonzept

Es ergibt sich folgendes, in [Bild 4-13](#) illustriertes, Gesamtkonzept zur automatisierten Modellerstellung.

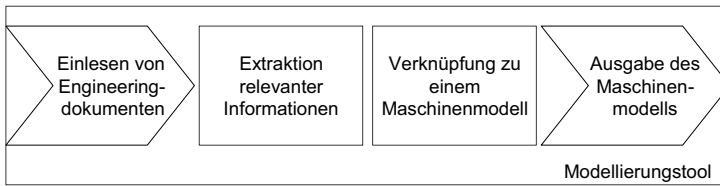


**Bild 4-13:** Aufbau eines automatisiert zu erstellenden Maschinenmodells

Insgesamt ergibt sich ein Lösungskonzept, in dem das Modell der Struktur der Maschine und Verhaltensmodelle für Bauteile automatisiert erstellt werden. Verhaltensmodelle von Baueinheiten werden einer Bibliothek entnommen.

### Ablauf der automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells

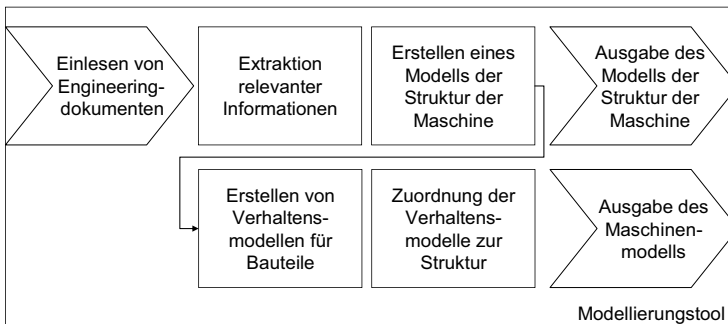
Zur automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells sollen ausgewählte Engineeringdokumente eingelesen, daraus die relevanten Informationen extrahiert und zu einem Maschinenmodell verknüpft werden. Das Maschinenmodell soll daraufhin in einem Format, das ein ausgewähltes Simulationstool lesen kann, ausgegeben werden. Der gesamte Ablauf der Erstellung wird von einem Modellierungstool übernommen ([Bild 4-14](#)).



**Bild 4-14:** Ablauf der automatisierten Erstellung eines Maschinenmodells

Der Ablauf aus Bild 4-14 wird in [Bild 4-15](#) untergliedert. Zuerst soll das Modell der Struktur der Maschine (Kapitel 4.1.1.1) erstellt werden. Darauf aufbauend sollen die Verhaltensmodelle für Bauteile erstellt und den Komponenten zugeordnet werden. Nach deren Erstellung durch das Modellierungstool werden die Verhaltensmodelle für Baueinheiten einer Bibliothek entnommen und dem Maschinenmodell manuell hinzugefügt. Als Erweiterung dieses Lösungskonzepts könnten Verhaltensmodelle für Baueinheiten im Maschinenmodell automatisiert integriert werden.

Da das Modell der Struktur der Maschine für eine Maschine festgelegt ist, bildet dies den konstanten Grundstein eines Maschinenmodells. Dies trifft nicht auf die Verhaltensmodelle zu. Verhaltensmodelle für Bauteile werden in dieser Arbeit automatisiert in der Modellierungstiefe II erstellt (Kapitel 4.2). Sollen diese in einer größeren Modellierungstiefe erstellt werden, müssen sie manuell modelliert werden. In diesem Fall ist es sinnvoll, nur das Modell der Struktur der Maschine automatisiert zu erstellen. Daher soll das Modell der Struktur der Maschine auch ungeachtet der Verhaltensmodelle von dem Modellierungstool ausgegeben werden können (Bild 4-15).



**Bild 4-15:** Automatisierte Erstellung des Maschinenmodells in zwei Schritten

#### **4.4 Zusammenfassung der Anforderungen und des Lösungskonzepts**

In diesem Kapitel wurde das Maschinenmodell zur HiLS analysiert. Bei der Analyse wurde festgestellt, dass das Maschinenmodell vollständig sein muss, um ohne weitere Hardwarekomponenten eine lauffähige Simulation zu garantieren. Die Vollständigkeit wurde in drei Bestandteile aufgeteilt. Die Bestandteile sind die Modellierung des gesamten Eingangs- und Ausgangsabbildes einer Maschine und des Verhaltens, aufgegliedert in das von Baueinheiten und in das von Bauteilen. Darauf folgend wurde die Detaillierung eines Maschinenmodells untersucht. Zur Wahl einer Detaillierung wurden fünf abgrenzbare Modellierungstiefen definiert. Bezüglich der Modellierungstiefe wurde eine Detaillierung gewählt, die niedrig ist, aber für die gewünschte Anwendung ausreicht.

Auf die Erarbeitung der Anforderungen folgte die Beschreibung des Lösungskonzepts. Es ergab sich eine automatisierte Modellerstellung, bei der die Verhaltensmodelle für Baueinheiten als Bibliotheksbausteine konzipiert werden.

## **5 Methode zur automatisierten Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine**

Das Lösungskonzept aus Kapitel 4.3 wird durch die Erarbeitung zweier Methoden verfeinert. In Kapitel 5 wird die Methode zur automatisierten Erstellung des Modells der Struktur der Maschine hergeleitet. In Kapitel 6 folgt der Entwurf der Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen.

Zuerst wird in Kapitel 5.1 der Informationsgehalt der Engineeringdokumente identifiziert. Danach wird in Kapitel 5.2 der Aufbau des Zielmodells, das automatisiert zu erstellende Modell der Struktur der Maschine, konzipiert. In Kapitel 5.3 wird das Verfahren zur Transformation hergeleitet. Durch die Transformation werden die Informationen aus den Engineeringdokumenten in ein Modell der Struktur der Maschine überführt.

### **5.1 Identifikation der relevanten Informationen in Engineeringdokumenten**

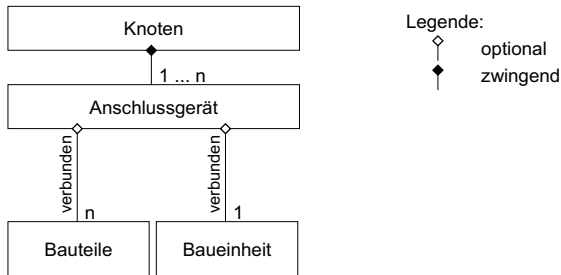
Im Folgenden werden die Engineeringdokumente näher erläutert, die zur automatisierten Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine herangezogen werden. Dazu werden die Engineeringdokumente betrachtet, die die Bestandteile der technischen Dokumentation der Maschine und ihre Schnittstelle zur Steuerung betreffen. Standardmäßig sind dies im Engineering von Montagemaschinen die Eingangs- und Ausgangsliste, die Buskonfiguration und die Geräteliste aus der Elektrokonstruktion. Zur automatisierten Erstellung des Modells der Struktur der Maschine werden die ersten beiden Dokumente verwendet. Die Geräteliste wird nicht in die automatisierte Modellerstellung mit eingezogen, da sie sehr detailliert ist und viele nicht relevante Bauteile enthält (Kapitel 5.3).

#### **5.1.1 Buskonfiguration**

Die Buskonfiguration wurde bereits in Kapitel 4.1.1.1 eingeführt. Dort wurde erläutert, dass die Buskonfiguration alle am Feldbus angeschlossenen Knoten enthält.

#### **Inhaltliche Relevanz einer Buskonfiguration**

Die Systematik einer Buskonfiguration ist in Bild 5-1 dargestellt. Sie basiert auf Einheiten, die als Knoten und Anschlussgeräte bezeichnet werden.



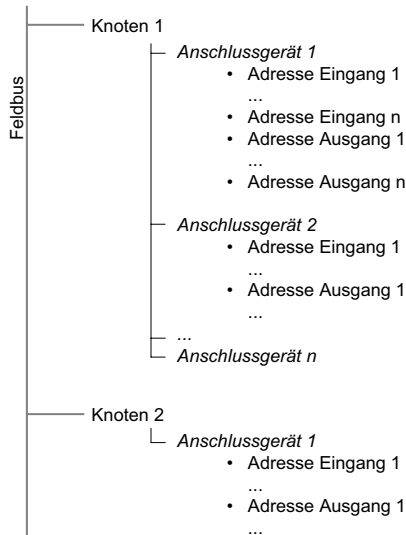
**Bild 5-1:** Aufbau eines Knotens in einer Buskonfiguration

Ein Knoten besteht aus mindestens einem Anschlussgerät. An einem Anschlussgerät können entweder mehrere Bauteile oder eine Baueinheit angeschlossen werden. Die Bauteile oder die Baueinheit sind direkt über ihre Ein- und Ausgänge mit dem Anschlussgerät verbunden. Den Anschlussstellen sind Adressen zugewiesen. Die Adressen sind für jedes Anschlussgerät aufgelistet. Durch die Auflistung der Adressen erschließt sich der Adressraum eines Anschlussgerätes. Der Aufbau ist beispielhaft in [Bild 5-2](#) dargestellt.

Durch die Nomenklatur einer Adresse kann zwischen einem Eingang und einem Ausgang unterschieden werden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass ein Anschlussgerät nur Eingänge oder nur Ausgänge besitzt. Dies trifft z. B. bei einer Eingangs- bzw. einer Ausgangsklemme zu.

Eine direkt an den Feldbus angeschlossene Baueinheit wird angegeben wie andere Knoten. Ob es sich um ein Anschlussgerät oder eine Baueinheit handelt, wird in der Buskonfiguration nicht deutlich. Die Angabe ist anhand des Knotens 2 in [Bild 5-2](#) dargestellt. Die Baueinheit bildet einen Knoten, der aus einem einzigen Anschlussgerät besteht. Das Anschlussgerät wird dann als in die Baueinheit integriert betrachtet.

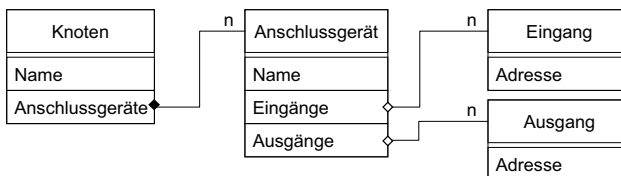
Des Weiteren wird in der Buskonfiguration nicht dokumentiert, ob das Anschlussgerät einzelne Bauteile oder eine Baueinheit mit der Steuerung verbindet. Obwohl eine Baueinheit einen Adressraum belegt und ein Bauteil nur ein einzelnes Bit, lässt sich keine Unterscheidung aus den Adressräumen erschließen. Die Aufschlüsselung der Adressen bis hin zu einer einzelnen Adresse in der Größe eines Bits findet in der Buskonfiguration sowohl für Bauteile als auch für Baueinheiten statt.



**Bild 5-2:** Schematischer Aufbau einer Buskonfiguration

### Datenstruktur einer Buskonfiguration

**Bild 5-3** zeigt eine allgemeine Datenstruktur einer Buskonfiguration auf, wie sie zur automatisierten Modellerstellung ausgelesen wird. Ein Knoten hat einen eindeutigen Namen und besitzt mindestens ein Anschlussgerät. Ein Anschlussgerät hat ebenfalls einen eindeutigen Namen und besitzt nur Eingänge, nur Ausgänge oder Ein- und Ausgänge. Ein Ein- oder Ausgang definiert sich allein durch die Angabe seiner Adresse.



**Bild 5-3:** Einzulesende Datenstruktur einer Buskonfiguration

### 5.1.2 Ein- und Ausgangs-Liste

Die Ein- und Ausgangsliste, folgend E/A-Liste genannt, ist das zweite Engineeringdokument, das zur automatisierten Erstellung des Modells der Struktur der Maschine herangezogen wird. In dieser Liste sind alle binären Ein- und Ausgänge, also alle Ein- und Ausgänge, die eine boolesche Variable übertragen, aufgelistet. Demzufolge sind in der E/A-Liste keine Ein- und Ausgänge von Baueinheiten enthalten.

#### Inhaltliche Relevanz und Datenstruktur einer E/A-Liste

In der E/A-Liste sind alle Ein- und Ausgänge mit einer Referenzkennzeichnung benannt. Die Kennzeichnung bildet den Namen und dient zur eindeutigen Identifikation der Ein- und Ausgänge. Neben dem Namen ist für jeden Ein- und Ausgang die Adresse angegeben und ein Kommentar gesetzt. Daraus ergibt sich eine einfache Datenstruktur, wie sie in Bild 5-4 dargestellt ist.

Eingang	Ausgang
Name	Name
Adresse	Adresse
Kommentar	Kommentar

Bild 5-4: Einzulesende Datenstruktur einer E/A-Liste

Es folgt eine kurze Erläuterung zu den Attributen der Ein- und Ausgänge:

- Der Name richtet sich nach der Referenzkennzeichnung der DIN EN-Norm 81346-1 /103/. In der Richtlinie werden Strukturierungsprinzipien und die Referenzkennzeichnung festgelegt. Anhand dieser allgemeinen Systematik sind auch die Bauteile und Baueinheiten einer Montagemaschine bezeichnet. In vielen Engineeringprozessen werden, wie auch in dieser Arbeit angenommen, die binären Ein- und Ausgänge nach der Kennzeichnung des Bauteils benannt, an das sie nächstliegend elektrisch angeschlossen sind. Das ist dasjenige Bauteil, das im Strompfad auf den Anschluss des Ein- oder Ausgangs am Anschlussgerät folgt. Hierbei ist nochmals zu erwähnen, dass alle Bauteile und Baueinheiten nach der Systematik der DIN EN-Norm 81346-1 /103/ bezeichnet sind. In der E/A-Liste sind aber nur die Ein- und Ausgänge gelistet, deren Anschluss eine boolesche Variable überträgt.



- Die Adresse stellt die Verbindung zwischen der E/A-Liste und der Buskonfiguration her. Durch die Adresse wird der Name eines Ein- oder Ausgangs mit einem Anschlussgerät aus der Buskonfiguration in Verbindung gebracht.
- Der Kommentar gibt bei einem Eingang des Maschinenmodells den Befehl an. Bei einem Ausgang handelt es sich um die Formulierung eines Zustands. Somit enthält der Kommentar wichtige Informationen über das Bauteil. Die textuelle Formulierung eines Kommentars ist frei und daher keine verlässliche Informationsquelle. Zur automatisierten Modellerstellung wird der Kommentar daher nicht verwendet.

## **5.2 Definition des Modells der Struktur der Maschine**

In diesem Kapitel wird der Aufbau eines automatisiert zu erstellenden Modells der Struktur der Maschine konzipiert. Einerseits werden die Anforderungen an ein Maschinenmodell und andererseits die durch die automatisierte Modellerstellung begrenzten Möglichkeiten zur Informationsgewinnung berücksichtigt.

Der Aufbau des Modells der Struktur der Maschine wird in die hierarchische Struktur der Maschine und in die Anbindung des Maschinenmodells an die Steuerung aufgeteilt. In dieser Reihenfolge werden sie in Kapitel 5.2.1 und in Kapitel 5.2.2 vorgestellt.

### **5.2.1 Hierarchische Struktur der Maschine**

Durch eine hierarchische Strukturierung der Maschine werden die Module und Komponenten für das Modell der Struktur der Maschine festgelegt. Die Strukturierung soll nach einer standardisierten Systematik erfolgen. Deshalb wird zur Bildung der Module und Komponenten auf die Strukturierungsprinzipien der DIN EN-Norm 81346-1 /103/ zurückgegriffen.

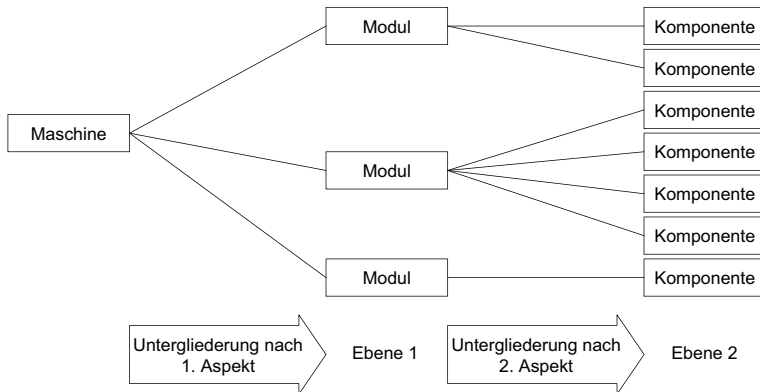
Die Norm 81346-1 /103/ definiert eine Struktur als Organisation von Beziehungen zwischen Objekten eines Systems, welche „Bestandteil-von-Beziehungen“ beschreibt. Die Objekte sind im vorliegenden Fall die Montagemaschine, die Module und die Komponenten. Zur Strukturierung wird in der Norm ein Konzept von Aspekten angewandt. Aus Sicht eines Aspekts unterteilt sich ein Objekt in Teilobjekte.

Es werden drei Aspekte genannt:

- Funktionsaspekt: Er untergliedert ein Objekt nach funktionalen Gesichtspunkten.
- Produkaspekt: Er untergliedert ein Objekt nach konstruktiven Gesichtspunkten. Durch den Produkaspekt werden die Liefereinheiten einer Maschine deutlich.
- Der Ortsaspekt untergliedert ein Objekt nach räumlichen Gesichtspunkten.

Zur Bildung von Objekten einer Ebene wird das hierarchisch übergeordnete Objekt nach einem Aspekt untergliedert. In einer weiteren Ebene kann nach demselben oder nach einem anderen Aspekt untergliedert werden.

Die Norm soll in dieser Arbeit zur Erstellung von Modulen und Komponenten angewandt werden. Es ergibt sich eine Untergliederung der Maschine in zwei Ebenen. Das Resultat ist in Form eines Strukturbaums in [Bild 5-5](#) dargestellt.



**Bild 5-5:** Strukturbaum zum Modell der Struktur der Maschine

### **Diskussion der Aspekte zur Untergliederung der Maschine**

Die Komponenten sollen in sich einen möglichst hohen und untereinander einen möglichst geringen Wirkzusammenhang aufweisen (Kapitel 2.1.1.2). Als Aspekt zur Strukturierung ist daher für beide Ebenen der Funktionsaspekt zu wählen. Wenn allerdings im Engineering eines Herstellers von Montagemaschinen die Untergliederung standardisiert

nach einem anderen Aspekt erfolgt, muss geprüft werden, ob die Untergliederung nach diesem Aspekt ebenfalls geeignet ist.

Insbesondere der Produkaspekt eignet sich neben dem Funktionsaspekt zur Anwendung für die Untergliederung in der zweiten Ebene. Die DIN EN-Norm 81346-1 /103/ definiert ein geliefertes oder in einer Fertigungseinrichtung hergestelltes Produkt als Komponente. Der Definition nach entspricht eine Baueinheit einer Montagemaschine einem Produkt. Die Bauteile, die gemeinsam als Komponente eine Funktion erfüllen, werden durch die produktbezogene Strukturierung ebenfalls als zueinander gehörig erkannt. Dies ist möglich, da der Produkaspekt „üblicherweise [...] die physikalischen Beziehungen zwischen den Komponenten aufzeigt, d. h., wie sie physikalisch zusammengefügt oder zusammengebaut sind“ /103/. Eine Komponente, die sich aus Bauteilen zusammensetzt, stellt bei einer zweifachen Untergliederung ein Produkt dar. Die einzelnen Bauteile, die als Liefereinheiten auch Produkten entsprechen, werden erst als Objekte einer Untergliederung in der dritten Ebene sichtbar.

Der Ortsaspekt kann mit dem Funktionsaspekt einhergehen. Allerdings erfüllen räumlich nahe gelegene Objekte teils unterschiedliche Funktionen. Daher eignet sich der Ortsaspekt nur bedingt.

### **Dokumentation der Strukturierung anhand der Referenzkennzeichnung**

Durch die aufeinander folgende Untergliederung nach dem Funktionsaspekt oder eine erste Untergliederung nach dem Funktionsaspekt und darauf folgend nach dem Produkaspekt ergibt sich eine geeignete Strukturierung der Maschine.

Das Ergebnis der Strukturierung wird anhand der Systematik der Referenzkennzeichnung festgehalten. Die Referenzkennzeichnung ist, wie bereits in Kapitel 5.1.2 erwähnt, ebenfalls in der DIN EN-Norm 81346-1 /103/ definiert. Die Referenzkennzeichnung eines Objekts richtet sich nach dem Pfad, der im Strukturbaum durchlaufen werden muss, um bis zum betrachteten Objekt zu gelangen. Ein Pfad durch einen Strukturbaum durchschreitet mehrere Ebenen. Daher wird das Referenzkennzeichen nach dem Sprachgebrauch der Norm als ein Mehrebenen-Referenzkennzeichen bezeichnet. Im Falle des Modells der Struktur der Maschine handelt es sich für ein Modul um ein Ein-Ebenen-Referenzkennzeichen und für eine Komponente um ein Zwei-Ebenen-Referenzkennzeichen.

Der in einer Ebene angewandte Aspekt wird jeweils durch ein Vorzeichen im Referenzkennzeichen deutlich gemacht. Die Norm 81346 gibt ein „=“ für den Funktionsaspekt und ein „-“, für den Produktaspekt vor. Nach dem Vorzeichen folgen die Kennbuchstaben und die Nummer, welche das einzelne Objekt in der Ebene identifizieren. Die Kennbuchstaben und die Nummer können unternehmensspezifisch frei gewählt werden.

Bild 5-6 zeigt die Bildung von Referenzkennzeichen durch eine funktionsbezogene und eine darauf folgende produktbezogene Untergliederung. Die Objekte der beiden Ebenen werden mit beispielhaften Nummern gekennzeichnet. Rechts in Bild 5-6 werden die resultierenden Zwei-Ebenen-Referenzkennzeichen für die Komponenten dargestellt.

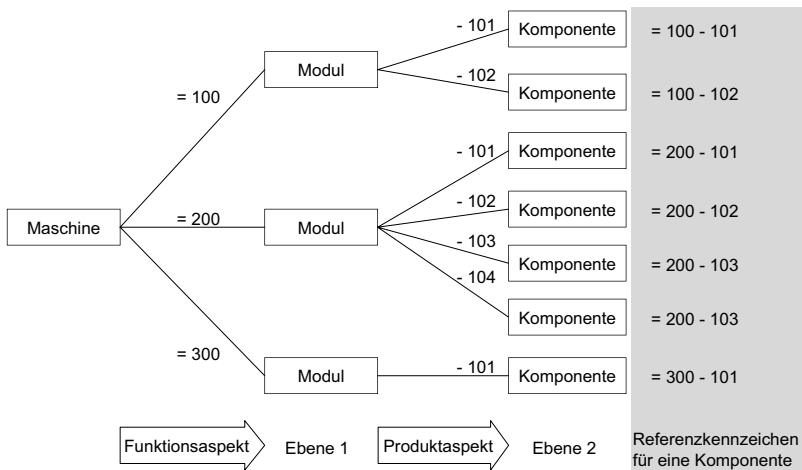


Bild 5-6: Strukturbaum zur Bildung eines Zwei-Ebenen-Referenzkennzeichens nach der DIN EN-Norm 81346-1 /103/

Bild 5-7 zeigt die Module und Komponenten, wie sie nach dem Strukturbaum aus Bild 5-6 in dem Modell der Struktur der Maschine modelliert werden sollen.

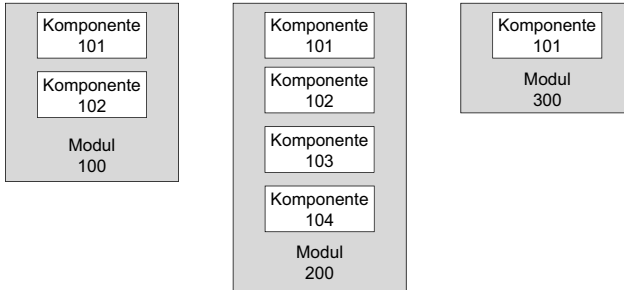


Bild 5-7: Aus dem Strukturbaum (Bild 5-6) resultierende Modellierung der hierarchischen Struktur der Maschine

### **Verarbeitung der Referenzkennzeichen**

Die Strukturierung eignet sich für ein automatisiert zu erstellendes Modell der Struktur der Maschine, da das Ergebnis der Strukturierung durch die Referenzkennzeichnung in Engineeringdokumenten festgehalten werden kann. Dann können die Engineeringdokumente zur automatisierten Modellerstellung eingelesen und die Module und Komponenten abgeleitet werden.

Eine Strukturierung der Maschine wird jedoch in den meisten Engineeringprozessen nicht zu ihrem Selbstzweck durchgeführt. Die Vergabe von Referenzkennzeichen findet im Zusammenhang mit der Konstruktion statt, wofür unter Umständen keine vollständige Strukturierung der Maschine benötigt wird. Um die Anforderungen an die Vollständigkeit des Maschinenmodells aus Sicht der Steuerung erfüllen zu können, muss für die gesamte Maschine eine Referenzkennzeichnung bis in zweiter Ebene vorliegen oder es müssen durch Transformationsalgorithmen die Informationslücken geschlossen werden.

### 5.2.2 Anbindung an die Steuerung

Das Modell der Struktur der Maschine enthält neben den Modulen und Komponenten der Maschine auch die Anbindung des Maschinenmodells an die Steuerung. Für die Modellierung der Anbindung im Maschinenmodell besteht wenig Spielraum, da die Schnittstelle des Maschinenmodells mit den simulierten Knoten vorgegeben ist.

Die Anbindung an die Steuerung umfasst im Maschinenmodell die Modellierung der Anschlusspunkte und deren Verbindung zu den Komponenten. Neben einer exakten Abbildung wird angestrebt, die Modellierung der Anbindung übersichtlich und effizient zu gestalten. Die Modellierung der Anbindung ist in drei Aufgaben unterteilbar:

1. Die Modellierung der Anschlusspunkte.
2. Die Bündelung der Eingänge für deren Einleitung in eine Komponente und der Ausgänge für deren Ausleitung aus einer Komponente.
3. Die Ein- und Ausleitung zur richtigen Komponente und zum richtigen Modul.

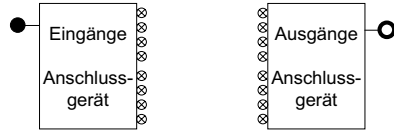
Zu 1.: Die Anschlusspunkte bauen die Verbindung zu den Knoten auf, die außerhalb des Maschinenmodells durch Hardwarekomponenten simuliert werden. Jeder Anschlusspunkt muss mit seinem Gegenstück in der Konfiguration des Knotens verknüpft werden. Da die Verknüpfung außerhalb des Maschinenmodells stattfindet, wird sie nicht automatisiert erstellt. Die Verknüpfung ist bei einer großen Anzahl an Anschlusspunkten aufwändig. Daher soll der Aufwand durch eine geeignete Modellierung im Maschinenmodell reduziert werden. Als Lösung werden die Eingänge und die Ausgänge des Maschinenmodells jeweils für ein Anschlussgerät zusammengefasst. Die Zusammenfassung der Anschlusspunkte über die Abbildung eines Anschlussgerätes wird in [Bild 5-8](#) illustriert.

Konfiguration zur Simulation eines Knotens

*Anschlussgerät*

- Adresse Ausgang 1 } ○
- ...
- Adresse Ausgang n } ○
- Adresse Eingang 1 } ●
- ...
- Adresse Eingang n } ●

Maschinenmodell



Legende:

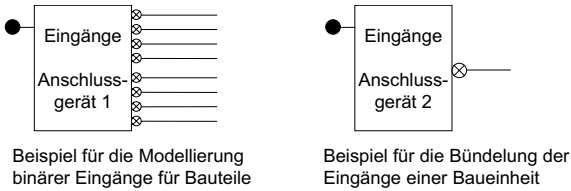
- Zusammenfassung der Ausgänge des Maschinenmodells für ein Anschlussgerät
- Zusammenfassung der Eingänge des Maschinenmodells für ein Anschlussgerät
- ⊗ Anschlusspunkt im Maschinenmodell

**Bild 5-8:** Zusammenfassung der Anschlusspunkte durch Anschlussgeräte

Zu 2.: Bei der Einleitung der Eingänge in eine Komponente und der Ausleitung der Ausgänge aus einer Komponente ist es vorteilhaft eine, auf die unterschiedlichen Kommunikationseigenschaften von Bauteilen und Baueinheiten abgestimmte, Bündelung der Ein- und Ausgänge vorzunehmen. Eine Bündelung fasst z. B. acht einzelne Ein- oder Ausgänge, die aus einem Bit bestehen, zu einem Byte zusammen.

Die Bündelung von Ein- und Ausgängen dient dem einfacheren Lesen und Schreiben des Ein- und Ausgangsabbildes einer Baueinheit. Eine herstellereigenspezifische Protokolldefinition baut zumeist auf Bytes, Worte oder Doppelworte auf. Zur einfacheren Implementierung und Interpretation sollen die Steuerbefehle und Statusmeldungen nicht getrennt weitergeleitet werden. Demzufolge werden alle Ein- oder Ausgänge einer Baueinheit gebündelt, was der gesamten Adressbreite des Anschlussgerätes entspricht.

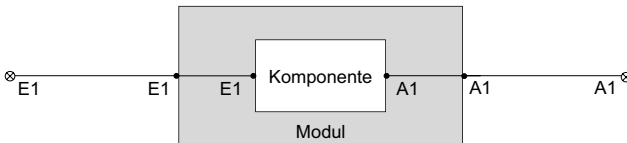
Das Ein- oder Ausgangsabbild eines Bauteils ist binär. Für ein binäres Signal wird keine Bündelung benötigt. Bild 5-9 zeigt ein Beispiel für nicht gebündelte und für gebündelte Eingänge.



**Bild 5-9:** Gebündelte und nicht gebündelte Eingänge von Anschlussgeräten

Zu 3.: Zur richtigen Einleitung muss zuerst ein Eingang von dem Anschlusspunkt aus in ein Modul eingeleitet werden. Daraufhin muss der Eingang im Modul weiter zu der zugehörigen Komponente geführt werden. Ein Ausgang muss aus einer Komponente heraus, über ein Modul, zu dem Anschlusspunkt ausgeleitet werden. Die Einleitung eines Eingangs und die Ausleitung eines Ausgangs ist in [Bild 5-10](#) veranschaulicht.

Die richtige Ein- bzw. Ausleitung basiert auf einer konsequenten Namensgebung. Jede Komponente beinhaltet Ein- und Ausgänge. Diese können mit den zugehörigen Anschlusspunkten verbunden werden, wenn sie gleich benannt sind. Bei binären Ein- und Ausgängen eignet sich der Name aus der E/A-Liste. Gebündelte Ein- und Ausgänge werden nach der Baueinheit benannt.



Legende:

E1: Name des Eingangs

A1: Name des Ausgangs

⊗ Anschlusspunkt im Maschinenmodell

• Ein- bzw. Ausgang an einem Modul oder an einer Komponente

**Bild 5-10:** Einleitung eines Eingangs in eine Komponente und Ausleitung eines Ausgangs aus dieser Komponente



### **5.3 Verfahren zur Transformation**

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie anhand der in Kapitel 5.1 vorgestellten Engineeringdokumente die hierarchische Struktur und die Anbindung an die Steuerung aus Kapitel 5.2 automatisiert erstellt werden können.

#### **5.3.1 Modellierung der hierarchischen Struktur der Maschine**

Die Module und Komponenten werden nach der Definition der hierarchischen Struktur der Maschine aus Kapitel 5.2.1 erstellt. Sie sind daher aus der Referenzkennzeichnung ihrer Objekte nach der DIN EN-Norm 81346-1 /103/ abzuleiten.

Die Vergabe von Referenzkennzeichen findet im Normalfall bei der Elektrokonstruktion einer Montagemaschine statt. Die elektrischen Bauteile und Baueinheiten erhalten ein Referenzkennzeichen und sind mitsamt diesem in der Geräteliste erfasst.

Alle Ein- und Ausgänge binär kommunizierender Bauteile sind zudem in der E/A-Liste verzeichnet. Der Name eines Ein- und Ausgangs richtet sich, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, nach dem Referenzkennzeichen des nächstliegend elektrisch angeschlossenen Bauteils.

Um die Vollständigkeit gegenüber der Steuerung gewährleisten zu können, sollen alle Baueinheiten und Bauteile in den Komponenten abgebildet werden, die mit der Steuerung in Verbindung stehen (Kapitel 4.1.1.1). Dies bedeutet auch, dass keine Komponenten zu bilden sind, die für das Zusammenspiel zwischen der Steuerung und der Montagemaschine nicht relevant sind. Deshalb werden zur Erstellung von Komponenten und Modulen die Referenzkennzeichen aus der E/A-Liste und nicht die Referenzkennzeichen aus der Geräteliste herangezogen. Die Geräteliste beinhaltet jegliche elektrischen Bauteile. Wenn aus den Referenzkennzeichen der Geräteliste Komponenten erstellt werden, werden auch Komponenten gebildet, die nicht mit der Steuerung in Verbindung stehen. Diese Komponenten führen in der Maschine keine Funktion im Ablauf aus. Beispiele hierfür sind die Beleuchtung der Maschine oder ein Netzanschluss.

Durch die E/A-Liste liegt eine Dokumentation der Referenzkennzeichen für die binär kommunizierenden Bauteile vor. Hieraus können die Module und Komponenten für Bauteile gebildet werden. Für die Erstellung von Modulen und Komponenten für Bau-

einheiten muss auf eine weitere Dokumentation zurückgegriffen werden. Dies ist die Buskonfiguration. Durch die Verwendung der Buskonfiguration kann für die automatisierte Modellerstellung sichergestellt werden, dass alle mit der Steuerung in Verbindung stehenden Baueinheiten abgebildet werden. Eine Baueinheit ist direkt über den Feldbus oder über ein steuerungstechnisches Gerät mit der Steuerung verbunden. In jedem Fall existiert in der Buskonfiguration genau ein Anschlussgerät für genau eine Baueinheit (Kapitel 5.1.1). Da eine Komponente nur eine Baueinheit beinhaltet, wird für jedes Anschlussgerät, das eine Baueinheit an die Steuerung anbindet, eine Komponente erstellt.

### Unterscheidung zwischen Baueinheiten und Bauteilen

Die Erstellung einer Komponente hängt demgemäß davon ab, ob sie eine Baueinheit oder Bauteile beinhaltet. Bild 5-11 zeigt die zwei unterschiedlichen Erstellungsarten.

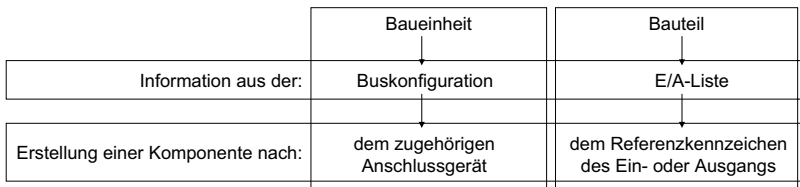


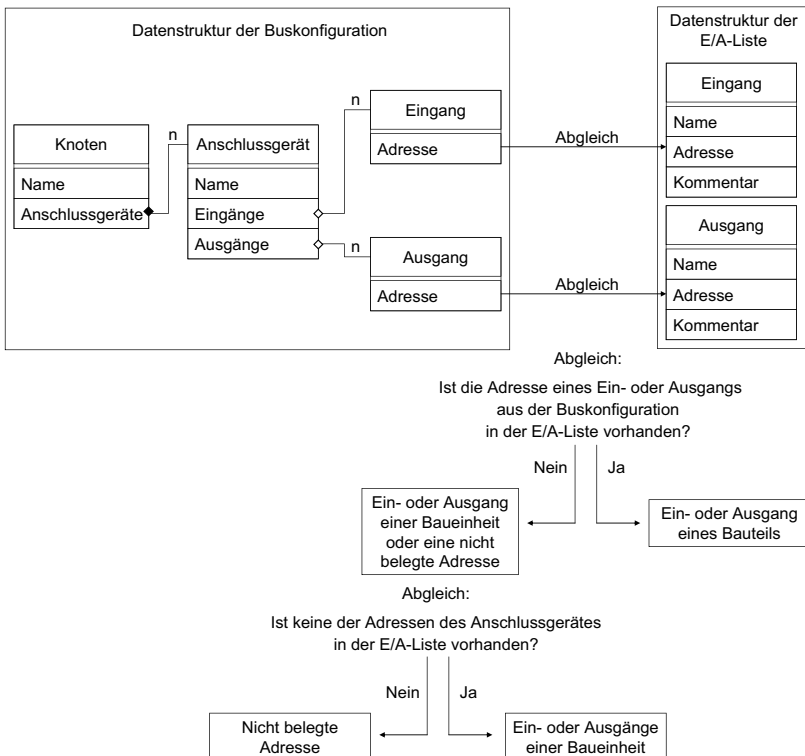
Bild 5-11: Unterscheidung in der Erstellung einer Komponente

Die Unterscheidung zwischen einer Baueinheit und einem Bauteil ist in den meisten Engineeringprozessen nicht explizit dokumentiert. Daher wird durch einen Abgleich der E/A-Liste mit der Buskonfiguration identifiziert, ob es sich um ein Bauteil oder um eine Baueinheit handelt.

In Bild 5-12 sind die Datenstrukturen der beiden Dokumente nochmals dargestellt. In den beiden Datenstrukturen ist das einzige sich überschneidende Attribut die Adresse eines Ein- oder Ausgangs. Eine Adresse kann entweder einem Bauteil oder einer Baueinheit zugeordnet werden oder nicht belegt sein. Eine nicht belegte Adresse ist frei. An ihr sind kein Bauteil und keine Baueinheit angeschlossen.

In der E/A-Liste sind die Adressen der Bauteile aufgelistet. In der Buskonfiguration sind alle Adressen aufgeführt. Der Abgleich basiert demzufolge auf der Fragestellung, ob eine Adresse eines Ein- oder Ausgangs aus der Buskonfiguration ebenfalls in der E/A-Liste vorhanden ist.

- Wenn dies zutrifft, handelt es sich bei der Adresse um einen Ein- oder Ausgang eines Bauteils. Wenn die Adresse nicht in der E/A-Liste zu finden ist, gehört die betrachtete Adresse zu dem Adressraum einer Baueinheit oder sie ist nicht belegt.
- Wenn keine der Adressen des Adressraums eines Anschlussgerätes in der E/A-Liste zu finden ist, kann es sich nicht um freie Adressen handeln. Denn sonst wäre ein Anschlussgerät am Feldbus angeschlossen, das keinen einzigen Ein- oder Ausgang anbindet. Daher muss ein Anschlussgerät, dessen gesamte Adressen nicht in der E/A-Liste vorkommen, eine Baueinheit an die Steuerung anbinden.



**Bild 5-12:** Unterscheidung zwischen den Ein- und Ausgängen von Bauteilen und Baueinheiten

Im Folgenden wird zuerst auf die Erstellung einer Komponente für Bauteile eingegangen. Danach wird die Erstellung von Komponenten für Baueinheiten erläutert.

### **Erstellung einer Komponente und eines Moduls für Bauteile**

Wenn ein Ein- oder Ausgang eines Bauteils identifiziert wird, werden eine Komponente und ein Modul auf Basis des Referenzkennzeichens des Ein- oder Ausgangs erstellt.

In der Datenstruktur der E/A-Liste steht das Referenzkennzeichen unter dem Attribut Name. Das Referenzkennzeichen eines Ein- oder Ausgangs entspricht dem nächstfolgend elektrisch angeschlossenen Bauteil. Basierend auf der DIN EN 81346-1 /103/ besteht das Referenzkennzeichen eines Bauteils aus mehreren Abschnitten. Die Abschnitte des Referenzkennzeichens sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

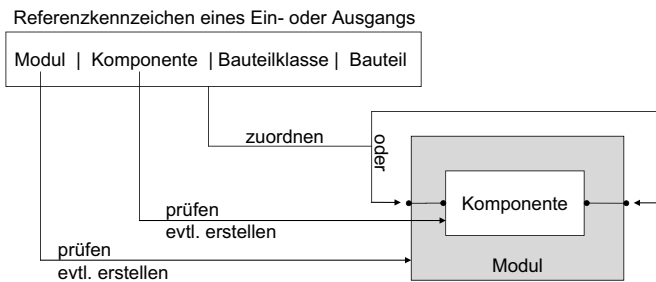
Bezeichnung im Modell der Struktur der Maschine	Referenz zur DIN EN 81346-1	Angabe im Referenzkennzeichen	Bemerkung
Modul	1. Untergliederung	Vorzeichen und Kennbuchstaben und/oder Nummer	Identifizierung der Module
Komponente	2. Untergliederung	Vorzeichen und Kennbuchstaben und/oder Nummer	Identifizierung der Komponenten
Bauteilklasse	Objektklasse	Kennbuchstabe aus dem Klassenschema der DIN EN 81346-2	Angabe der Bauteilklasse
Bauteil	Instanz	Kennbuchstaben oder Nummer	Optional, falls in einer Komponente mehrere Bauteile derselben Klasse vorhanden sind

Tabelle 1: Zusammensetzung eines Referenzkennzeichens für einen Ein- oder Ausgang in Anlehnung an DIN EN 81346-2 /104/

Ein Bauteil wird durch eine Objektklasse und eine Instanz beschrieben. Die Objektklassen sind in der DIN EN 81346-2 definiert /104/. Sie richten sich nach dem vorgesehenen Zweck oder der vorgesehenen Aufgabe eines Bauteils. Sind mehrere Bauteile mit dem gleichen Zweck und somit mit dem gleichen Kennbuchstaben nach der Norm 81346-2 in einer Komponente vertreten, ist eine zusätzliche Unterscheidung nach der Instanz erforderlich. Die Instanz identifiziert ein individuelles Objekt.

Für einen Ein- oder Ausgang sollte durch Kennbuchstaben oder eine Nummer kenntlich gemacht werden, wenn ein Bauteil mehrere Eingänge oder mehrere Ausgänge hat. Dies ist allerdings in der Norm nicht beschrieben.

Eine Komponente und ein Modul werden anhand des Referenzkennzeichens erstellt. Dazu sind die unternehmensspezifischen Kennbuchstaben oder Nummern für ein Modul und eine Komponente aus dem Referenzkennzeichen auszulesen. Voraussetzung ist die Identifikation der unterschiedlichen Abschnitte im Referenzkennzeichen (Tabelle 1). Dafür müssen zum einen die Aspekte bekannt sein, nach denen untergliedert wurde, um nach den richtigen Vorzeichen im Referenzkennzeichen zu suchen. Zum anderen muss die Angabe zur Bauteilklasse und zur Instanz eines Bauteils erkannt werden, damit diese nicht die Identifizierung der Kennbuchstaben oder Nummern für ein Modul und eine Komponente verfälscht.



**Bild 5-13:** Erstellen einer Komponente und eines Moduls für ein Bauteil

In Bild 5-13 sind die Abschnitte eines Referenzkennzeichens für einen Ein- oder Ausgang nochmals dargestellt. Zudem wird veranschaulicht, wie ein Modul und eine Komponente aus einem Referenzkennzeichen eines Ein- oder Ausgangs erstellt werden. Um alle Module und Komponenten zu erstellen, die aus Bauteilen bestehen, wird folgendes Verfahren angewandt:

- Es wird mit dem ersten Namen in der E/A-Liste begonnen. Für diesen Ein- oder Ausgang werden die Kennbuchstaben oder Nummern für das Modul und die Komponente aus dem Referenzkennzeichen ausgelesen. Daraufhin werden ein Modul und darin eine Komponente erstellt. Der Ein- oder Ausgang wird der Komponente zugewiesen.

- Für den zweiten und jeden weiteren Namen in der E/A-Liste wird geprüft, ob der Ein- oder Ausgang zu einer bereits bestehenden Komponente gehört.
- Falls dies zutrifft, wird der Ein- oder Ausgang dieser zugeordnet.
- Falls dies nicht zutrifft, wird eine neue Komponente erstellt. Für die neue Komponente besteht entweder bereits das zugehörige Modul, sodass die Komponente diesem untergeordnet werden kann, oder es wird ein neues Modul erstellt.

### Erstellung eines Moduls und einer Komponente für eine Baueinheit

Wenn keine Adresse eines Anschlussgerätes in der E/A-Liste zu finden ist, stellt der gesamte Adressraum des Anschlussgerätes die Ein- und Ausgänge einer Baueinheit dar. Für die Baueinheit wird eine Komponente erstellt. Für eine solche Komponente wird aufgrund der gekapselten Funktionalität einer Baueinheit ein eigenes Modul erstellt (Bild 5-14).

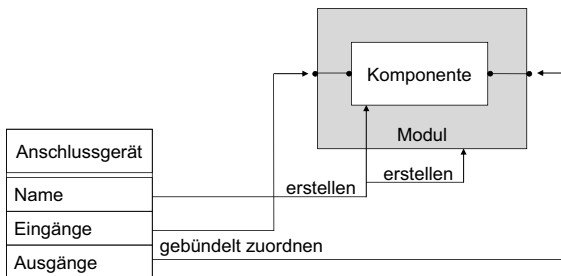


Bild 5-14: Erstellen einer Komponente und eines Moduls für eine Baueinheit

### 5.3.2 Modellierung der Anbindung an die Steuerung

Die Informationen aus den Engineeringdokumenten lassen sich vergleichsweise einfach und direkt in eine Modellierung der Anbindung an die Steuerung transformieren. Dies lässt sich damit begründen, dass die verwendeten Engineeringdokumente, die E/A-Liste und die Buskonfiguration, ihren Zweck gerade in der Dokumentation der Schnittstelle haben. Daher ist die Anbindung zur Steuerung ausreichend dokumentiert.

In Kapitel 5.2.2 wurde die Modellierung der Anbindung im Maschinenmodell in drei Aufgaben unterteilt.

Zu 1.: Die erste Aufgabe umfasst die Modellierung der Anschlusspunkte. Hierzu werden die Eingänge und die Ausgänge jeweils für ein Anschlussgerät zusammengefasst. Für die Modellerstellung bedeutet dies, dass für ein Anschlussgerät ein oder zwei Verteilerblöcke eingesetzt werden. Dies richtet sich danach, ob das Anschlussgerät nur Ein- oder Ausgänge oder Ein- und Ausgänge besitzt.

Die zur Modellierung benötigte Information, welche Anschlussgeräte vorhanden sind und welche Adressräume sie beanspruchen, kann einfach aus der Buskonfiguration ausgelesen werden (Bild 5-15).

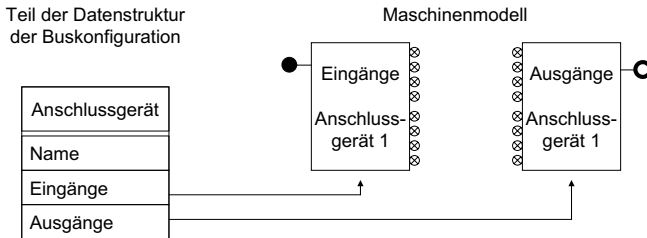
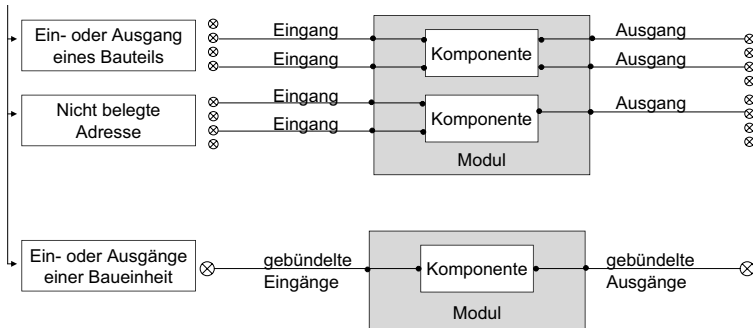


Bild 5-15: Transformation der Ein- und Ausgänge der Buskonfiguration in eine Modellierung der Anschlussgeräte

Auf einer Seite des Verteilerblocks befindet sich der zusammengefasste Ein- oder Ausgang für das Anschlussgerät. Auf der anderen Seite des Verteilerblocks sind die Anschlusspunkte für die Bauteile oder der gebündelte Anschlusspunkt für eine Baueinheit modelliert.

Zu 2.: Die Bündelung der Anschlusspunkte fällt unter die zweite in Kapitel 5.2.2 definierte Aufgabe. Zur Realisierung einer Bündelung ist es erforderlich, zu wissen, ob Bauteile oder eine Baueinheit an dem Anschlussgerät angebunden sind. Für diese Unterscheidung wird auf das Ergebnis des in Bild 5-12 vorgestellten Verfahrens, in dem die E/A-Liste mit der Buskonfiguration abgeglichen wird, zurückgegriffen. Die resultierende Modellierung wird in Bild 5-16 dargestellt. In dem Bild sind auch nicht belegte Adressen illustriert. Für sie wird ein Anschlusspunkt am Anschlussgerät erstellt. Es werden aber keine Signale ein- oder ausgeleitet.



**Bild 5-16:** Entscheidung über die Bündelung von Ein- und Ausgängen

Zu 3.: Die dritte Aufgabe zur Modellierung der Anbindung besteht aus der Einleitung der Eingänge zu den Komponenten und der Ausleitung der Ausgänge aus den Komponenten. Diese Modellierungsaufgabe kann durch eine konsequente Namensgebung automatisiert durchgeführt werden. Die Namensgebung ist bei Bauteilen und bei Baueinheiten unterschiedlich.

Die Namen der Ein- und Ausgänge von Bauteilen sind die Referenzkennzeichen aus der E/A-Liste. Die Namen der Module und der Komponenten entsprechen den Kennbuchstaben oder den Nummern aus den Referenzkennzeichen der Ein- und Ausgänge.

Gebündelte Ein- und Ausgänge, Module und Komponenten von Baueinheiten werden gemäß Kapitel 5.2.2 nach der Baueinheit bezeichnet. Die Namen der Baueinheiten sind jedoch nicht standardmäßig in einem Engineeringdokument angegeben. Der Name des Anschlussgerätes weist üblicherweise auf den Namen der Baueinheit hin. Daher wird der Name des Anschlussgerätes aus der Buskonfiguration anstatt dem Namen der Baueinheit zur Bezeichnung der Ein- und Ausgänge, Module und Komponenten verwendet.



#### **5.4 Zusammenfassung der Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine**

In Kapitel 5 wurde eine Methode zur automatisierten Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine erarbeitet. Die Methode basiert auf zwei Engineeringdokumenten, der E/A-Liste und der Buskonfiguration.

Um die hierarchische Struktur der Maschine abzuleiten, eignet sich die Referenzkennzeichnung nach der DIN EN 81346-1 /103/. Die Referenzkennzeichen werden bei dem Verfahren zur Transformation der E/A-Liste entnommen. Auf dieser Grundlage werden Module und Komponenten für Bauteile im Maschinenmodell erstellt. Baueinheiten werden zunächst durch einen Abgleich der beiden Engineeringdokumente identifiziert. Daraufhin werden Komponenten und Module für Baueinheiten anhand der Buskonfiguration erstellt. Durch das gezeigte Verfahren ist sichergestellt, dass für jedes Bauteil und jede Baueinheit, die in Verbindung mit der Steuerung stehen, im Maschinenmodell eine Komponente und ein übergeordnetes Modul erzeugt werden.

Zudem muss die Anbindung an die Steuerung im Maschinenmodell modelliert werden. Zur Anbindung sind die Anschlusspunkte und deren Weiterleitungen zu modellieren. Diese können anhand der Buskonfiguration automatisiert erstellt werden.

## **6 Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen**

Zur automatisierten Modellerstellung müssen neben dem Modell der Struktur der Maschine die Verhaltensmodelle erstellt werden. In Kapitel 6 wird die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Bauteile, die anhand von binären Signalen mit der Steuerung kommunizieren, hergeleitet. Diese Methode wurde bereits in Kufner et al. /105/ veröffentlicht.

Die Verhaltensmodelle für Baueinheiten sind als Bibliothekskomponenten konzipiert, d. h. sie müssen in einer Bibliothek vorhanden sein und sind dieser bei Bedarf zu entnehmen. Diese Konzeption begründet sich auf die nicht automatisiert zu erstellende Modellierung zum Lesen und Schreiben des Eingangs- und Ausgangsabbildes einer Baueinheit (Kapitel 4.3).

Zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Bauteile wird zuerst in Kapitel 6.1 eine Klassifikation der Komponenten vorgenommen. Die Klassifikation ist das Ergebnis der Analyse, wie das Verhalten von Komponenten zu modellieren ist. In Kapitel 6.2 werden relevante Informationen zur Modellierung des Verhaltens identifiziert und aufgezeigt, inwieweit Engineeringdokumente den Informationsbedarf decken können. In Kapitel 6.3 und 6.4 werden die Verhaltensmodelle gesondert nach den Klassen der Komponenten behandelt. Für beide Klassen werden Verhaltensmodelle definiert und ein Verfahren zur Transformation entwickelt.

### **6.1 Klassifikation des Verhaltens von Komponenten aus Bauteilen**

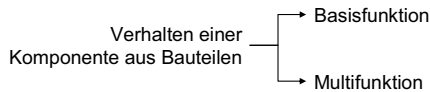
Das Verhalten von Bauteilen ist im Verband der Komponente stets darauf ausgerichtet, eine Funktion im gesamten Maschinenfunktionsablauf zu erfüllen. Demzufolge wird die Modellierung der Funktion einer Komponente betrachtet. Funktionen können hinsichtlich ihrer Modellierung im Maschinenmodell unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Daher sind die Komponenten bei der automatisierten Modellerstellung unterschiedlich zu behandeln. Um zweckmäßige Verfahren zur Modellierung entwickeln zu können, werden die Komponenten klassifiziert.

Im Allgemeinen setzen die Komponenten, die binär mit der Steuerung kommunizieren, einfache Funktionen um. Komplexere Funktionen werden im Montageprozess von Baueinheiten übernommen. Die Funktion von Bauteilen kann nur begrenzt sein, wenn man

in Betracht zieht, dass ein Ein- bzw. Ausgang eines Bauteiles, auch als Steuer- bzw. Statussignal bezeichnet, allein durch einen booleschen Wert bestimmt wird. Es wird daher für einen Aktor lediglich die Information übertragen, eine Aktion auszuführen oder nicht. Ein Sensor bestätigt oder verneint einen Zustand. Anhand dieser Möglichkeiten werden Aktoren und Sensoren in einer Weise kombiniert, dass sie einfache Funktionen ausführen und überwachen können. Die Ansteuerung ihrer Aktoren oder die Statusabfrage ihrer Sensoren benötigt nur wenige binäre Ein- und Ausgänge. Diese Funktionen werden in dieser Arbeit als Basisfunktionen definiert.

Wenn eine Komponente keine Basisfunktion umsetzt, werden die einzelnen Steuer- und Statussignale der Komponente betrachtet. Die Komponente ist dann der zweiten Klasse zuzuordnen. Diese Komponenten setzen Funktionen um, die als Multifunktionen bezeichnet werden.

Aus Sicht der Modellierung der Funktion einer Komponente ergeben sich, wie in [Bild 6-1](#) dargestellt, zwei Klassen. Die Basisfunktionen und die Multifunktionen werden im Folgenden näher erläutert.



**Bild 6-1:** Klassifikation von Komponenten nach der Modellierung ihrer Funktion

### **Klasse „Basisfunktion“**

In einer Montagemaschine setzt ein großer Anteil der Komponenten, die aus Bauteilen bestehen, jeweils eine Basisfunktion um. Der Anteil schwankt, liegt aber bei den meisten Montagemaschinen bei etwa 50 - 80%. Basisfunktionen sind bei Montagemaschinen häufig Zylinderbewegungen. Sie werden eingesetzt, um z. B. das Öffnen und Schließen eines Greifers, eines Vereinzlers oder auch das Heben und Absenken einer Hubplattform auszuführen.

Basisfunktionen müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- Eine Komponente realisiert eine Basisfunktion, sofern zum einen deren Ausgänge im direkten Wirkzusammenhang mit deren Eingängen, zumeist in pneumatischer, mechanischer oder elektrischer Kopplung stehen. Die technologische Umsetzung spielt jedoch für die Zuordnung einer Komponente zu einer Basisfunktion keine Rolle.
- Zum anderen wird gefordert, dass die Reaktionszeit der Ausgänge auf einen Flankenwechsel der Eingänge nur geringsten Schwankungen unterworfen ist.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, wird angenommen, dass das Verhalten deterministisch ist.

Es besteht keine Basisfunktion, wenn ein Ausgang mit einem Eingang über den Materialfluss verbunden ist, sodass die Bewegung oder das Vorhandensein des Werkstücks die Kopplung zwischen den Ein- und Ausgängen darstellt.

### **Klasse „Multifunktion“**

Die Komponenten, bei denen der Wirkzusammenhang einzelner Steuer- und Statussignale betrachtet wird, bilden die Klasse der Multifunktionen. Ihr werden alle Komponenten zugeordnet, die nicht den Basisfunktionen zugerechnet werden können.

Da Funktionen in der Konstruktion einer Montagemaschine auf eine produktspezifische Lösung zugeschnitten sind, können sie sehr vielfältig sein. Deshalb lassen sich die Multifunktionen nicht weiter klassifizieren. In Bezug auf die Modellierung der Funktionen stimmen Multifunktionen darin überein, dass sie keine festen Strukturen aufweisen und daher keine Muster angewandt werden können. Daher ist ihre individuelle automatisierte Modellierung notwendig.

Beispiele für typische Multifunktionen sind:

- Ein Steuer- und Statussignal einer Multifunktion ist z. B. ein Signal der Sicherheitstechnik. Hierbei werden Bauteile zur Bewerkstelligung der Sicherheit einer Montagemaschine verschaltet. Die Sicherheitsfunktion wird zumeist durch Sicherheitssteuerkreise realisiert, welche den Start der Maschine freigeben oder die Maschine im Notfall abschalten. Bei den Ausgängen der Komponente sind Sensoren zu modellieren, die die Stellung oder die Verriegelung von Türen, die Betätigung von Tastern

oder die Erreichbarkeit von Anschlüssen, wie z. B. den Feldbus, angeben. Die Eingänge entsprechen Signalen zur Ansteuerung von Lampen oder Anzeigen.

- Für eine einfache, einzelne Multifunktion wird oftmals nur ein Steuer- oder ein Statussignal in einer Komponente benötigt. Eine solche Multifunktion stößt z. B. eine nicht überwachte Aktion an oder prüft einen Zustand ab, ohne direkt mit dessen Ursache in Verbindung zu stehen.
- Ein Steuer- und Statussignal einer Multifunktion kann z. B. auch an eine Baueinheit angeschlossen sein. Baueinheiten besitzen neben der Kommunikation über herstellerspezifische Protokolle in manchen Fällen zusätzliche binäre Ein- und Ausgänge. Diese zeigen z. B. die Bereitschaft der Baueinheit zur Werkstückaufnahme an.

### Anbindung einer Komponente an das geometrische Modell

Es wird im Folgenden keine weitere Klassifikation in Bezug auf die Modellierung von Komponenten vorgenommen, aber eine wichtige Eigenschaft des Verhaltens von Komponenten aufgezeigt. Die Eigenschaft bezieht sich darauf, ob eine Komponente mit dem geometrischen Modell verbunden werden muss (Bild 6-2). Dies ist der Fall, wenn ein Wirkzusammenhang besteht, der sich aus Bewegungen und Interaktionen im Raum ergibt. Interaktionen zwischen Komponenten entstehen durch mechanische Kopplung oder durch physikalische Effekte. Ein Beispiel einer Interaktion durch einen physikalischen Effekt ist z. B. die aufeinander folgende Erzeugung von Vakuum an zwei Sauggreifern. Dadurch kann ein Werkstück, wie z. B. eine Nadel, übergeben werden. Die Bewegungen und Interaktionen im Raum werden im geometrischen Modell verarbeitet und visualisiert. Ursache für die Wirkzusammenhänge ist bei Montagemaschinen fast ausschließlich der Materialfluss. Deshalb dient der Materialfluss im Folgenden als Repräsentant für Bewegungen und Interaktionen im Raum.

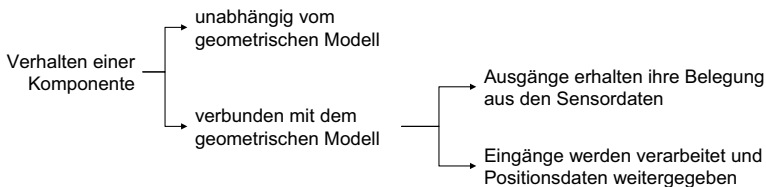


Bild 6-2: Komponente in Bezug auf die Anbindung an das geometrische Modell

Wenn ein Statussignal, d. h. ein Ausgang einer Komponente, mit dem geometrischen Modell verbunden ist, wird der boolesche Wert im geometrischen Modell ermittelt und an das Maschinenmodell zur Wertbelegung des Statussignals übergeben. Die übergebenen Werte werden nach Bild 2-9 als Sensordaten bezeichnet.

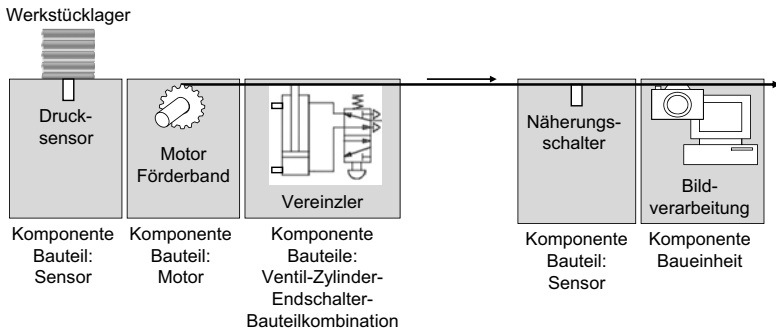
Wenn ein Steuersignal, d. h. ein Eingang einer Komponente, den Materialfluss beeinflusst, kann der Zustand im Maschinenmodell auch ohne die Weitergabe der Positionsdaten an das geometrische Modell berechnet werden. Trotzdem muss die Komponente mit dem geometrischen Modell verbunden werden. Die Aktoren beeinflussen mit Hilfe des Materialflusses die Sensoren im geometrischen Modell. Die Sensordaten werden wiederum an das Maschinenmodell übergeben. Daher muss die Wirkung des Aktors auf den Materialfluss im geometrischen Modell verarbeitet werden.

Sowohl Multifunktionen als auch Basisfunktionen können eine Anbindung an das geometrische Modell benötigen. Obwohl eine Basisfunktion eine in sich abgeschlossene und deterministische Funktion ausführt, kann sie den Materialfluss beeinflussen. Dann müssen die Positionsdaten der Basisfunktion ebenfalls an das geometrische Modell weitergeleitet werden.

### **Beispiel zum Verhalten von Komponenten aus Bauteilen**

Um die Klassifikation von Komponenten und deren Anbindung an das geometrische Modell zu verdeutlichen, wird das Beispiel aus Bild 6-3 herangezogen. Es zeigt einen Ausschnitt aus einem Montageprozess.

Die Werkstücke werden gelagert und dann einzeln auf einem Förderband zu einer Bildverarbeitungseinheit transportiert. Bevor die Werkstücke durch die Bildverarbeitung geprüft werden, wird durch den Näherungsschalter detektiert, wann ein Werkstück zugeführt wird.



**Bild 6-3:** Beispiel für Komponenten einer Montagemaschine (Vereinzelung /101/)

Ein Vereinzler am Förderband wird durch eine Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination realisiert, die einer Basisfunktion zuzuordnen ist. Die Kopplung zwischen der Ansteuerung des Ventils und der Schaltung der Endschalter wird als deterministisch angenommen.

Der Näherungsschalter am Förderband, der die vereinzelt Werkstücke detektiert, ist nicht mehr Teil der Basisfunktion. Seine Verbindung mit der Ansteuerung des Ventils kann durch den mittelbaren Zusammenhang über den Materialfluss nicht mehr als deterministisch angenommen werden. Der Näherungsschalter realisiert daher eine Multifunktion. Er verlangt eine Verbindung zum geometrischen Modell, da sein Sensorwert nur durch die Verarbeitung im geometrischen Modell ermittelt werden kann.

Multifunktionen werden ebenfalls vom Motor am Förderband und vom Drucksensor am Lager umgesetzt.

Der Motor wird nicht geregelt, sondern allein über einen binären Eingang mit der Bedeutung „ein“ und „aus“ angesteuert. Er wird mit dem geometrischen Modell verbunden, damit dort die konstante Bewegung des Förderbandes verarbeitet und visualisiert werden kann. Die Bewegung des Förderbandes wird zusammen mit dem Vereinzelungsvorgang der Basisfunktion an das geometrische Modell weitergeleitet. Dadurch kann dort die Position eines Werkstücks für den Näherungsschalter ermittelt werden.

Der Drucksensor muss nicht mit dem geometrischen Modell verbunden werden. Da das Lager immer gefüllt sein sollte, kann dessen Statussignal konstant ein gefülltes Lager anzeigen.

Die Bildverarbeitung wird durch eine Baueinheit realisiert und wird demzufolge nicht in diesem Kapitel behandelt.

## **6.2 Identifikation der relevanten Informationen in Engineeringdokumenten**

In Kapitel 6.1 wurde festgelegt, dass eine Komponente entsprechend ihrer Klasse modelliert wird. Zur Modellierung von Komponenten, die Basisfunktionen umsetzen, wird in Kapitel 6.2.1 geprüft, ob in heutigen Engineeringprozessen Engineeringdokumente erstellt werden, die Informationen über den Einsatz von Basisfunktionen enthalten.

Um Komponenten zu modellieren, die eine Multifunktion umsetzen, wird der Stromlaufplan der Elektrokonstruktion herangezogen. Die inhaltliche Relevanz des Stromlaufplans zu deren Modellierung wird in Kapitel 6.2.2 betrachtet.

Die in Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 betrachteten Dokumente werden zur automatisierten Erstellung der Verhaltensmodelle für Basisfunktionen und Multifunktionen herangezogen. In Kapitel 6.2.3 wird analysiert, welche Informationen zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen noch fehlen.

### **6.2.1 Unternehmensspezifische Dokumentation von Basisfunktionen**

Die in dieser Arbeit formulierte Definition der Basisfunktionen ist an eine Sichtweise auf Standardfunktionen bei Montagemaschinen angelehnt, die sich in vielen Engineeringprozessen wiederfinden lässt. Basisfunktionen repräsentieren elementare, unternehmensneutrale Funktionen. Ihre Integration in die Konstruktion führt zu einer individuellen Lösung, die die ingenieurstechnische Leistung darstellt.

Die Prozesse des heutigen Engineerings sind darauf ausgerichtet, mit Basisfunktionen effizient umzugehen, um deren mehrfache Konstruktion zu vermeiden. Effizienz lässt sich durch eine standardisierte Beschreibung des Einsatzes der Basisfunktionen in der Konstruktion erreichen. In einem zentralen Engineeringwerkzeug wird dann dokumen-



tiert, welche Basisfunktionen an welcher Stelle in einer Montagemaschine eingesetzt werden. Dies wird im Folgenden als Dokumentation der Basisfunktionen bezeichnet. Die Dokumentation besteht aus einer Zuordnung von Instanzen einer Basisfunktion zu Komponenten bzw. zu deren Ein- und Ausgängen.

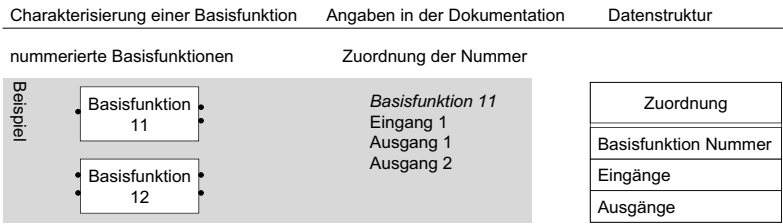
Im Engineeringprozess findet die Dokumentation der Basisfunktionen vor allem in der Steuerungsprogrammierung Anwendung. Dort haben die Basisfunktionen in vielen Engineeringprozessen bereits ein Pendant. In der Regel stellt ein Funktionsbaustein zur Steuerungsprogrammierung die Ansteuerung und Abfrage für alle Basisfunktionen bereit. Der Funktionsbaustein wird für alle Basisfunktionen anhand der Dokumentation der Basisfunktionen konfiguriert.

Es existiert kein allgemein verbreitetes, unternehmensübergreifendes Standardformat zur Dokumentation der Basisfunktionen. Wesentlich für die Verwendung zur automatisierten Modellerstellung ist, dass durch die Dokumentation der Basisfunktionen eine Zuordnung von Basisfunktionen zu den Komponenten deutlich wird und diese Information aus dem Engineeringwerkzeug extrahiert werden kann.

### **Möglichkeiten zur Dokumentation der Basisfunktionen**

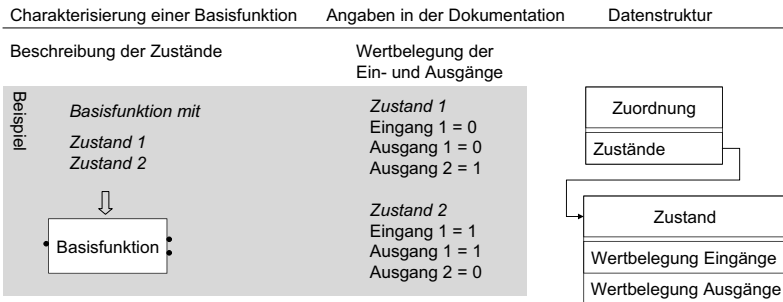
Es wird anhand zweier Beispiele veranschaulicht, wie die Dokumentation der Basisfunktionen aufgebaut sein kann. Im Beispiel aus [Bild 6-4](#) wird die Basisfunktion durch eine Nummer und im Beispiel aus [Bild 6-5](#) durch deren mögliche Zustände charakterisiert.

Bild 6-4 illustriert eine Dokumentationsweise, in der die Basisfunktionen fest vorgegeben sind. Sie sind dokumentiert und unter einer Nummer gespeichert. Die Dokumentation der Basisfunktionen besteht aus den Zuordnungen einer Nummer zu den Ein- und Ausgängen einer Komponente. Wenn die Basisfunktion mehrere Eingänge oder mehrere Ausgänge besitzt, muss es möglich sein, diese den Ein- und Ausgängen der Komponente über eine standardisierte Dokumentationsweise zuzuweisen.



**Bild 6-4:** Dokumentation der Basisfunktionen anhand von Nummern

Bild 6-5 zeigt eine andere mögliche Dokumentationsweise. Die Basisfunktionen sind nicht fest vorgegeben, sondern erschließen sich aus der Beschreibung der Zustände. Zustände werden durch die Angabe der Belegung der Ein- und Ausgänge mit booleschen Werten, die während des Zustandes vorliegen, beschrieben. Da bei einer Basisfunktion die Belegung der Ausgänge deterministisch auf die Belegung der Eingänge folgt, lassen sie sich eindeutig über ihre Zustände charakterisieren.



**Bild 6-5:** Dokumentation der Basisfunktionen anhand der Zustände

Es ist allerdings möglich, dass in einem Engineeringprozess keine Basisfunktionen im Sinne von Standardfunktionen definiert sind. Wenn keine Dokumentation der Basisfunktionen vorhanden ist, muss zur automatisierten Erstellung ihrer Verhaltensmodelle eine alternative Informationsquelle herangezogen werden. Diese wird in Kapitel 6.3.2 hergeleitet.

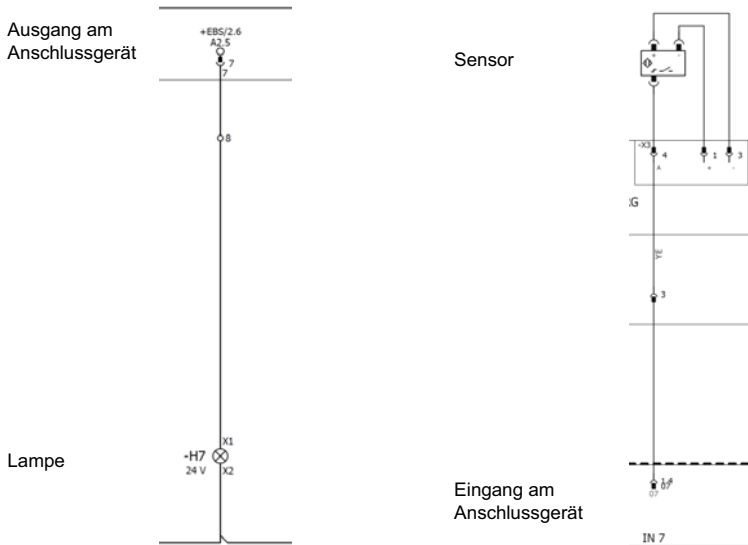
## 6.2.2 Stromlaufplan

Der Stromlaufplan der Elektrokonstruktion gibt die elektrische Verbindung aller Baueinheiten und Bauteile an. Eine elektrische Verbindung im Stromlaufplan dient der Stromversorgung von Bauteilen und Baueinheiten oder überträgt die Signale der Steuerung zur Schaltung eines Bauteils oder einer Baueinheit. Letzteres ist für die Modellierung des Verhaltens relevant.

### Darstellung der Multifunktionen im Stromlaufplan

Die binären Ein- und Ausgänge der Basis- und der Multifunktionen sind als Anschlüsse an den Anschlussgeräten im Stromlaufplan dargestellt. Nach der Klassifikation der Komponenten in Kapitel 6.1 übernehmen die Multifunktionen z. B. einfache, einzelne Funktionen oder gehören der Sicherheitstechnik an.

Einfache, einzelne Funktionen besitzen keine oder eine geringe Verschaltung im Stromlaufplan. Beispiele sind die in [Bild 6-6](#) dargestellten Bauteile. Links in Bild 6-6 ist ein binärer Ausgang eines Anschlussgerätes zu sehen. Der Ausgang schaltet eine Lampe. Rechts ist ein binärer Eingang eines Anschlussgerätes dargestellt, dessen Wert von dem angebandenen Sensor bestimmt wird. Die zwei oben am Sensor angeschlossenen Verbindungen dienen zur Stromversorgung des Sensors. Wie der Sensor würde auch der Näherungsschalter oder die Endschalter des Vereinzlers aus Bild 6-3 in einem Stromlaufplan dargestellt werden.



**Bild 6-6:** Ausschnitt eines Ausgangs und eines Eingangs aus einem Stromlaufplan /105/

Bauteile, die Funktionen der Sicherheitstechnik realisieren, sind stärker verschaltet. Es kommen vermehrt Reihen- und Parallelschaltungen als auch Schütze zum Einsatz. Zur Schaltung eines Bauteils über ein Schütz wird eine Spule bestromt, die den Kontakt zum Bauteil schließt.

### Extraktion der Informationen aus dem Stromlaufplan

Im Stromlaufplan werden die elektrischen Funktionen durch genormte Symbolfunktionen dargestellt. Ein Bauelement, wie zum Beispiel ein Sensor, eine Spule, ein Schließer oder ein Anschluss, wird durch ein graphisches Zeichen der Symbolfunktion im Stromlaufplan repräsentiert. Manche Bauelemente stellen allein ein Bauteil dar, andere nur im Verbund. Das Bauelement „Spule“ und ein oder mehrere Bauelemente „Schließer“ bilden z. B. zusammen das Bauteil „Schütz“. Die Bauelemente, die zu einem Bauteil gehören, können durch ihre Referenzkennzeichnung erkannt werden. Das Referenzkennzeichen, die Symbolfunktion und weitere Informationen über das Bauelement werden im Stromlaufplan gespeichert.

Um die Informationen aus dem Stromlaufplan zu extrahieren, kann mit einer Programmierschnittstelle auf das zur Erstellung des Stromlaufplanes eingesetzte Werkzeug zugegriffen werden. Dies verlangt jedoch eine werkzeugspezifische Implementierung. Um werkzeugübergreifend Stromlaufpläne auswerten zu können, wird der Stromlaufplan in Form einer Verbindungsliste aus dem Werkzeug exportiert. Die Verbindungsliste ist in der DIN EN Norm 61082-1 /107/ als Dokumentart benannt und erhält dadurch allgemeine Gültigkeit.

### **Die Datenstruktur der Verbindungsliste**

Die Verbindungsliste ist eine Tabelle, die in jeder Zeile eine Verbindung auflistet. Eine Verbindung gründet auf einer elektrischen Verbindung von Bauelementen, einem Quell- und einem Zielelement, im Strompfad. Welche Informationen über ein Quell- und ein Zielelement in der Verbindungsliste enthalten sind, kann durch einen benutzerdefinierten Export festgelegt werden. Relevante Informationen über ein Bauelement sind der Name, die Anschlussbezeichnung, der Potenzialtyp der Verbindung und die Symbolfunktion.

- Der Name entspricht dem Referenzkennzeichen des Bauelements.
- Die Anschlussbezeichnung gibt den Anschluss an einem Bauelement an. Wichtig ist, dass die meisten Bauelemente zwei Anschlüsse besitzen, wobei meistens der eine oben und der andere unten das Zeichen der Symbolfunktion des Bauelements an weitere Bauelemente anbindet.
- Der Potenzialtyp einer Verbindung gibt Auskunft über den Zweck einer Verbindung. Zur Schaltung der Bauelemente sind die Außenleiter „L“ relevant. Schutzleiter werden mit „PE“ bezeichnet und der Stromversorgung dienen Leiter des Potentialtyps „-“ und „+“.
- Eine Symbolfunktion ist eine genormte Funktion, die durch das Zeichen der Symbolfunktion graphisch im Stromlaufplan repräsentiert wird.

Bild 6-7 zeigt die zur Extraktion des Stromlaufplanes gewählte Datenstruktur für die Verbindungsliste.

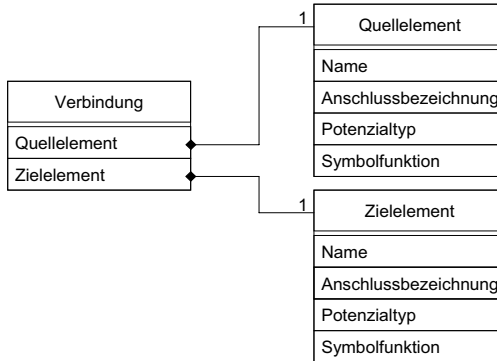


Bild 6-7: Datenstruktur für die Verbindungsliste

Ein Vorteil der Verwendung einer Verbindungsliste ist, dass die Symbolfunktion durch eine genormte Bezeichnung der Funktion angegeben wird. Die Symbolfunktionen sind daher maschinell verwertbar. Daher muss die Symbolfunktion nicht aus graphischen Elementen ermittelt oder einzelne Teilelemente durch ein Gruppierungsverfahren zu einer Symbolfunktion zusammengesetzt werden.

### 6.2.3 Informationsdefizit und weitere Engineeringdokumente

Im Folgenden wird das Informationsdefizit beschrieben, das bei der automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten besteht. Darauf aufbauend werden weitere Engineeringdokumente in Bezug darauf bewertet, ob sie das Informationsdefizit verringern können. Als Informationsquellen sollen alle bei der Konstruktion von Montagemaschinen üblicherweise erstellten Engineeringdokumente in Betracht gezogen werden.

### **6.2.3.1 Informationsdefizit**

Die zu modellierenden Komponenten wurden in Kapitel 6.1 in die Klasse der Basis- und die der Multifunktionen unterteilt und danach unterschieden, ob sie an das geometrische Modell angebunden werden müssen oder nicht. Anhand dieser Untergliederung wird das Informationsdefizit erarbeitet.

#### **Informationsdefizit in Bezug auf die Basisfunktionen**

Wenn der Einsatz der Basisfunktionen in einer Dokumentation der Basisfunktionen festgehalten wird, ist der entscheidende Informationsbedarf gedeckt. Wenn keine Dokumentation der Basisfunktionen im Engineeringprozess erstellt wird, kann auf ein alternatives Verfahren zur Auswahl von Basisfunktionen für Komponenten zurückgegriffen werden. Dies wird in Kapitel 6.3.2 vorgestellt.

#### **Informationsdefizit in Bezug auf die Multifunktionen**

Der Stromlaufplan bildet die Informationsquelle für die Modellierung der Multifunktionen. Relevante Informationen sind die Darstellung aller binären Ein- und Ausgänge an den Anschlussgeräten und deren elektrische Verbindung mit einem oder mehreren Bauelementen.

Nicht dokumentiert sind im Stromlaufplan die mechanischen Wirkzusammenhänge zwischen Aktoren und Sensoren, denn nicht-elektrische Wirkketten sind nicht Bestand des Stromlaufplans. Wenn ein im Stromlaufplan dargestellter Motor ein Förderband antreibt und ein Sensor, wie in Bild 6-6, die Position von Werkstücken am Förderband detektiert, wird dieser Zusammenhang nicht dokumentiert. Dies gilt ebenso für Ein- und Ausgänge, die einer Basisfunktion angehören. Wird eine Basisfunktion z. B. durch eine Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination realisiert, sind an Ausgängen im Stromlaufplan Ventile angeschlossen und an Eingängen befinden sich Sensoren. Dass diese Bauteile eine gemeinsame Bewegung initiieren und überwachen, wird aus dem Stromlaufplan nicht ersichtlich. Daher wird für die Ein- und Ausgänge, die einer Basisfunktion zuzuordnen sind, auf die Dokumentation der Basisfunktionen zurückgegriffen.

Weitere Informationsdefizite bezüglich des Stromlaufplans liegen in folgenden Punkten:

- Wenn eine Funktion nicht durch eine Symbolfunktion repräsentiert werden kann, wird im Stromlaufplan ein Gerät, dargestellt durch einen Gerätekasten, eingesetzt. Geräte sind entweder Baueinheiten oder sie stellen Hilfsfunktionen, z. B. zur Stromversorgung oder Kommunikation, bereit. Geräte sind für die Steuer- und Statussignale von Bedeutung, die einen binären Anschluss an einer Baueinheit besitzen. Der binäre Anschluss wird mit der Symbolfunktion „Geräteanschluss“ angezeigt. Demzufolge ist nicht bekannt, um welches Gerät es sich bei einem Geräteanschluss handelt. Es besteht keine normierte, maschinenauslesbare Beschreibung eines Gerätes im Stromlaufplan. Bild 6-8 zeigt ein Beispiel zweier binärer Anschlüsse an einer Baueinheit. Die Ausgänge dienen zum Start der Mengendosierung und des Dauerbetriebs des Dosiersystems. Diese Informationen sind maschinell nicht auslesbar. In der Verbindungsliste erscheint für die Symbolfunktion des Zielelements nur „Geräteanschluss“.
- Zur Gewährleistung der Sicherheit in einer Montagemaschine werden Bauelemente verschaltet, um alle relevanten Ein- und Ausgänge im Sicherheitssteuerkreis zu integrieren. Ein Informationsdefizit besteht dann, wenn der Sicherheitssteuerkreis nicht durch Bauelemente, sondern durch den Einsatz eines Sicherheitsmoduls umgesetzt wird. Ein Sicherheitsmodul realisiert die Logik der Verschaltung durch eine Softwarelösung. Die Logik ist dann nicht mehr im Stromlaufplan dokumentiert.
- Ein weiteres Defizit kann durch eine nachlässige Integration des Stromlaufplans in die ihn umgebende Dokumentenlandschaft entstehen. Die Referenzkennzeichnung eines Ein- oder Ausganges aus der E/A-Liste stimmt oft nicht mit der Referenzkennzeichnung eines Bauelements im Stromlaufplan überein. Somit hat die Suche eines Ein- oder Ausganges einer Komponente im Stromlaufplan keinen Anhaltspunkt.



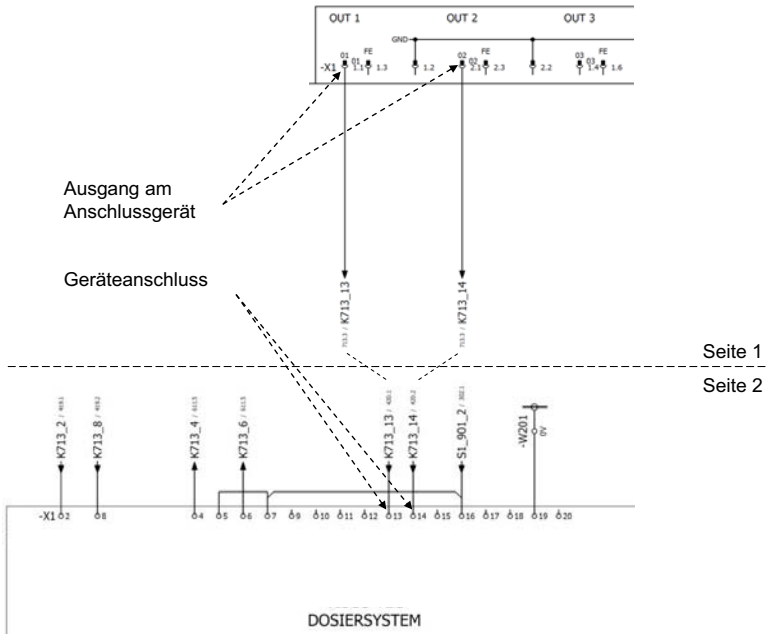


Bild 6-8: Ausschnitt zweier Geräteanschlüsse aus einem Stromlaufplan /108/

### Informationsdefizit in Bezug auf die Anbindung an das geometrische Modell

Bei der Anbindung an das geometrische Modell besteht das größte Informationsdefizit. In keinem der üblicherweise erstellten Engineeringdokumente ist die Auswirkung einer Aktion einer Basisfunktion oder eines einzelnen Steuersignals auf den Materialfluss dokumentiert. Es wird auch nicht gekennzeichnet, welche Statussignale mit dem Materialfluss in Verbindung stehen. Mögliche Informationsquellen wären der Stromlaufplan und das 3D-CAD Modell. Es wurde bereits beschrieben, dass die Wirkzusammenhänge zwischen Aktoren und Sensoren nicht Bestandteil der Informationen des Stromlaufplanes sind. Auf die Möglichkeiten zur Informationsbereitstellung durch das 3D-CAD Modell wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

### 6.2.3.2 Engineeringdokumente ohne relevanten Informationsbeitrag

Bei der Entwicklung einer Montagemaschine wird im Normalfall in der Elektrokonstruktion der Stromlaufplan und in der Mechanikkonstruktion ein 3D-CAD-Modell der Maschine sowie ein Fluidplan erstellt. Folgend werden, nachdem der Stromlaufplan bereits betrachtet wurde, die beiden Dokumente der Mechanikkonstruktion in Bezug auf ihren Beitrag zur Reduktion des Informationsdefizits geprüft. Der Informationsbedarf zur Anbindung von Komponenten an das geometrische Modell steht hierbei im Mittelpunkt.

#### Das 3D-CAD-Modell

Das 3D-CAD-Modell enthält die Volumenkörper der Baueinheiten und Bauteile sowie deren örtliche Relation in einem Koordinatensystem. Neue Forschungsarbeiten streben an, auf Basis dieser Informationen die mechanische Wirkkette zu generieren /91/, /97/.

Für die Modellierung von Steuersignalen, die eine Bewegung initiieren, und Statussignalen, die eine Bewegung überwachen, könnte die mechanische Wirkkette von Nutzen sein. Bild 6-9 greift das Beispiel eines Förderbandes aus Bild 6-3 nochmals auf, aber reduziert auf die Komponenten, die auf den Materialfluss wirken.

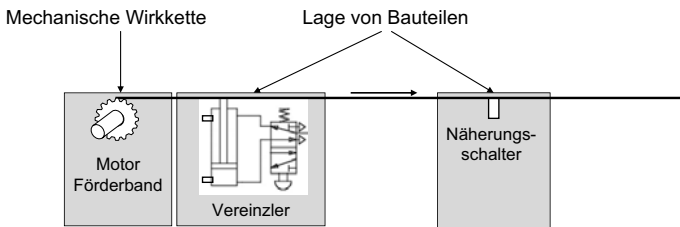


Bild 6-9: Beispiel für Komponenten, die auf den Materialfluss wirken (Vereinzer /101/)

Wenn aus dem 3D-CAD-Modell die mechanische Wirkkette generiert werden kann, dann ist bekannt, dass die Rotationsbewegung des Motors eine lineare Bewegung des Förderbandes bewirkt.

Weiterhin könnte dann aus der örtlichen Relation von Bauteilen im 3D-CAD-Modell die Lage von Bauteilen erschlossen werden.

Um zu erkennen, dass die Bauteile mit der Steuerung in Verbindung stehen, müssten die Informationen mit dem Stromlaufplan verbunden werden. Das Steuersignal des Motors muss dem Motor in der mechanischen Wirkkette zugeordnet werden. Zudem muss die Repräsentation der Bauteile des Vereinzlers und des Näherungsschalters im Stromlaufplan aufgefunden werden. Dies ist dann möglich, wenn die Kennzeichnungen der Bauteile in der Mechanik- und in der Elektrokonstruktion übereinstimmen.

Jedoch kann trotz der Informationen aus der mechanischen Wirkkette, der Lage der Bauteile und der Anbindung der Bauteile an die Steuerung das Informationsdefizit bezüglich des Materialflusses aus folgenden zwei Gründen nicht gedeckt werden:

Da der Vereinzler und der Sensor das Förderband nicht berühren, sind sie erstens nicht in die mechanische Wirkkette mit einbezogen. Daher kann kein Wirkzusammenhang zwischen den Bauteilen aufgedeckt werden.

Zweitens ist nicht bekannt, dass ein Ein- und Ausfahren des Zylinders des Vereinzlers ein Werkstück auf das Förderband versetzt.

Die mechanische Wirkkette leistet demzufolge keinen entscheidenden Beitrag zur Lösung des Informationsdefizits bei der Modellierung des Materialflusses.

## **Der Fluidplan**

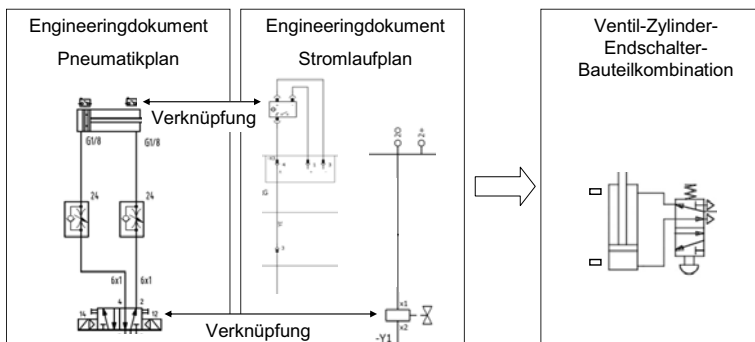
Der Fluidplan beschränkt sich bei den meisten Montagemaschinen auf einen Pneumatikplan, da die Wirkketten kaum durch hydraulische Wirkprinzipien realisiert werden. Im Pneumatikplan einer Montagemaschine sind vor allem Ventile verzeichnet, die an pneumatische Zylinder angeschlossen sind.

Anhand der Analyse von Montagemaschinen und deren Pneumatikplänen hat sich gezeigt, dass die pneumatisch erzeugten Bewegungen die Grundlage für die meisten Basisfunktionen darstellen. Die häufigsten Basisfunktionen beruhen auf dem logischen Verhalten einer Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination. Die Basisfunktionen unterscheiden sich dadurch, dass sie die Logik des Verhaltens beispielsweise eines mono- oder bistabilen Zylinders oder zweier, parallel angesteuerter Zylinder abbilden. Eine

Basisfunktion kann aber auch eine andere Logik abbilden. Ein Beispiel ist die Erzeugung eines Vakuums durch ein Ventil und dessen Überprüfung durch Drucksensoren. Eine solche Funktion kann z. B. zur Betätigung eines Sauggreifers dienen.

Der Pneumatikplan bietet keinen zusätzlichen Informationsbeitrag, da Funktionen, die auf pneumatischem Verhalten basieren, den Basisfunktionen zugeordnet werden. Durch die Definition von Basisfunktionen können pneumatische Funktionen anhand der in dieser Arbeit entwickelten Methode automatisiert modelliert werden.

Falls zur automatisierten Modellerstellung keine Basisfunktionen verwendet werden sollen, können die Informationen, welche durch die Basisfunktionen vorliegen, auch durch eine Verknüpfung der Inhalte des Pneumatikplans mit denen des Stromlaufplans gewonnen werden (Bild 6-10). Ausgänge an Anschlussgeräten müssen den richtigen Ventilen im Pneumatikplan zugeordnet und die im Pneumatikplan verzeichneten Sensoren im Stromlaufplan wiedergefunden werden. Dies ist möglich, wenn die Kennzeichnung der Bauteile in den Plänen übereinstimmt und der Pneumatikplan maschinell auslesbar ist, d. h. nicht als Zeichnungsdatei vorliegt.



**Bild 6-10:** Verknüpfung der Informationen des Pneumatikplans mit denen des Stromlaufplans (Vereinzier /101/)

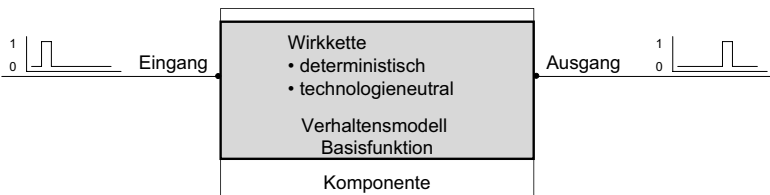
Die beiden Engineeringdokumente der Mechanikkonstruktion werden nicht in die automatisierte Modellerstellung einbezogen, da sie zum Lösungskonzept keinen relevanten Beitrag leisten können.

### 6.3 Verhaltensmodelle für Basisfunktionen

In diesem Kapitel wird die automatisierte Modellerstellung für Komponenten aufgezeigt, die der Klasse der Basisfunktionen zuzuordnen sind. Zuerst wird in Kapitel 6.3.1 definiert, wie das Verhalten modelliert wird. Im darauf folgenden Kapitel 6.3.2 wird das Verfahren erläutert, wie die Basisfunktionen ausgewählt und die Verhaltensmodelle den Komponenten im Modell der Struktur der Maschine zugeordnet werden.

#### 6.3.1 Definition der Verhaltensmodelle

Bei einem Verhaltensmodell für eine Basisfunktion handelt es sich um die Abbildung einer Wirkkette, die einen deterministischen Zusammenhang von Eingängen zu Ausgängen darstellt. Der Zusammenhang der Ein- und Ausgänge ist technologieneutral, d. h. es spielt keine Rolle durch welche Technologie das Verhalten realisiert wird. Zusammengefasst ist dies in [Bild 6-11](#) illustriert.



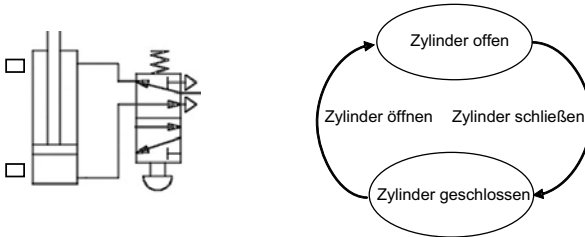
**Bild 6-11:** Illustration eines Verhaltensmodells für eine Basisfunktion

#### Modellierung der Verhaltensmodelle für Basisfunktionen

Die Anforderung, die an die Modellierung der Verhaltensmodelle für Bauteile gestellt wird, ist, dass sie die Modellierungstiefe II erfüllen sollen (Kapitel 4.2). Die Modellierungstiefe II entspricht einer logischen Modellierung mit Berücksichtigung des Zeitverhaltens.

Da für die Basisfunktionen ein deterministisches Verhalten angenommen wird und sie zustandsbasierte Systeme darstellen, bieten sich für ihre logische Modellierung Zustandsgraphen an. Das Zeitverhalten wird integriert, indem die Reaktionszeit die Dauer

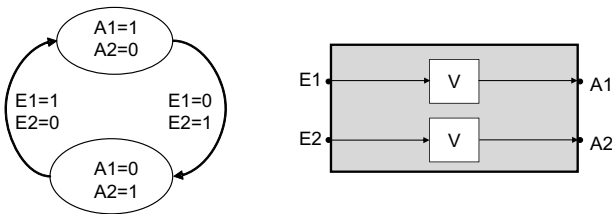
eines Zustandsübergangs darstellt. Der Zustandsgraph einer Ventil-Zylinder-Endschalter-Kombination ist in Bild 6-12 veranschaulicht.



**Bild 6-12:** Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination /101/ und technologiebezogener Zustandsgraph

Bild 6-13 zeigt den zugehörigen technologieneutralen Zustandsgraph für die Basisfunktion. Die Basisfunktion definiert sich durch die im Zustandsgraphen dargestellte logische Wirkkette. Sie repräsentiert somit in gleicher Weise andere technische Umsetzungen derselben Logik.

Für jede Basisfunktion wird ein Modell eines Zustandsgraphen erstellt. Die Modelle der Zustandsgraphen werden als Bibliothekselemente in der Bibliothek des Simulationstools abgelegt.



Legende:

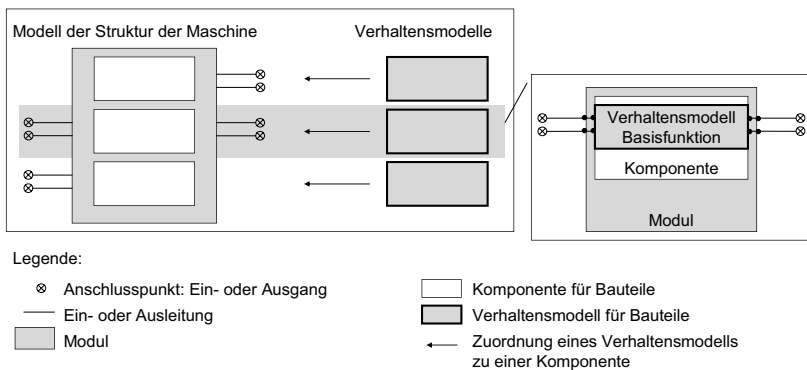
- E Eingang
- A Ausgang
- V Verzögerung bzw. Dauer des Zustandsübergangs

**Bild 6-13:** Technologieneutraler Zustandsgraph und zugehöriges Bibliothekselement

Basisfunktionen sind einfach und unternehmensneutral. In diesem Aspekt unterscheiden sich die Zustandsgraphen für Basisfunktionen von den unternehmensspezifischen Bibliotheksbausteinen für Komponenten oder Module in Baukästen /50/, /56/, /84/.

### Beziehung zwischen einer Basisfunktion, einem Verhaltensmodell und einer Komponente

Für jede Basisfunktion, also für jeden logischen Zusammenhang von Ein- und Ausgängen, existiert ein Bibliothekselement. Wenn die Ein- und Ausgänge einer Komponente den logischen Zusammenhang einer Basisfunktion aufweisen, wird das entsprechende Bibliothekselement der Komponente zugeordnet. Wenn die unbenannten Ein- und Ausgänge des Bibliothekselements mit den Referenzkennzeichen der Ein- und Ausgänge der Komponente benannt werden, entsteht eine Instanz eines Bibliothekselementes, ein Verhaltensmodell. Das Verhaltensmodell für eine Basisfunktion gehört dann zu einer individuellen Komponente im Modell der Struktur der Maschine ([Bild 6-14](#)).



**Bild 6-14:** Integration des Verhaltensmodells für eine Basisfunktion in eine Komponente

### 6.3.2 Verfahren zur Transformation

In diesem Abschnitt wird die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten der Klasse der Basisfunktionen beschrieben. In Anbetracht der Definition von Basisfunktionen und deren Modellierung in Bibliothekselementen handelt es sich

bei der automatisierten Erstellung um eine automatisierte Auswahl und Instanziierung einer Basisfunktion. Die Herausforderung besteht darin zu erkennen, welche Komponenten im Modell der Struktur der Maschine eine, und wenn ja welche, Basisfunktion umsetzen.

### **Informationsbasis für das Verfahren zur Transformation**

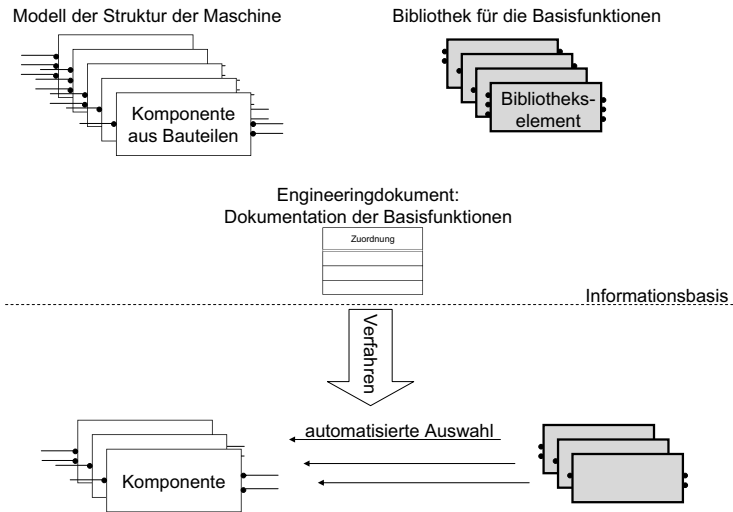
Ausgangspunkt des Verfahrens sind die Komponenten im Modell der Struktur der Maschine. Eine Basisfunktion können der Definition nach nur Komponenten umsetzen, die aus Bauteilen bestehen. Die Informationen, die aus dem Modell der Struktur der Maschine für eine Komponente aus Bauteilen vorliegen, sind ihre Ein- und Ausgänge mitsamt ihrer Referenzkennzeichnung und ihr daraus abgeleiteter Name (Kapitel 5.2.1 und 5.3.1). Da die Komponente bisher leer ist und die Ein- und Ausgänge und deren Referenzkennzeichen das eigentliche Identifikationsmerkmal darstellen, sind allein diese bei der Auswahl und Instanziierung einer Basisfunktion relevant.

Nach dem Lösungskonzept sollen zur automatisierten Modellerstellung Engineeringdokumente eingelesen und diese anhand des Verfahrens zur Transformation verarbeitet werden (Kapitel 4.3). Im Falle der Erstellung von Verhaltensmodellen für Basisfunktionen bilden das Modell der Struktur der Maschine und die Bibliothekselemente für die Basisfunktionen bereits eine Informationsbasis. Diese wird um das einzulesende Engineeringdokument, die Dokumentation der Basisfunktionen, ergänzt. Wie bei der Einführung der Dokumentation der Basisfunktionen in Kapitel 6.2.1 erwähnt wird, kann es sein, dass in einem Engineeringprozess keine Basisfunktionen im Sinne von Standardbewegungen definiert sind und ihr Einsatz in einer Maschine daher auch nicht dokumentiert ist. In diesem Fall wird ein alternatives Verfahren benötigt. Im Folgenden werden zwei Verfahren vorgestellt. Das primäre Verfahren basiert auf einer Dokumentation der Basisfunktionen. Es ist in [Bild 6-15](#) illustriert. Wenn keine Dokumentation der Basisfunktionen zur Verfügung steht, wird ein alternatives Verfahren angewandt, das eine teilautomatisierte Auswahl der Basisfunktionen ermöglicht.

### **Verfahren zur automatisierten Auswahl von Basisfunktionen**

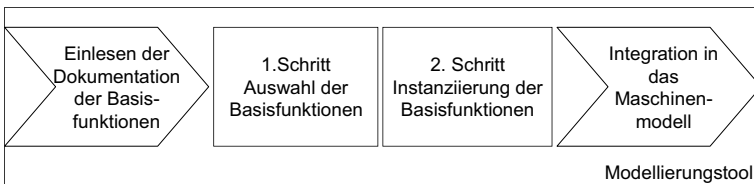
Bild 6-15 veranschaulicht, dass auf Basis des Modells der Struktur der Maschine, der Bibliothek für Basisfunktionen und der Dokumentation der Basisfunktionen ein entsprechendes Bibliothekselement für eine Komponente automatisiert ausgewählt wird.





**Bild 6-15:** Verfahren zur automatisierten Auswahl von Basisfunktionen

Die Dokumentation der Basisfunktionen ist unternehmensspezifisch. Eine Implementierung des Verfahrens kann daher nicht allgemeingültig vorgestellt werden. Wesentlich für die Dokumentation der Basisfunktionen ist nach Kapitel 6.2.1, dass sie den Einsatz von Basisfunktionen in einer Montagemaschine beschreibt. Somit ist eine Zuordnung von Basisfunktionen zu den Ein- und Ausgängen einer Komponente möglich. Auf dieser Grundlage kann das in **Bild 6-16** gezeigte prinzipielle Verfahren beschrieben werden.



**Bild 6-16:** Verfahren zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Basisfunktionen

Das Verfahren beinhaltet für jede Basisfunktion folgende Schritte:

Zu Schritt 1: Die Informationen der eingesetzten Basisfunktion werden aus der Dokumentation der Basisfunktionen entnommen. Die Informationen beinhalten:

- die Referenzkennzeichen der Ein- und Ausgänge einer Komponente.
- einen Hinweis auf die eingesetzte Basisfunktion, z. B. nach Bild 6-4 durch die Charakterisierung über eine Nummer oder nach Bild 6-5 durch die Charakterisierung über Zustände.

Zu Schritt 2: Es wird in der Bibliothek auf das Bibliothekselement für die eingesetzte Basisfunktion zugegriffen.

- Die Ein- und Ausgänge des Bibliothekselements werden mit den Referenzkennzeichen der Ein- und Ausgänge der Komponente benannt.
- Das instanziierte Bibliothekselement wird als Verhaltensmodell hinterlegt.
- Bei der Erstellung des Maschinenmodells wird das hinterlegte Verhaltensmodell der Komponente des Modells der Struktur der Maschine anhand der Namen der Ein- und Ausgänge zugeordnet.

Nach der Erstellung des Maschinenmodells müssen in den Zustandsgraphen der Verhaltensmodelle die Zeiten der Zustandsübergänge manuell eingegeben werden.

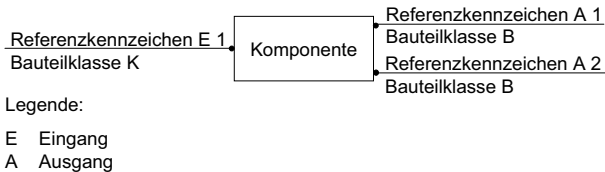
### **Alternatives Verfahren zur teilautomatisierten Auswahl von Basisfunktionen**

Wenn keine Dokumentation der Basisfunktionen zur Verfügung steht, wird ein Alternativverfahren zur Auswahl der Basisfunktionen angewandt. Durch das Verfahren wird auf Basis des Modells der Struktur der Maschine, der Bibliothek für Basisfunktionen und der Referenzkennzeichen der Ein- und Ausgänge teilautomatisiert eine entsprechende Basisfunktion für eine Komponente ausgewählt. Es wird kein Engineeringdokument eingesehen, da sich das Alternativverfahren auf die Auswertung der Referenzkennzeichnung stützt.

Wenn das Alternativverfahren zur Auswahl der Basisfunktionen durchgeführt wurde, wird mit dem Schritt 2 aus [Bild 6-16](#) fortgefahren. Das Alternativverfahren betrachtet nacheinander jede Komponente aus dem Modell der Struktur der Maschine, die aus Bauteilen besteht. Anhand der Konstellation der Ein- und Ausgänge der betrachteten Komponente werden eine oder eventuell mehrere Basisfunktionen vorgeschlagen. Die vorge-

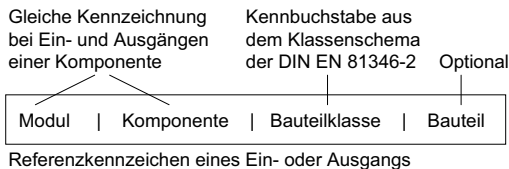
schlagenen Basisfunktionen sind vom Anwender des Modellierungstools anzunehmen oder abzulehnen. Daher wird das Verfahren als teilautomatisiert bezeichnet.

Um für eine Konstellation von Ein- und Ausgängen einer Komponente eine oder mehrere Basisfunktionen für einen Vorschlag auszuwählen, werden die Anzahl der Ein- und Ausgänge einer Komponente und deren Referenzkennzeichen betrachtet. In [Bild 6-17](#) wird eine Komponente mit ihren Ein- und Ausgängen aufgezeigt. Eine Basisfunktion, die für diese Komponente vorgeschlagen wird, muss mindestens dieselbe Anzahl an Eingängen und dieselbe Anzahl an Ausgängen besitzen. Ob es sich um einen Ein- oder Ausgang handelt, wird aus der Adresse aus der E/A-Liste ermittelt.



[Bild 6-17](#): Konstellation der Ein- und Ausgänge einer Komponente

Neben der übereinstimmenden Anzahl an Ein- und Ausgängen wird ein zweites Kriterium angewandt. Es bezieht die Referenzkennzeichnung mit ein. Die Referenzkennzeichnung eines Ein- oder Ausganges richtet sich jeweils nach dem Bauteil, an das es nächstliegend elektrisch angeschlossen ist (Kapitel 5.1.2). Unterschiede in der Kennzeichnung der Ein- und Ausgänge einer Komponente gibt es lediglich in der Kennzeichnung nach der Bauteilklasse und nach dem Bauteil ([Bild 6-18](#)). Die Abschnitte der Referenzkennzeichen, die auf das Modul und auf die Komponente hinweisen, sind bei den Ein- und Ausgängen einer Komponente gleich.



[Bild 6-18](#): Auswertung des Referenzkennzeichens eines Ein- oder Ausganges

Von Relevanz ist der Kennbuchstabe für die Bauteilklasse, welche in DIN EN 81346-2 /104/ festgelegt ist. Für signalverarbeitende Bauteile wie z. B. Ventile lautet der Kennbuchstabe „K“. Für Bauteile, die mechanische in elektrische Energie umwandeln, wie z. B. Sensoren, lautet er „B“. Diese Bauteilklassen eignen sich zur Ansteuerung bzw. zur Überwachung von Funktionen.

Eine Basisfunktion für eine Komponente wird nach der Anzahl an Eingängen mit dem Kennbuchstaben K und der Anzahl an Ausgängen mit dem Kennbuchstaben „B“ ausgewählt (Bild 6-17). Für eine Ventil-Zylinder-Endschalter-Bauteilkombination existieren zwei Ein- und zwei Ausgänge dieser Art.

Für Komponenten, die keine Basisfunktion umsetzen, sollen möglichst keine Basisfunktionen vorgeschlagen werden. Sie charakterisieren sich teilweise über die Anzahl der Ein- und Ausgänge oder über die Bauteilklassen ihrer Bauteile. Eine Komponente der Klasse der einzelnen Steuer- und Statussignale kann z. B. nur einen Ausgang besitzen. Dies ist für eine Basisfunktion nicht denkbar, da durch das Fehlen eines Steuersignals keine Funktion initiiert werden kann. Des Weiteren beinhalten die im Rahmen der Realisierung aus Kapitel 7.2.1 identifizierten Basisfunktionen immer Ein- oder Ausgänge an Bauteilen der Bauteilklassen mit den Kennbuchstaben „K“ oder „B“. Für Komponenten mit ausschließlich Ein- oder Ausgängen an Bauteilen anderer Bauteilklassen werden demzufolge keine Basisfunktionen vorgeschlagen. Dies betrifft zum einen häufig die Bauteilklasse „S“, deren Bauteile, wie Taster, manuelle Betätigungen in Signale umwandeln und zum anderen die Bauteilklasse „P“, deren Bauteile Informationen, z. B. durch eine Anzeige, darstellen.

## **6.4 Verhaltensmodelle für Multifunktionen**

### **6.4.1 Definition der Verhaltensmodelle**

In diesem Kapitel werden die Inhalte automatisiert erstellter Verhaltensmodelle für die Komponenten festgelegt, die eine Multifunktion umsetzen. Die Komponenten, die eine Basisfunktion umsetzen, werden in diesem Kapitel nicht betrachtet.

Im Folgenden werden Festlegungen für die Modellierung von Verhaltensmodellen für Komponenten der Klasse der Multifunktionen zusammengefasst.

- Verhaltensmodelle werden nicht der Funktion nach unterschieden.

Nach Kapitel 6.1 handelt es sich bei Multifunktionen um unterschiedliche Funktionen. Die meisten Komponenten dieser Klasse bewerkstelligen die Sicherheit durch elektrische Verschaltungen, stellen einzelne binäre Ein- und Ausgänge an Baueinheiten dar oder initiieren oder überwachen Aktivitäten, die nur einen mittelbaren Wirkzusammenhang mit anderen Steuer- oder Statussignalen aufweisen. Da diese Funktionen nicht weiter klassifizierbar sind, werden sie bei der Modellierung auch nicht unterschieden.

- Verhaltensmodelle werden in der Modellierungstiefe I modelliert.

Für die Modellierung des Verhaltens wird in Kapitel 4.2 die Modellierungstiefe II, ein logisches Abbild mit Zeitverhalten, festgelegt. Die Abbildung des Zeitverhaltens rückt bei den Multifunktionen in den Hintergrund, da es sich nicht um überwachte Funktionen wie im Falle der Basisfunktionen handelt. Es ist daher im Regelfall nicht nötig, Reaktionszeiten für einzelne Steuer- oder Statussignale in die Verhaltensmodelle zu integrieren. Demzufolge wird in der Modellierungstiefe I modelliert. Reaktionszeiten können für ausgewählte Komponenten manuell nachgetragen werden.

- Verhaltensmodelle beinhalten keine automatisierte Anbindung an das geometrische Modell.

Einige Komponenten der Klasse der Multifunktionen benötigen eine Anbindung an das geometrische Modell. Dies wird am Beispiel des Förderbands in Bild 6-9 aufgezeigt. Aufgrund des Informationsdefizits in Bezug auf den Materialfluss ist es nicht möglich, eine nötige Anbindung an das geometrische Modell zu identifizieren und automatisiert zu modellieren (Kapitel 6.2.3.1). Die Wirkzusammenhänge aus dem Materialfluss werden nicht automatisiert in das Verhaltensmodell integriert, sondern müssen manuell nachgetragen werden. Dies gilt in gleicher Weise für die Modellierung von Basisfunktionen.

### **Abbildung der elektrischen Wirkkette**

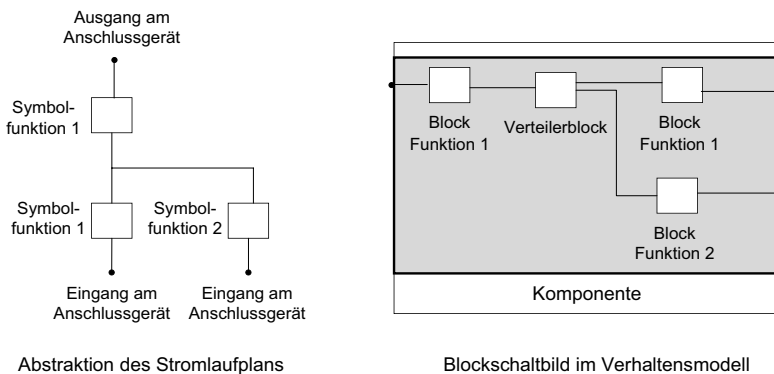
Die einzelnen Steuer- und Statussignale bilden die Anhaltspunkte zur Erstellung eines Verhaltensmodells. Daher stellt deren elektrischer Anschluss im Stromlaufplan die we-

sentliche Informationsquelle dar. Durch eine weiterführende Betrachtung der elektrischen Anschlüsse erschließt sich die Verbindung zu weiteren Bauelementen. Die Verbindungen fügen sich zu einer elektrischen Wirkkette. Die elektrische Wirkkette stellt den Inhalt eines Verhaltensmodells für eine Multifunktion dar. Sie gründet auf den Symbolfunktionen der Bauelemente auf dem Stromlaufplan.

Die elektrische Wirkkette wird im Verhaltensmodell durch ein Blockschaltbild dargestellt. Dessen Blöcke sind einer Bibliothek entnommen und entsprechen den Symbolfunktionen aus dem Stromlaufplan. Eine Bibliothek mit grundlegenden logischen und einfachen automatisierungstechnischen Symbolfunktionen ist Bestandteil der meisten Simulationstools. In wenigen Fällen fehlt ein Block für eine Symbolfunktion, dann muss sie der Bibliothek hinzugefügt werden.

Einige Bauelemente, die mit den Ein- und Ausgängen in Verbindung stehen, dienen jedoch nicht der elektrischen Wirkkette. Sie übernehmen Hilfsfunktionen, die auf das logische Verhalten keinen entscheidenden Einfluss haben. Sie dienen etwa der physischen Verbindung, wie z. B. Durchgangsklemmen, oder der Sicherheit, wie beispielsweise Motorschutzschalter. Daher werden nur Bauelemente mit ausgewählten, relevanten Symbolfunktionen in die Wirkkette aufgenommen. Als relevant gelten z. B. Sensoren, Motoren, Geräteanschlüsse und Kontakte.

In [Bild 6-19](#) wird der Bezug zwischen den Symbolfunktionen im Stromlaufplan und den Blöcken im Blockschaltbild des Verhaltensmodells illustriert.



**Bild 6-19:** Illustration des Bezugs zwischen Symbolfunktionen und Blöcken

Zu Bild 6-19 sei angemerkt, dass ein Stromlaufplan aus Sicht der Steuerung erstellt wird. Daher sind Ausgänge im Stromlaufplan Eingänge im Maschinenmodell.

### Ausprägungen der elektrischen Wirkketten

Eine elektrische Wirkkette beinhaltet oftmals nur eine Verbindung zu einem Bauelement. Ein solches Verhaltensmodell ist in Bild 6-20 am Beispiel eines Sensors illustriert. Das Beispiel bezieht sich auf einen Sensor, der im Stromlaufplan wie der Sensor in Bild 6-6 angeschlossen ist, und der, wie z. B. der Näherungsschalter am Förderband, keinen direkten Wirkzusammenhang mit anderen Bauteilen aufweist.

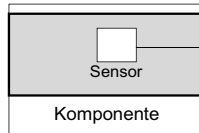


Bild 6-20: Verhaltensmodell für ein Statussignal eines Sensors in einer Komponente

Wirkketten mit mehr als einer Verbindung bestehen im einfachsten Fall aus in Reihe geschalteten Bauelementen. Wenn eine Wirkkette eine Verzweigung durch eine Parallelschaltung oder ein Schütz beinhaltet (Kapitel 6.2.2), wird dies durch Verteilerblöcke dargestellt. Wenn in einer Wirkkette eine Parallelschaltung zusammengeführt wird, wird ein logischer Operator des Typs „oder“ eingesetzt. In Bild 6-21 zeigt das Blockschaltbild für ein Verhaltensmodell mit zwei Schützen, von denen jeweils einer der Schließer in Reihe geschaltet ist.

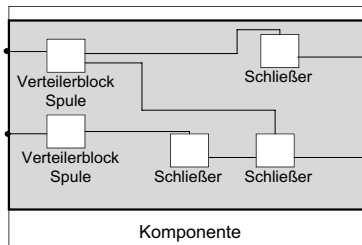


Bild 6-21: Verhaltensmodell für die Verschaltung von Schützen in einer Komponente

## **Zuordnung zu Komponenten im Modell der Struktur der Maschine**

Einer Komponente im Modell der Struktur der Maschine wird ein Verhaltensmodell zugeordnet, wenn die Namen der Ein- oder Ausgänge der Komponente mit denen der elektrischen Wirkkette übereinstimmen. Wenn eine elektrische Wirkkette Ein- und Ausgänge besitzt, die mit den Ein- und Ausgängen verschiedener Komponenten übereinstimmen, werden diese Komponenten zu einer Komponente zusammengelegt. Dies betrifft die sicherheitstechnischen Ein- und Ausgänge. Sie weisen untereinander durch die Integration in die Sicherheitssteuerkreise einen engen funktionalen Zusammenhang auf. Durch die zweifache Untergliederung im Modell der Struktur der Maschine wurden die Ein- und Ausgänge jedoch unter Umständen auf unterschiedliche Komponenten aufgeteilt.

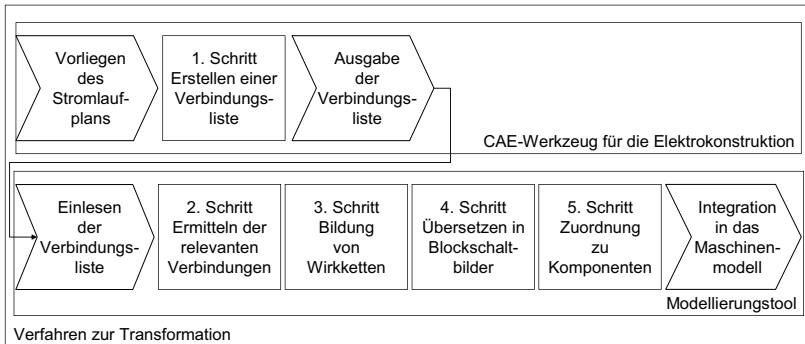
### **6.4.2 Verfahren zur Transformation**

In diesem Kapitel wird das Verfahren zur Transformation für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten hergeleitet, die Multifunktionen umsetzen. Die Transformation gründet auf dem Stromlaufplan und erzielt die Erstellung und Zuordnung von Verhaltensmodellen, wie sie in Kapitel 6.4.1 definiert sind.

Der Stromlaufplan enthält die elektrische Wirkkette, die an die Ein- und Ausgänge angeschlossen ist. Durch das Verfahren wird die Wirkkette extrahiert und als Blockschaltbild in einer Komponente des Modells der Struktur der Maschine abgebildet. Bild 6-22 gibt einen Überblick über das Verfahren zur Transformation.

Der erste Schritt des Verfahrens zur Transformation wird nicht in dem entwickelten Modellierungstool realisiert, sondern kann in einem gängigen CAE-Werkzeug für die Elektrokonstruktion durchgeführt werden. Das Ergebnis des ersten Schritts, die Verbindungsliste, wird dem Modellierungstool zum Einlesen übergeben. Dieses führt die Schritte zwei bis fünf aus. Durch das Modellierungstool werden ebenfalls die aus dem Verfahren zur Transformation resultierenden Verhaltensmodelle und deren Zuordnung zu Komponenten im Modell der Struktur der Maschine in das Maschinenmodell integriert.



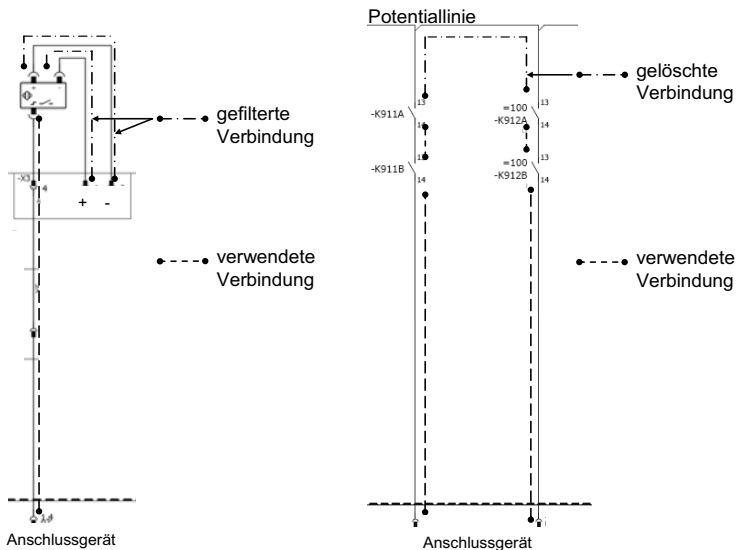


**Bild 6-22:** Übersicht über das Verfahren zur Transformation

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Verfahrens zur Transformation näher erläutert.

**Zu Schritt 1:** Die Informationen aus dem Stromlaufplan werden durch die Auswertungsfunktion zur Erstellung einer Verbindungsliste aus dem CAE-Werkzeug der Elektrokonstruktion extrahiert. Die Erstellung basiert auf einer Vorlage, sodass die Verbindungsliste nach der Datenstruktur aus Bild 6-7 aufgebaut wird. Die Verbindungsliste enthält dadurch die Referenzkennzeichnung mit Anschlussbezeichnung, den Potenzialtyp und die Symbolfunktion des Quell- und Zielelements jeder Verbindung.

**Zu Schritt 2:** In der Verbindungsliste befinden sich Verbindungen jeglicher Potenzialtypen. Verbindungen, die nicht dem Potenzialtyp Außenleiter „L“ angehören, werden gefiltert (Bild 6-23, links). Daraufhin verbleiben unter anderem irrelevante Verbindungen, deren Elemente über die Potentiallinie parallel miteinander verbunden sind. Dies sind Verbindungen, die zur Versorgung existieren und keinen Bestandteil der Wirkkette darstellen. Um diese zu identifizieren, wird eine separate Verbindungsliste erstellt, die allein die Verbindungen enthält, die dem Netzteil entspringen und vor dem ersten trennenden Bauelement liegen. Diese Verbindungen werden von der Verbindungsliste gelöscht (Bild 6-23, rechts).

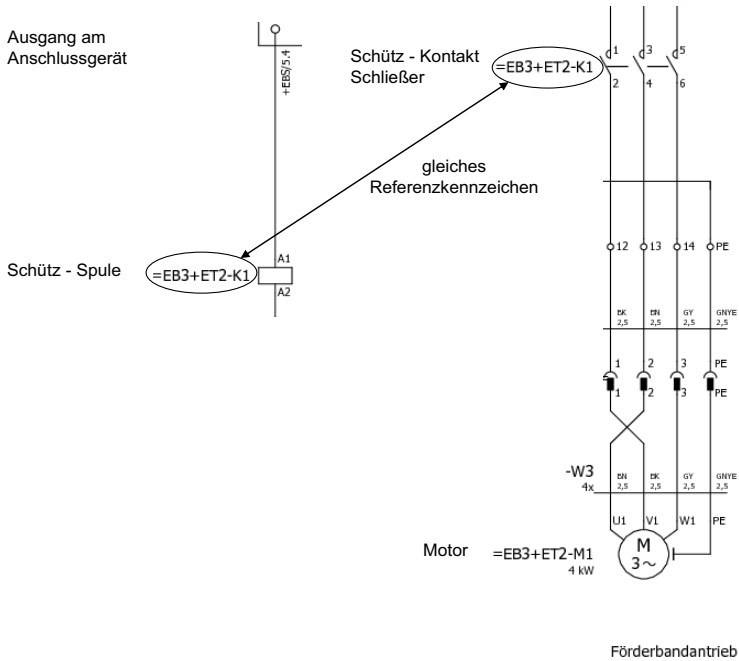


**Bild 6-23:** Zwei Ausschnitte aus einem Stromlaufplan, /106/, /108/  
- Gefilterte und gelöschte Verbindungen nach Schritt 2

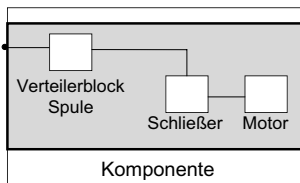
Zu Schritt 3: Eine Wirkkette wird durch eine Kette von Bauelementen dargestellt. Eine solche Kette wird durch die Verknüpfung der Quelle-Zielelement-Verbindungen gebildet. Eine Verknüpfung bedingt, dass das Referenzkennzeichen und die Anschlussbezeichnung eines Zielelements gleich denen des Quellelements einer anderen Verbindung sind oder umgekehrt.

Neben den unverzweigten Wirkketten existieren Besonderheiten:

**Schütz:** Die Ketten werden nach Elementen mit der Symbolfunktion „Spule“ durchsucht. Wenn eine Spule gefunden wird, wird in allen anderen Ketten nach Bauelementen gesucht, die zum Einen das gleiche Referenzkennzeichen wie die Spule und zum Anderen eine Symbolfunktion aus der Gruppe der Kontakte besitzen (Bild 6-24). Die betroffenen Ketten werden von dem eingesetzten Verteilerblock „Spule“ aus verknüpft (Bild 6-25).



**Bild 6-24:** Zwei Ausschnitte aus einem Stromlaufplan /105/  
- Schaltung eines Motors über ein Schütz



**Bild 6-25:** Schaltung eines Motors über ein Schütz im Blockschaltbild

**Parallelschaltungen:** T-Kreuzungen werden zur Verzweigung des Strompfads eingesetzt. Ihre Anschlussstellen können, markiert mit einer 45°-Abzweigung, mit unterschiedlichen Zielprioritäten belegt werden. Die Zielprioritäten entscheiden über die Auflösung in die Zweipunktverbindungen. Durch die unterschiedlichen

chen Auflösungen liegen bei den Verbindungen, welche parallel sind, keine wiedererkennbaren Muster vor.

Alternativ wurde daher folgende Regel aufgestellt: Es liegt eine Parallelschaltung vor, wenn ein Element mit derselben Referenzkennzeichnung und Anschlussbezeichnung Quelle zweier Verbindungen ist (Bild 6-26).

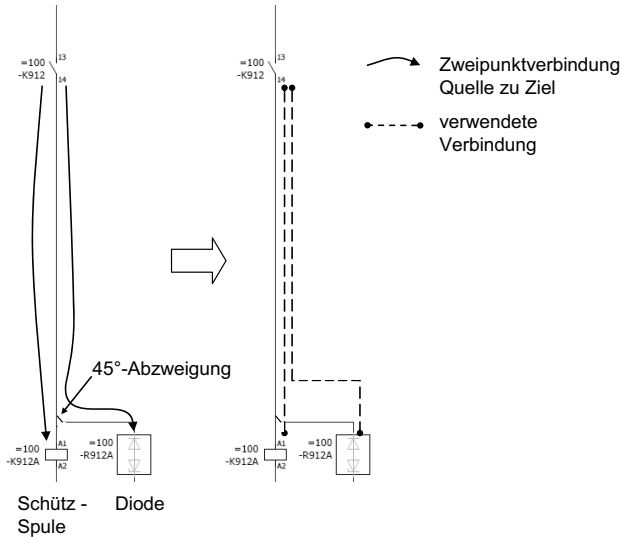
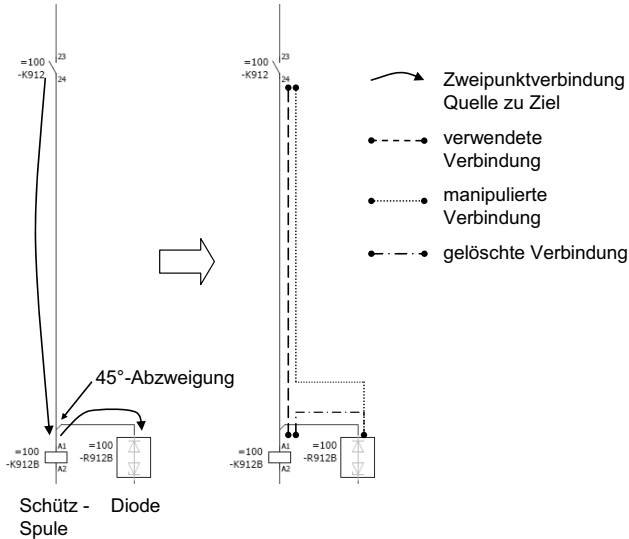


Bild 6-26: Zwei gleiche Ausschnitte aus einem Stromlaufplan /108/  
- Parallelverbindung mit einem Element, das Quellelement zweier Verbindungen ist

Für den Fall, dass ein Element in einer ersten Verbindung Ziel und in einer zweiten Verbindung Quelle ist, muss die zweite Verbindung, in der das Element die Quelle darstellt, manipuliert werden. Die neue Quelle soll das Element sein, das Quellelement der ersten Verbindung ist. Nun ist das erste Quellelement Quelle zweier Verbindungen und die Verzweigung findet nach dem Quellelement statt (Bild 6-27).

Diese Regel kann allerdings nicht mehr angewandt werden, wenn eines der Elemente nur eine Anschlussbezeichnung besitzt. Durchgangsklemmen haben z. B.

nur einen Anschluss. Dieser eine Anschluss ist auch bei einer Reihenschaltung sowohl Ziel- als auch Quellelement einer Verbindung. An ihnen kann demzufolge der Strompfad bei einer Parallelschaltung nicht identifiziert werden.



**Bild 6-27:** Zwei gleiche Ausschnitte aus einem Stromlaufplan /108/  
- Parallelverbindung mit einem Element, das sowohl Ziel-  
als auch Quellelement ist

Zu Schritt 4: Die Symbolfunktionen der Quell- und Zielelemente einer Kette sind Basis des Blockschaltbildes für eine Wirkkette. Eine Symbolfunktion eines Bauelements aus der Kette wird direkt in einen Block übersetzt. Dazu wird eine Übersetzungsliste benötigt, die den Symbolfunktionen Blöcke aus der Bibliothek des Simulationstools zuweist. Für Kontakte, die von Spulen geschaltet werden, muss festgelegt werden, an welchem Eingang des Blocks die Verbindung von einem Verteilerblock einer Spule angeschlossen wird. Bei der Übersetzung werden nur die für die Wirkkette relevanten Funktionen berücksichtigt (Kapitel 6.4.1).

Zum Beispiel wird die Parallelschaltung aus Bild 6-26 bzw. Bild 6-27 nicht im Blockschaltbild berücksichtigt, da ihr paralleles Element eine Diode ist, die zu den nicht relevanten und somit nicht übersetzten Symbolfunktionen gehört.

Zu Schritt 5: Das fertig gestellte Blockschaltbild wird dem Modell der Struktur der Maschine als Verhaltensmodell zugeordnet, wenn der Name eines Ein- oder Ausgangs der Komponente mit dem Ein- oder Ausgang des Blockschaltbildes übereinstimmt. Der Ein- oder Ausgang der elektrischen Wirkkette im Blockschaltbild wird durch die Referenzkennzeichnung der ersten Symbolfunktion bestimmt, die auf die Symbolfunktion eines Ein- oder Ausgangs an einem Anschlussgerät folgt. Falls die Ein- oder Ausgänge eines Blockschaltbildes in mehreren Komponenten zu finden sind, werden diese zusammengelegt.

## **6.5 Zusammenfassung der Erstellung von Verhaltensmodellen**

In Kapitel 6 wurde die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen erarbeitet. Zuerst wurden Komponenten, die aus Bauteilen bestehen, danach klassifiziert, ob sie eine Basisfunktion oder eine Multifunktion umsetzen.

Zur Modellierung des Verhaltens wurden die relevanten Informationen aus den eingesetzten Engineeringdokumenten identifiziert und ein Informationsdefizit bezüglich des Materialflusses festgestellt. Dieses kann auch nicht durch die Auswertung anderer, standardisiert erstellter Engineeringdokumente, wie z. B. des 3D-CAD-Modells, beseitigt werden.

Für Komponenten der Klasse der Basisfunktionen wurden Verhaltensmodelle automatisiert ausgewählt und zugeordnet. Das zugehörige Verfahren basiert auf der Dokumentation der Basisfunktionen. Wenn die Dokumentation nicht verfügbar ist, wird ein Alternativverfahren, das auf der Referenzkennzeichnung aufbaut, angewandt. Aus dem Stromlaufplan wurden elektrische Wirkketten extrahiert, um Verhaltensmodelle für die Komponenten der Klasse der Multifunktionen zu erstellen.

## **7 Realisierung des Lösungskonzepts**

In Kapitel 7.1 wird gezeigt, wie die in Kapitel 5 und 6 erarbeitete Methode zur automatisierten Modellerstellung in einem Modellierungstool realisiert wird. Die Beschreibung der Erprobung folgt in Kapitel 7.2. In Kapitel 7.3 wird bewertet, inwieweit der Einsatz des Modellierungstools zu einer Reduzierung des Aufwands bei der Modellerstellung führt.

### **7.1 Realisierung des Lösungskonzepts durch ein Modellierungstool**

Die Methode zur automatisierten Modellerstellung wird durch das Modellierungstool AutoMod umgesetzt. Bei dem Modellierungstool handelt es sich um eine Neuentwicklung, die allein stehend auf einen PC installiert und ausgeführt werden kann. AutoMod wurde als Softwarelösung in der objektorientierten Programmiersprache C# realisiert. Zur Implementierung wurde die Entwicklungsumgebung Visual Studio und deren Standardbibliotheken verwendet.

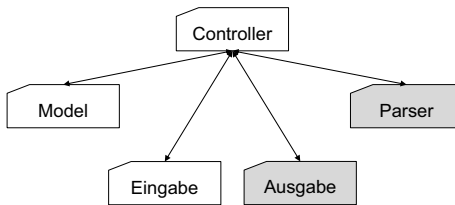
#### **Randbedingungen zur Entwicklung des Modellierungstools**

Die Randbedingungen zur Entwicklung des Modellierungstools lassen sich aus dem Lösungskonzept aus Kapitel 4.3 ableiten. Das Modellierungstool muss Engineeringdokumente einlesen und deren Informationen dann auf Basis der Methode aus Kapitel 5 und 6 verarbeiten können. Als Ergebnis soll das Maschinenmodell im Simulationstool ausgegeben werden. Für das Einlesen der Engineeringdokumente wird vorausgesetzt, dass die Engineeringdokumente als Datei vorliegen und für das Modellierungstool über einen Pfad auf dem PC erreichbar sind. Die Ausgabe des Maschinenmodells soll in eine Datei erfolgen. Die Datei muss in einem bestimmten Format vorliegen, sodass sie von dem Simulationstool geöffnet werden kann. Die eingesetzten Werkzeuge können sich von Engineeringprozess zu Engineeringprozess unterscheiden. Für die Formate der Engineeringdokumente existiert kein einheitlicher Standard. Die Zusammenstellung von Formaten in den Engineeringprozessen verlangt ein, auf den jeweilig vorliegenden Engineeringprozess angepasstes, Modellierungstool.

## Architektur des Modellierungstools

Um das Modellierungstool jedoch trotzdem möglichst flexibel einsetzbar zu gestalten, baut die Architektur auf dem Model-View-Controller-Entwurfsmuster auf /109/, /110/. Die resultierende, modulare Architektur ermöglicht durch die Entkopplung von Verantwortlichkeiten in Softwaremodulen eine hohe Anpassungsfähigkeit /109/. So können z. B. die Benutzerschnittstellen ausgetauscht werden, während die Anwendungsfunktionalität unberührt bleibt /110/.

Bild 7-1 zeigt die Softwaremodule bzw. die wesentlichen Klassen des Modellierungstools.



Legende:




-  allgemein für Engineeringprozesse gültiges Softwaremodul
-  austauschbares, nicht allgemeingültiges Softwaremodul
-  Verbindung durch Datenaustausch

Bild 7-1: Modulare Architektur des Modellierungstools

Der „Controller“ und das „Model“ sind für die automatisierte Modellerstellung allgemein gültige und somit wieder verwendbare Softwaremodule. Gemeinsam setzen sie durch die Verwaltung und Änderung der Modelldaten die Methoden zur automatisierten Modellerstellung um. Das Softwaremodul „Eingabe“ realisiert im Wesentlichen das Eingabefenster, mit dem die automatisierte Modellerstellung in AutoMod gestartet werden kann. Die „Eingabe“ ist für alle Engineeringprozesse gültig. Das Softwaremodul „Ausgabe“ gibt das automatisch erstellte Maschinenmodell als Datei aus. Die „Ausgabe“ muss durch die unterschiedlichen geforderten Ausgabeformate leicht austauschbar sein. Austauschbarkeit wird auch von den „Parsern“ gefordert. Ein „Parser“ liest die relevanten Informationen eines Engineeringdokuments ein. Er ist für diese Aufgabe auf das Format eines Engineeringdokuments zugeschnitten.



Durch die modulare Architektur können die „Ausgabe“ und die „Parser“ unabhängig von den Softwaremodulen „Model“ und „Controller“ ausgetauscht werden. Demzufolge ist AutoMod flexibel auf die Formate anderer Engineeringprozesse anpassbar.

### Interaktion mit dem Modellierungstool AutoMod

Mit Hilfe des Eingabefensters aus [Bild 7-2](#) kann der Anwender mit dem Modellierungstool interagieren. Wie im Lösungskonzept gefordert, kann der Anwender wählen, ob er nur ein Modell der Struktur der Maschine erstellen möchte oder ein Maschinenmodell, in dem die Verhaltensmodelle für Bauteile integriert sind.

The screenshot shows a dialog box titled "Datei Info" with the following elements:

- Modellname:** A text input field followed by ".ecf".
- Art des Modells:** Two radio buttons: "Modell der Struktur" (unselected) and "Maschinenmodell" (selected).
- Speicherort für das Modell:** A text input field with a browse button "...".
- Einzulesende Dateien:** A section containing four rows, each with a label and a text input field with a browse button "...":
  - EA-Liste
  - Buskonfiguration
  - Basisfunktionen
  - Verbindungsliste
- Fortschritt:** A large empty text area with a vertical scrollbar on the right.
- Buttons:** "Schließen" and "Modell erstellen" at the bottom right.

**Bild 7-2:** Eingabefenster des Modellierungstools AutoMod

Des Weiteren muss der Modellname und der Speicherort für die Datei des Maschinenmodells vom Anwender angegeben werden. Unter der Sparte der einzulesenden Dateien sind die Pfade für die bezeichneten Engineeringdokumente zu wählen. Wenn nur die

Erstellung eines Modells der Struktur der Maschine gewünscht ist, sind nur die E/A-Liste und die Buskonfiguration anzugeben.

## 7.2 Erprobung des Modellierungstools

Anschließend an die Entwicklung wurde das Modellierungstool AutoMod erprobt. In Kapitel 7.2.1 werden die Rahmenbedingungen der Erprobung erläutert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7.2.2 präsentiert.

### 7.2.1 Rahmenbedingungen der Erprobung

**Betrachtete Montagemaschinen:** Gegenstand der Erprobung sind Montagemaschinen, die Zulieferteile für die Automobilindustrie produzieren. Die unterschiedlichen Montagemaschinen sind vollautomatisiert und produktspezifisch.

**Simulationstool und Ausgabeformat:** Geeignete Simulationstools werden z. B. mit den Produktlösungen SimulationX /111/, /112/, Virtuos /102/ und WinMod /113/, /114/ angeboten. Simit /115/ ist ebenfalls ein Simulationstool zur HiLS, dessen geometrisches Modell aber auf ein 2D-Modell beschränkt ist. Nur die Produktlösung Virtuos garantiert ein rechtzeitiges Antwortverhalten der virtuellen Maschine auch bei einer Zykluszeit der Steuerung im Millisekundenbereich. Dies ist für die betrachteten Montagemaschinen wichtig, da ihre Zykluszeiten auf 5 oder 10 ms eingestellt sind. Daher wurde zur praktischen Unterstützung dieser Arbeit das Simulationstool Virtuos gewählt. Das Ausgabeformat des Maschinenmodells ist durch das Simulationstool Virtuos festgelegt. Es entspricht einem XML-Format, das in einen XML-Schema definiert ist.

**Engineeringdokumente und Eingabeformate:** Für das Modell der Struktur der Maschine werden die E/A-Liste und die Buskonfiguration der Montagemaschine benötigt.

Für die Modellierung des Verhaltens sind Informationen über die Basisfunktionen und der Stromlaufplan der Montagemaschine erforderlich. Im betrachteten Engineeringprozess ist eine Dokumentation der Basisfunktionen vorhanden. Die Datenstruktur in der Dokumentation entspricht dem Aufbau aus Bild 6-5. Bei diesem Aufbau kann über die Beschreibung der Zustände der Komponente auf deren Basisfunktionen geschlossen werden. Des Weiteren müssen für die automatisierte Auswahl von Basisfunktionen die

zugehörigen Bibliothekselemente zur Verfügung stehen. Daher wurde eine Bibliothek für Basisfunktionen im Simulationstool Virtuos aufgebaut. Für fünf Montagemaschinen wurden 16 unterschiedliche Basisfunktionen identifiziert und für diese jeweils ein Bibliothekselement erstellt. Falls in einem Engineeringprozess nicht auf eine Dokumentation der Basisfunktion zurückgegriffen werden kann, muss die Basisfunktion teilautomatisiert anhand des Alternativverfahrens ausgewählt werden (Kapitel 6.3.2). Dieses basiert auf der Kombination von Ein- und Ausgängen einer Komponente. Die 16 gefundenen Basisfunktionen weisen 11 unterschiedliche Kombinationen von Ein- und Ausgängen auf. Daraus folgt, dass es für die meisten Komponenten aufgrund ihrer Kombination von Ein- und Ausgängen eindeutig ist, welche Basisfunktion sie umsetzen. In diesen Fällen ist vom Anwender keine Basisfunktion mehr auszuwählen.

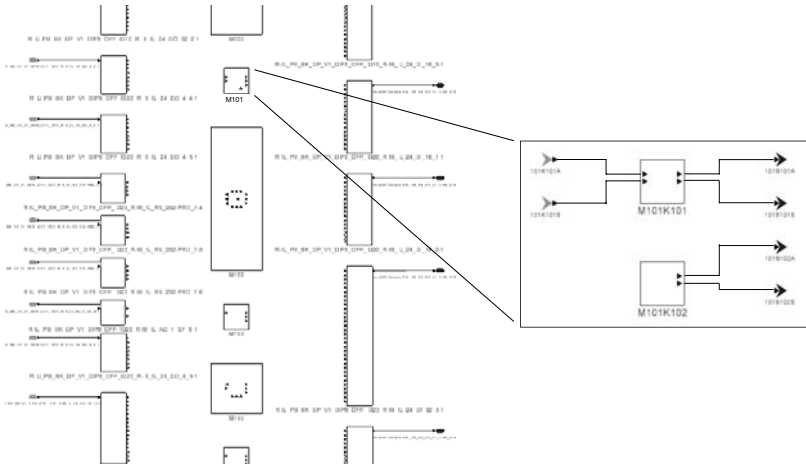
Für die Stromlaufplanerstellung wird in dem betrachteten Engineeringprozess das CAE-Werkzeug Eplan /105/ verwendet. Mit dem Werkzeug wird aus dem Stromlaufplan eine Verbindungsliste erstellt. Damit diese der Datenstruktur aus Bild 6-7 entspricht, muss der Aufbau der Verbindungsliste zuerst in Eplan konfiguriert werden.

Somit liegen alle Engineeringdokumente zur automatisierten Modellerstellung vor.

### **7.2.2 Ergebnisse der Erprobung**

Die Ergebnisse der Erprobung werden detaillierter für eine Montagemaschine vorgestellt. Die gewählte Beispielmaschine ist relativ groß und besitzt insgesamt Ein- und Ausgänge mit einem Datenumfang von ca. 850 Bit. Davon sind 201 Bit binären Ein- und Ausgängen zuzurechnen. Die Relation der Anzahl an Ein- und Ausgängen von Bauteilen zu Baueinheiten ist typisch für die betrachteten Montagemaschinen.

**Bild 7-3** zeigt links einen Ausschnitt aus dem, mit dem Modellierungstool automatisiert erstellten, Modell der Struktur der Maschine. Der Ausschnitt umfasst ca. ein Sechstel des Modells.



**Bild 7-3:** Ausschnitt aus dem automatisiert erstellten Modell der Struktur der Maschine und Innenansicht eines Moduls in Virtuos /102/

Visuell unterteilt sich das Modell der Struktur der Maschine in drei Spalten. Die linke Spalte zeigt die Anschlusspunkte und Anschlussgeräte für die Eingänge, die rechte für die Ausgänge (Kapitel 5.2.2) und die mittlere die Module (Kapitel 5.2.1). Jeweils unter den Anschlussgeräten und Modulen stehen in kleiner Schrift deren Namen. Die in diesem Beispiel vergebenen Namen sind nicht von Bedeutung. Die Ein- bzw. Ausleitungen zwischen den Modulen und den Anschlussgeräten sind modelliert, aber aufgrund des noch nicht integrierten Routings der Signalverbindungen im Simulationstool nicht sichtbar.

Die Module und Anschlussgeräte werden bei der automatisierten Modellerstellung in ihrer Größe auf die Anzahl ihrer Ein- und Ausgänge angepasst. Die Module beinhalten die Komponenten, die erst sichtbar werden, wenn man ein Modul im Simulationstool öffnet. Die Innenansicht eines Moduls ist im Bild 7-3 rechts dargestellt. Die Ein- und Ausleitungen sind dort, wie in den folgenden Bildern auch, nachgezeichnet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Basisfunktionen und anschließend für Multifunktionen vorgestellt.

Zur automatisierten Modellerstellung werden die Basisfunktionen anhand der Dokumentation der Basisfunktionen identifiziert und Bibliothekselemente ausgewählt (Kapitel 6.3). Bei den Verhaltensmodellen für die Basisfunktionen ist im Maschinenmodell eine manuelle Nachbearbeitung notwendig. Die Verzögerungen für die Übergangszeiten müssen in den Zustandsgraphen eingetragen werden. An der Beispielmaschine werden 39 Verhaltensmodelle für Basisfunktionen eingesetzt. Diese Komponenten besitzen 136 Ein- und Ausgänge. Demgemäß können 68% der binären Ein- und Ausgänge durch Basisfunktionen modelliert werden. Bild 7-4 illustriert das Ergebnis der automatisierten Modellerstellung für eine Basisfunktion.

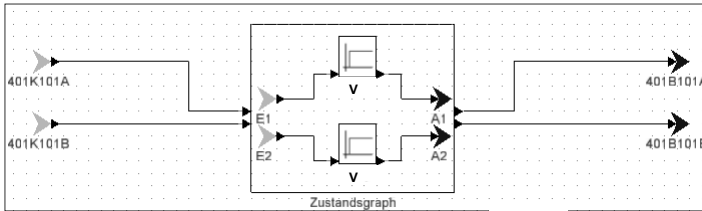


Bild 7-4: Ergebnis der automatisierten Erstellung eines Verhaltensmodells für eine Basisfunktion in Virtuos /102/

Die verbleibenden Ein- und Ausgänge aus der E/A-Liste der Beispielmaschine sind Steuer- und Statussignale der Multifunktionen. Zu ihrer Modellierung werden die elektrischen Wirkketten aus dem Stromlaufplan herangezogen (Kapitel 6.4). Von den verbleibenden 65 Ein- und Ausgängen stimmen die Referenzkennzeichnungen von 28 Ein- und Ausgängen mit denen im Stromlaufplan überein (Kapitel 6.2.3.1). Dies bedeutet, dass 14% der binären Ein- und Ausgänge mit Hilfe des Stromlaufplans modelliert werden. Wenn die Kennzeichnung eines Steuer- oder Statussignals einer Multifunktion mit keinem Ein- oder Ausgang im Stromlaufplan übereinstimmt, liegt keine automatisch ausgewertete Information über dessen Verhalten vor. Die Multifunktion muss dann manuell modelliert werden. Bei den 28 übereinstimmenden Ein- und Ausgängen handelt es sich bei 23 um Ein- bzw. Ausgänge, deren Wirkkette ausschließlich aus einer Verbindung zu einem Sensor oder einem Geräteanschluss besteht. Die Symbolfunktion der Wirkkette wird in einen Block übersetzt. Die Verbindung eines Ein- oder Ausgangs mit

dem Block entspricht dem Verhaltensmodell. In Bild 7-5 sind drei entsprechende Verhaltensmodelle dargestellt. Bei diesen Komponenten ist eine manuelle Nachbearbeitung notwendig. Einzelne Sensoren müssen zumeist an das geometrische Modell angebunden werden. Dies beinhaltet, dass eine Verbindung zwischen dem Block des Sensors im Blockschaltbild und der Darstellung des Sensors in den Modelldaten des geometrischen Modells manuell erstellt werden muss. Ein Geräteanschluss muss manuell mit dem Verhaltensmodell der Baueinheit, an der er den Geräteanschluss bildet, verbunden werden.

Bei den restlichen 5 Ein- und Ausgängen wurden elektrische Verschaltungen aufgefunden. Unten in Bild 7-5 ist ein Verhaltensmodell für die Verschaltung zweier Schütze dargestellt. Eine Verschaltung über ein Schütz kann immer erkannt und im Verhaltensmodell modelliert werden. Parallelschaltungen können automatisiert modelliert werden, wenn die Symbole an den Verschaltungen jeweils zwei Anschlussbezeichnungen besitzen (Kapitel 6.4.2).

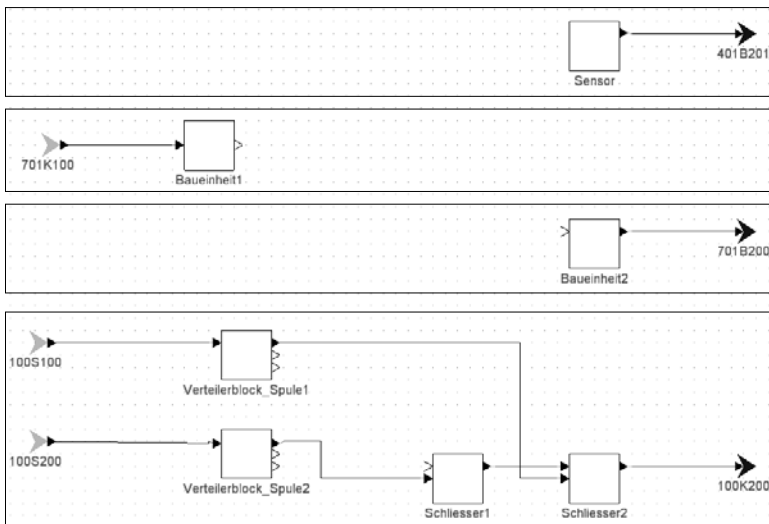


Bild 7-5: Ergebnis der Modellierung für Steuer- und Statussignale in Virtuos /102/

Tabelle 2 fasst in der ersten Spalte das Mengengerüst für die Beispielmaschine (A) zusammen. Das Mengengerüst beinhaltet die Anzahl der Module, Komponenten und Verhaltensmodelle der Maschine, die automatisiert erstellt wurden. Die Anzahl entspricht

nahezu der bei einer manuellen Modellierung. Ausgenommen sind nur die Ein- und Ausgänge, die nicht normgerecht oder nicht mit dem Stromlaufplan übereinstimmend gekennzeichnet sind. In der Tabelle sind zudem die Mengengerüste zweier weiterer Montagemaschinen angegeben. Die zweite Maschine (B) dient der Laserbearbeitung von Werkstücken. Sie enthält einen überdurchschnittlichen Anteil an Baueinheiten und setzt eine geringe Anzahl an Basisfunktionen um. Die dritte Maschine (C) ist auffällig klein. Sie entspricht einem abgeschlossenen Teil einer Montagemaschine, der einfach mit anderen Teilen zu einer Montagemaschine kombiniert werden kann.

Montagemaschine	A	B	C
Modell der Struktur der Maschine			
Anschlussgeräte	28	35	7
Module	22	13	5
Komponenten	75	32	19
davon Komponenten aus Bauteilen	65	23	16
davon Komponenten aus einer Baueinheit	10	9	3
Binäre Ein- und Ausgänge	201	76	47
davon Kennzeichnung normgerecht	200	75	38
Verhaltensmodelle für Basisfunktionen			
Ein- und Ausgänge in Basisfunktionen	136	14	26
Komponenten für Basisfunktionen	39	5	7
Verhaltensmodelle für Multifunktionen			
Ein- und Ausgänge einzelner Multifunktionen	65	62	21
davon übereinstimmende Kennzeichnung mit dem Stromlaufplan	28	41	10
Komponenten für Multifunktionen	19	37	9

Tabelle 2: Mengengerüst zur automatisierten Erstellung für drei Montagemaschinen

Insgesamt konnte ein Modellierungstool realisiert werden, das die Methode zur automatisierten Modellerstellung für alle betrachteten Montagemaschinen umsetzt. Das resultierende Maschinenmodell kann im Simulationstool Virtuos geöffnet werden. Wenn die Komponenten eines automatisiert erstellten Maschinenmodells manuell nachbearbeitet und die Verhaltensmodelle für Baueinheiten hinzugefügt werden, ist es vollständig. Dann kann das Maschinenmodell in die virtuelle Maschine eingebettet und durch Anbindung der Steuerung eine Hardware-in-the-Loop-Simulation durchgeführt werden.

### **7.3 Bewertung der Aufwandsreduzierung durch den Einsatz des Modellierungstools**

Ziel der automatisierten Modellerstellung ist die Reduktion des Aufwands gegenüber einer konventionellen Erstellung des Maschinenmodells. Insgesamt teilt sich der Aufwand in die Erstellung des Modells der Struktur der Maschine und in die Erstellung der Verhaltensmodelle für Bauteile und für Baueinheiten auf. Auf Basis der betrachteten Montagemaschinen wurden die Aufwandsanteile bei einer konventionellen Modellierung abgeschätzt. Die Modellierung des Modells der Struktur der Maschine verlangt durchschnittlich in etwa 25% und die Modellierung der Verhaltensmodelle in etwa 75% des Aufwands.

Der Aufwand zur Erstellung des Modells der Struktur der Maschine wird durch den Einsatz des Modellierungstools nahezu auf null reduziert. Der Einsatz stiftet insbesondere bei großen Maschinen hohen Nutzen. Der Nutzen resultiert dann aus der hohen Anzahl der automatisiert erstellten Module, Komponenten und Anschlusspunkte sowie durch deren automatisierte Kennzeichnung und Weiterleitung.

Eine Reduzierung des Aufwands ergibt sich des Weiteren, da für fast alle binären Ein- und Ausgänge von Bauteilen Verhaltensmodelle in den Modellierungstiefen I und II automatisiert erstellt werden können. Ausgenommen sind Steuer- und Statussignale der Multifunktionen, deren Kennzeichnung in der E/A-Liste und im Stromlaufplan nicht übereinstimmen. Die Verhaltensmodelle benötigen allerdings eine manuelle Nachbearbeitung (Kapitel 7.2.2). Trotzdem kann durch deren automatisierte Erstellung in etwa zwei Drittel des Aufwands gegenüber einer manuellen Modellierung der Verhaltensmodelle von Bauteilen eingespart werden.

Die Verhaltensmodelle für Baueinheiten werden nicht automatisiert erstellt, sondern einer Bibliothek entnommen. Für einen Hersteller von Montagemaschinen wäre es vorteilhaft, wenn die Verhaltensmodelle für Baueinheiten durch den Lieferanten bereitgestellt würden. Wenn dies nicht möglich ist, muss sich der Aufbau einer Bibliothek durch eine hohe Wiederverwendung der Bibliotheksbausteine als rentabel erweisen.

Zusammengefasst kann der Aufwand durch eine automatisierte Erstellung eines Maschinenmodells, abhängig von der jeweiligen Montagemaschine, in etwa halbiert werden.



#### **7.4 Zusammenfassung der Realisierung**

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie die Methode zur automatisierten Modellerstellung in einem Modellierungstool realisiert wurde. Bei der Erprobung des Modellierungstools konnte für alle betrachteten Montagemaschinen ein Maschinenmodell automatisiert erstellt werden. Die Bewertung der Aufwandsreduzierung bezieht sich auf den Nutzen, der entsteht, wenn ein Anteil des Maschinenmodells automatisiert anstatt manuell erstellt wird. Insgesamt kann der Aufwand zur Modellerstellung auf etwa 50% reduziert werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hersteller von Montagemaschinen müssen ihre Engineeringprozesse fortwährend verbessern, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Zur Unterstützung des Engineerings werden stets neue Engineeringwerkzeuge am Markt angeboten. Ein großes Potential weist hierunter die Hardware-in-the-Loop-Simulation auf. Durch ihren Einsatz bei der Eigenschaftsabsicherung der Maschine kann insbesondere am Ende des Engineeringprozesses Zeit eingespart werden. Einem wirtschaftlichen Einsatz steht jedoch oftmals die aufwändige Erstellung des Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation entgegen. Um das Potential der Simulation ausschöpfen zu können, muss der Aufwand gegenüber einer manuellen Modellerstellung reduziert werden.

In dieser Arbeit wurde eine Methode zur automatisierten Erstellung des Maschinenmodells erarbeitet. Alternative, effiziente Modellierungsmethoden wären das simulationsgestützte Engineering und die Erstellung des Maschinenmodells aus einem Baukasten. Ersteres verlangt tief greifende, langfristige Änderungen im Engineeringprozess. Letzteres ist aufgrund der geringen Wiederverwendung von Bausteinen aus dem Baukasten bei produktspezifischen Montagemaschinen nicht wirtschaftlich. Daher wurde als Ziel dieser Arbeit gewählt, das Maschinenmodell automatisiert durch Verarbeitung der Engineeringdokumente, die bereits über die Montagemaschine vorhanden sind, zu erstellen. Dazu wurden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Es wurden systematisch Anforderungen für ein Maschinenmodell zur Hardware-in-the-Loop-Simulation identifiziert. Die Anforderungen umfassen die vollständige Abbildung der Maschine aus Sicht der Steuerung. Daraus resultiert, dass Bauteile und Baueinheiten in ihrer Modellierung zu unterscheiden sind.
- Neben der zwingenden Vollständigkeit des Abbilds der Maschine können die Komponenten der Maschine in unterschiedlichen Modellierungstiefen abgebildet werden. Zur Auswahl der Detaillierung wurden Modellierungstiefen definiert.
- Das Lösungskonzept basiert auf der Aufteilung in das Modell der Struktur der Maschine und in die Verhaltensmodelle für Bauteile und Baueinheiten. Das Modell der Struktur der Maschine und die Verhaltensmodelle für Bauteile werden automatisiert erstellt.
- Die Methode zur automatisierten Erstellung des Modells der Struktur der Maschine umfasst die Generierung der Module und Komponenten der Montagemaschine sowie

auch die Anbindung an die Steuerung im Maschinenmodell. Die zur Erstellung notwendigen Engineeringdokumente sind die Buskonfiguration und die E/A-Liste.

- Die Verhaltensmodelle für Bauteile werden auf Basis der Dokumentation der Basisfunktionen, einer Art Standardfunktion, und des Stromlaufplanes erstellt. Das 3D-CAD-Modell und der Fluidplan werden nicht zur Modellerstellung herangezogen. Die aus einem 3D-CAD-Modell extrahierbaren Informationen stellen sich für die Modellierung eines Maschinenmodells als unzureichend heraus. Der Informationsgehalt des Fluidplans wird bereits durch die Dokumentation der Basisfunktionen abgedeckt.
- Die automatisierte Modellerstellung wird von einem Modellierungstool übernommen, das die Engineeringdokumente einliest, die erarbeitete Methode ausführt und ein Maschinenmodell erstellt. Mit dem Modellierungstool konnten für alle betrachteten Montagemaschinen Maschinenmodelle erstellt werden. Die automatisiert erstellten Maschinenmodelle verlangen jedoch eine manuelle Nachbearbeitung im Simulationstool. Trotzdem kann durch den Einsatz des Modellierungstools der Aufwand bei der Erstellung eines Maschinenmodells zur Hardware-in-the-Loop-Simulation in etwa halbiert werden.

Um die manuelle Nachbearbeitung zu reduzieren, müssen weitere Informationen zur Modellerstellung bereitgestellt werden. Dies betrifft insbesondere Informationen über die Bewegungen und Interaktionen im Raum (Kapitel 6.1). Es wäre eine Dokumentation darüber notwendig, welche Aktoren welche Sensoren beeinflussen. An dieser Stelle ist die Dokumentation der Basisfunktionen eine wichtige Informationsquelle. Diese beinhaltet aber nicht den mittelbaren Einfluss von Aktoren auf Sensoren, z. B. durch den Materialfluss. Eine derartige Dokumentation wird im Engineeringprozess gewöhnlich nicht standardmäßig erstellt.

Demzufolge wäre es eine weitere Aufgabe abzuwägen, ob es effizient ist, zur Erweiterung der automatisierten Modellerstellung zusätzlich im Engineeringprozess ein Dokument für die Beschreibung von Zusammenhängen zwischen den Aktoren und Sensoren zu erstellen. Zum Beispiel könnten die benötigten Zusammenhänge zusätzlich in einem Weg-Zeit-Diagramm bzw. Taktzeitdiagramm eingetragen werden, welches bereits den Maschinenfunktionsablauf durch die Steuerung der Maschine darstellt.

Alternativ besteht die Aussicht, dass sich das simulationsgestützte Engineering weiter durchsetzt und die Erstellung des Maschinenmodells zur HiLS stärker in den Engineeringprozess integriert wird. Bei einer automatisierten Modellerstellung kann dann der

Informationsbedarf aus dem Informationsmodell, der Datenbasis des simulationsgestützten Engineerings, gedeckt werden.

## 9 Literatur

- /1/ Hesse, S.: *Montagemaschinen: Grundlagen und Prinzipien in Aufbau, Funktion, Antrieb und Steuerung montierender Maschinen.*  
Vogel Verlag, Würzburg, 1993
- /2/ Konold, P.; Reger, H.: *Praxis der Montagetechnik: Produktionsdesign, Planung, Systemgestaltung.*  
Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003
- /3/ Hesse, S.: *Grundlagen der Handhabungstechnik.*  
Carl Hanser Verlag, München, 2010
- /4/ Keibel, A.: *Konzeption und Realisierung eines integrierten Moduls zur Simulation und Steuerung von Kinematiksystemen.*  
Dissertation, Universität Dortmund, 2002
- /5/ Kreusch, K.: *Verifikation numerischer Steuerungen an virtuellen Werkzeugmaschinen.*  
Dissertation, BTU Cottbus, Aachen, 2002
- /6/ Röck, S.: *Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen.*  
Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007
- /7/ Isermann, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen.*  
Springer Verlag, Berlin, 1999
- /8/ Schlund, S.;  
Riekhof, F.;  
Winzer, P.: *Probleme bei der Entwicklung mechatronischer Systeme: Ergebnisse einer Industriebefragung.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 104 (1-2), S. 54-59, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- /9/ Gausemeier, J.: *Domänenübergreifende Vorgehensmodelle.*  
url.: [www.transmechatronic.de/index.php?id=153](http://www.transmechatronic.de/index.php?id=153),  
2011

- /10/ Klemm, P.; Rüdele, H.; Weimer T.: *Durchgängiges Engineering von mechatronischen Systemen.*  
In: Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, S. 101-131, Gesellschaft für Fertigungstechnik, Stuttgart, 2006
- /11/ Kluge, S.; Pflüger, T.; Westkämper, E.; Pedell, B.: *Modulare Montagesysteme.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 99(9), S. 592-597, Springer Verlag, Berlin, 2009
- /12/ Lechler, A.; Kircher, C.; Verl, A.: *Simulationsgestütztes mechatronisches Engineering.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 98(5), S. 377-383, Springer Verlag, Berlin, 2008
- /13/ VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.*  
Beuth Verlag, Berlin, 2004
- /14/ Shannon, R. E.: *Systems simulation the art and science.*  
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975
- /15/ Geisberger, E.; Schmidt, R.: *ProMiS - Projektmanagement für interdisziplinäre Systementwicklungen.*  
VDMA Verlag, Frankfurt, 2004
- /16/ Scheifele, D.; Müller, V.: *Anwendungen der Hardware-in-the-Loop-Simulation in der Produktionstechnik.*  
In: SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 25. -27. Nov., S. 377-386, VDE Verlag, Berlin, 2008
- /17/ Haufe, J.; Schneider, P.; Donath, U.; Reitz, S.: *Simulationsgestütztes Prototyping und Optimierung von Maschinensteuerungen.*  
In: 13. ASIM Fachtagung - Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, 1. -2. Okt., S. 367-376, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2008
- /18/ Hundt, L.; Lüder, A.; Peschke, J.: *AutomationML: Description of Logic Data.*  
url.: [www.automationml.org](http://www.automationml.org), 2008

- /19/ Dierßen, S.: *Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte.*  
Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2002
- /20/ Westkämper, E.: *Die digitale Fabrik – ein Produkt für Produkte.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 97(3), S. 107,  
Springer Verlag, Berlin, 2007
- /21/ VDI-Richtlinie 4499: *Digitale Fabrik.* Beuth Verlag, Berlin, 2008
- /22/ Engel, M.;  
Riegmann, T.;  
Schäfer, A.;  
Günther, U.: *Zehn Jahre digitale Fabrik in der Automobilindustrie.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb,  
105(3), S. 178-183, Carl Hanser Verlag, München,  
2010
- /23/ Hirsch, B.; Klemke, T.;  
Wulf, S.; Nyhuis, P.: *Digitale Werkzeuge in der Fabrikplanung – Bewertung und Auswahl.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb,  
105(3), S. 152-156, Carl Hanser Verlag, München,  
2010
- /24/ Pritschow, G.; Röck, S.;  
Rüdele, H.: *Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 95(5), S. 302-308,  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005
- /25/ Pritschow, G.;  
Croon, N.: *Wege zur virtuellen Werkzeugmaschine.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 92(5), Springer Verlag, Berlin, 2002
- /26/ Reinhart, G.;  
Wünsch, G.: *Economic Application of virtual commissioning to mechatronic production systems.*  
In: Production Engineering, 1(4), S. 371-379, Springer Verlag, Berlin, 2007
- /27/ Zäh, M. F.;  
Munzert, U.;  
Wünsch, G.: *Simulation von Montageanlagen in der Automobilindustrie.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 99(1-2), S. 18-21., Carl Hanser Verlag, München, 2004

- /28/ Zeugträger, K.: *Anlaufmanagement für Großanlagen.*  
Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 1998
- /29/ VDW-Bericht 0162: *Abteilungsübergreifende Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen.*  
WZL Aachen, VDW, Frankfurt, 1997
- /30/ Spath, D.;  
Landwehr, R.: *3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 90(7/8), S. 292-296,  
Springer Verlag, Berlin, 2000
- /31/ Zäh, M.; Wünsch, G.;  
Hensel, T.;  
Lindworsky, A.: *Feldstudie - Virtuelle Inbetriebnahme.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 96(10), S. 767-771,  
Springer Verlag, Berlin, 2006
- /32/ Mewes, J.: *Virtuelle Inbetriebnahme mit realen Automatisierungssystemen und virtuellen Maschinen.*  
In: Tagungsband der Deutsch-Niederländischen Automatisierungstage, Emden, 3. -4. Febr., 2005
- /33/ Scheifele, D.; Eger, U.;  
Röck, S.; Sekler, P.: *Potentiale der Hardware-in-the-Loop-Simulation für Maschinen und Anlagen.*  
In: SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 27. - 29. Nov, S. 555-565, VDE Verlag, Berlin, 2007
- /34/ Ramp-up/2: *Anlaufoptimierung durch Einsatz virtueller Fertigungssysteme.*  
BMBF-Projekt, 2007
- /35/ Denkena, B.,  
Brecher, C.: *Ramp-Up/2 - Anlaufoptimierung durch Einsatz virtueller Fertigungssysteme.*  
In: Schneller Produktionsanlauf in der Wertschöpfungskette, Band 5, VDMA Verlag, Frankfurt am Main, 2008
- /36/ Denkena, B.;  
Ammermann, C.;  
Hoppe, P.: *Ramp-Up/2 – Verkürzung von Fertigungsanläufen.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 98(3), S. 143-148,  
Springer Verlag, Berlin, 2008



- /37/ Hotz, I.; Schulze, T.: *Simulationsbasierte Frühwarnsysteme – Definition, Anforderungen, Architektur.*  
In: SimVis, Magdeburg, 2. -3. März, S. 63-78, SCS Publishing House e. V., Magdeburg, 2006
- /38/ Kain, S.; Frank, T.;  
Merz, M.; Schiller, F.;  
Heuschmann, C.: *Betriebsparallele Simulationsanwendungen - Methodik zur Klassifikation.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 52(6), S. 51-59, Oldenbourg Verlag, München, 2010
- /39/ Kain, S.;  
Heuschmann, C.;  
Schiller, F.: *Von der virtuellen Inbetriebnahme zur betriebsparallelen Simulation – Herausforderungen im Anlagenbetrieb und Nutzenpotentiale der betriebsparallelen Simulation.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 50(8), S. 48-52, Oldenbourg Verlag, München, 2008
- /40/ Abramovici, M.;  
Stekolschik, A.: *Methodische Ansätze für die Weiterverwendung der digitalen Produktmodelle in der Produktentwicklung.*  
In: Tagungsband 2. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Dresden, 23. -24. Sept., S. 91-100, Verlag Saxoprint, Dresden, 2004
- /41/ Fleischer, J.;  
Munzinger, C.;  
Kipfmüller, M.: *Aufwandsreduktion bei der Werkzeugmaschinenimulation.*  
In: wt Werkstatttechnik online, 98(4), S. 321-326, Springer Verlag, Berlin, 2008
- /42/ Menzel, T.;  
Brettschneider, J.: *Reales Engineering in virtueller Umgebung.*  
In: A&D Kompendium, S. 68-71, publish-industry Verlag GmbH, München, 2007/2008
- /43/ VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.*  
Beuth Verlag, Berlin, 1993

- /44/ Autorenkollektiv: *Forschungs- und Handlungsbedarf für zuverlässigere mechatronische Systeme.*  
Positionspapier, Projektträger des BMBF Produktions- und Fertigungstechnologien, 2005
- /45/ WieMod: *Wieder verwendbare Modelle für die virtuelle wissensbasierte Produktentwicklung.*  
BMBF-Projekt, url.: [www.wiemod.de](http://www.wiemod.de), 2010
- /46/ Brecher, C.;  
Karlberger, A.: *Modellgestützte Entwicklung von Werkzeugmaschinen.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 99(5), S. 300-303,  
Springer Verlag, Berlin, 2009
- /47/ Botaschanjan, J.;  
Hummel, B.;  
Lindworsky, A.: *Interdisziplinäre Funktionsmodellierung im Anlagenbau.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb,  
104(1-2), S. 71-75, Carl Hanser Verlag, München,  
2009
- /48/ Zäh, M.; Ehrenstraßer,  
M.; Guserle, R.;  
Lercher, B.;  
Pömbacher, C.;  
Wünsch, G.: *Integration von Simulationsmodellen im Werkzeugmaschinenbau.*  
VDI-Z Veröffentlichung, 3-2003, Düsseldorf, 2003
- /49/ AutoVIBN: *Automatische Generierung von Verhaltensmodellen aus CAD-Daten für die qualitätsorientierte virtuelle Inbetriebnahme.*  
BMW-gefördertes Projekt,  
url.: <http://autovibn.in.tum.de>, 2010
- /50/ Zäh, M.;  
Lindworsky, A.: *Virtuelle Inbetriebnahme - Nutzenmaximierung durch Automatisierung der Modellerstellung.*  
In: IFM Internationales Forum Mechatronik, Stuttgart,  
22. - 23. Sept., S. 413-424, 2008
- /51/ Bathelt, J.: *Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme.* Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2006

- /52/ Rauprich, G.; Haus, C.; Ahrens, W.: *PLT-CAE – Integration in gewerkübergreifendes Engineering und Plant – Maintenance.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 44(2), S. 50-62, Oldenbourg Verlag, München, 2002
- /53/ MIKADO: *Mechatronik-Kooperationsplattform für anforderungsgerechte Prüfung und Diagnose.*  
BMBF-Projekt, url.: [www.vp-mikado.de](http://www.vp-mikado.de), 2009
- /54/ Hayka, H.; Lüddemann, J.; Stark, R.: *Zuverlässigere Gestaltung mechatronischer Produktentstehung.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 103(10), S.714 - 719, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- /55/ Föderal-Initiative: url.: [www.foederal.de](http://www.foederal.de), 2004
- /56/ Kiefer, J.: *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau.*  
Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007
- /57/ Aquimo: *Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineeringprozesse.*  
BMBF-Projekt, url.: [www.aquimo.org](http://www.aquimo.org), 2010
- /58/ Litto, M.; Korajda, I.; Mangold, C.; Angerbauer, R.; Lils, W.; Lerche, M.: *Baukastenbasiertes Engineering mit Föderal. Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer.*  
VDMA Verlag, Frankfurt, 2004
- /59/ Verl, A.; Müller, V.; Haubelt, A.: *Baukastenbasiertes simulationsgestütztes Engineering.*  
In: A&D-Kompendium 2009/2010, S. 32-34, publish-industry Verlag GmbH, München, 2010
- /60/ AutomationML: url.: [www.automationml.org](http://www.automationml.org)

- /61/ Draht, R.; Miegel, V.: *AutomationML verbindet Werkzeuge der Anlagenplanung.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 50(7), S. 34-39, Oldenbourg Verlag, München, 2009
- /62/ IEC 62424 CDV: *Specification for representation of process control engineering requests in P&ID diagrams and for data exchange between P&ID tools and PCE-CAE tools.*  
Beuth Verlag, Berlin, 2007
- /63/ Hundt, L.; Lüder, A.;  
Drath, R.; Grimm, B.: *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML - Verhaltensbeschreibung in PLCopen XML.*  
Springer Verlag, Berlin, 2010
- /64/ IEC 61131-3: *Programmable Controllers – Part 3, Programming Languages.*  
Beuth Verlag, Berlin, 2003
- /65/ PLCopen XML: *Technical paper - XML formats for the IEC61131-3.*  
url.: [www.plcopen.org](http://www.plcopen.org)
- /66/ Bergert, M.; Höme, S.;  
Hundt, L.: *Verhaltensmodellierung für die virtuelle Inbetriebnahme.*  
In: Automation 2010, Baden-Baden, 15. -16. Juni, VDI Verlag, Düsseldorf, 2010
- /67/ OMG SysML: *System Modeling Language.*  
url.: [www.omgsysml.org](http://www.omgsysml.org)
- /68/ OMG UML2: *Unified Modeling Language.*  
url.: [www.uml.org](http://www.uml.org)
- /69/ Friedenthal, S.;  
Moore, A.; Steiner, R.: *OMG Systems Modeling Language Tutorial.*  
International Council of Systems Engineering, url.:  
[www.omgsysml.org](http://www.omgsysml.org), 2009
- /70/ Andel, F.; Konze, S.;  
Theissen, P.: *Interdisziplinäre UML-Modellierung.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 50(8), S. 54-60, Oldenbourg Verlag, München, 2009

- /71/ Hummel, B.; Braun, P.: *Towards an integrated system model for testing and verification of automation machines.*  
In: Proceedings of the 2008 international workshop on Models in software engineering, Leipzig, 10. -11. Mai, S. 51-56, ACM Press, New York, 2008
- /72/ Anderl, R.;  
Trippner, D.: *STEP – Standard for the Exchange of Product Model Data – Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP).*  
Teubner Verlag, Stuttgart, 2000
- /73/ Brecher, C.; Herfs, W.;  
Fayzullin, K.;  
Özdemir, D.;  
Feng, J.; Hamadou, M.;  
Müller, A.: *Integration und Durchgängigkeit von Information im Produktionsmittellebenszyklus.*  
In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105(4), S. 271-276, Carl Hanser Verlag, München, 2010
- /74/ Tiller, M.: *Introduction to Physical Modeling with Modelica.*  
Springer Verlag, Berlin, 2001
- /75/ Tomaszunas, J.: *Komponentenbasierte Maschinenmodellierung zur Echtzeit-Simulation für den Steuerungstest.*  
Dissertation, Technische Universität München, München, 1998
- /76/ Tomaszunas, J.;  
Bender, K.: *Komponentenbasierte Maschinenmodellierung zur Verkürzung der Inbetriebnahmezeit.*  
In: SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 25. -27. Nov, S. 230-239, iee Hüthig Fachverlage, Heidelberg, 1997
- /77/ Verl, A.; Müller, V.;  
Reuter, A.: *Disziplinübergreifendes Engineering. Integration von Simulationsdaten in mechatronische Komponentenmodelle.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 100(5), S. 399-406, Springer Verlag, Berlin, 2010

- /78/ Possel-Dölken, F.: *Mechatronische Modularisierung im Sondermaschinenbau*.  
In: 7. Paderborner Workshop - Entwurf Mechatronischer Systeme, Band 272, Paderborn, 18. -19. März, S. 357-369, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2010
- /79/ Fritsch, A.: *Durch Modularisierung zum mechatronischen Baukastensystem*.  
In: SPS/IPC/Drives 2008, Nürnberg, 25. - 27. Nov., S. 377-386, VDE Verlag, Berlin, 2008
- /80/ Hengel, K.: *Softwareentwicklung für speicherprogrammierbare Steuerungen im integrierten, rechnergestützten Konstruktionsprozess*.  
Dissertation, Universität Stuttgart, Springer Verlag, Berlin, 1993
- /81/ Kiefer, J.; Ollinger, L.; Bergert, M.: *Virtuelle Inbetriebnahme - Standardisierte Verhaltensmodellierung mechatronischer Betriebsmittel im automobilen Karosseriebau*.  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 51(7), S. 40-46, Oldenbourg Verlag, München, 2009
- /82/ Döbele, M.; Ruppert, L.: *Vorgehen und Methode zur Planung automatisierter Fertigungsanlagen mit wieder verwendbaren Planungskomponenten*.  
In: SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 25. -27. Nov, S. 521-529, VDE Verlag, Berlin, 2008
- /83/ GUSMA: *Gekoppelte unternehmensübergreifende Simulation mobiler Arbeitsmaschinen zur Virtualisierung der Produktentstehung*.  
BMBF-Projekt, url.: [www.gusma.de](http://www.gusma.de), 2011

- /84/ Bergert, M.;  
Diedrich, C.: *Durchgängige Verhaltensmodellierung von Betriebsmitteln zur Erzeugung digitaler Simulationsmodelle von Fertigungssystemen.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 50(7), S. 61-66, Oldenbourg Verlag, München, 2008
- /85/ Reinhart, G.;  
Hensel, T.;  
Lindworsky, A.;  
Spitzweg, M.: *Teilautomatisierter Aufbau von Simulationsmodellen.*  
In: wt Werkstattstechnik online, 97(9), S. 663-667, Springer Verlag, Berlin, 2007
- /86/ Bergert, M.; Kiefer, J.: *Mechatronic Data Models in Production Engineering.*  
In: 10th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Lissabon, 1. -2. Juli, 2010
- /87/ Ryssel, U.;  
Plönnings, J.;  
Kabitzsch, K.: *Generative function block design and composition.*  
In: IEEE International Workshop on Factory Communication Systems Proceedings, Turin, 28. -30. Juni, S. 253-262, 2006
- /88/ Wagner, T.: *Agentenunterstütztes Engineering von Automatisierungsanlagen.*  
In: Automatisierungstechnische Praxis, 50(4), S. 68-75, Oldenbourg Verlag, München, 2008
- /89/ Maurmaier, M;  
Lebschi, M.;  
Göhner, P.: *Modelltransformation zur konsistenten Generierung von Schaltplänen und Quellcode aus Matlab/Simulink-Modellen.*  
In: 7. Paderborner Workshop - Entwurf Mechatronischer Systeme, Band 272, Paderborn, 18. -19. März, S. 221-232, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2010
- /90/ Juhasz, T.;  
Schmucker, U.: *Automatic Model Conversion to Modelica for Dymola-based Mechatronic Simulation.*  
In: 6th International Modelica Conference, Bielefeld, 3. -4. März, S. 719-726, 2008

- /91/ Barbieri, L.; Bruno, F.; Caruso, F.; Muzzupappa, M.: *Innovative integration techniques between Virtual Reality systems and CAx tools.*  
In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38 (2008), S. 1085–1097, Springer Verlag, London, 2008
- /92/ Fluidtronic: *Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronische Systeme.*  
BMBF-Projekt, url.: [www.fluidtronic.de](http://www.fluidtronic.de), 2009
- /93/ Baum, H.; Dombrowski, R.; Birmes, G.: *Durchgängiges Engineering im Bereich Fluidtechnik.*  
In: O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 8 (2007), S. 467-471, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz, 2007
- /94/ Murrenhoff, H.; Dombrowski, R.; Verkoyen, T.: *Fluidtronic Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronische Systeme.*  
In: wt werkstattstechnik online, 99(1/2), Springer Verlag, Berlin, 2009
- /95/ Selke, C.: *Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung.*  
Dissertation, TU München, München, 2004
- /96/ Schob, U.: *A framework for automating the generation of machine simulation models.*  
In: World Academy of Science, Engineering and Technology 71, Paris, 28. -30. Juni, S. 571-577, 2010
- /97/ Schob, U.; Altmann, S.: *Automatisierte Maschinenmodellbildung aus CAE-Daten.*  
In: SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 25. - 27. Nov., S. 555-565, VDE Verlag, Berlin, 2008
- /98/ Schob, U.; Böttcher, R.; Blochwitz, T.; Oelsner, O.; Winter, M.: *Model based virtual startup of automation systems.*  
In: Proceedings 7th Modelica Conference, Como, 20. - 22. Sept., S. 790-797, 2009



- /99/ Kufner, A.; Haug, K.; Klemm, P.: *Modellierung von Montagemaschinen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation.*  
In: 7. Paderborner Workshop - Entwurf Mechatronischer Systeme, Band 272, Paderborn, 18. -19. März, S. 115-126, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2010
- /100/ Pritschow, G.; Röck, S.: *Hardware in the Loop Simulation of Machine Tools.*  
In: Annals of the CIRP, 53(1), S. 295-298, Paris, 2004
- /101/ Jursitzky, C.: *Pneumatikgrundlagen: Direkte Steuerung doppelwirkender Zylinder.*  
TU Wien, url.: [www.pneumatik-druckluft.com](http://www.pneumatik-druckluft.com), 2011
- /102/ ISG GmbH: Stuttgart, url.: [www.isg-stuttgart.de](http://www.isg-stuttgart.de)
- /103/ DIN EN Norm 81346-1: *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte - Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung - Teil 1: Allgemeine Regeln.*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- /104/ DIN EN Norm 81346-2: *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte - Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Teil 2: Klassifizierung von Objekten und Kodierung von Klassen.*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- /105/ Kufner, A.; Dreiss, P.; Klemm, P.: *Fortschritt bei Simulation von Montagemaschinen – Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen.*  
In: atp edition, 9 (2011), S. 888-895, Oldenbourg Verlag, München, 2011
- /106/ EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG: *EPLAN Electric P8, Beispielprojekt EPLAN Demo,* 2007
- /107/ DIN EN Norm 61082-1: *Dokumente der Elektrotechnik - Teil 1: Regeln.*  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006

- /108/ EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG: *Bosch Dokument*
- /109/ Johnson, R.; Gamma, E.; Helm, R.; Vlissides, J.: *Entwurfsmuster - Elemente wieder verwendbarer objektorientierter Software.* Addison-Wesley Verlag, München, 2004
- /110/ Eilebrecht, K.; Starke, G.: *Patterns kompakt - Entwurfsmuster für effektive Software-Entwicklung.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2010
- /111/ Altmann, S.; Blochwitz, T.: *Simulieren am virtuellen Maschinenprototyp.* In: Jahrbuch für Automation und Konstruktion, S. 114- 115, 2006
- /112/ ITI GmbH: Dresden, url.: [www.iti.de](http://www.iti.de)
- /113/ Mewes & Partner: Berlin, url.: [www.winmod.de](http://www.winmod.de)
- /114/ Wenk, M.: *Virtuell geht es schnell.* In: Automation Valley, (89), S. 18-19, Vogel Verlag, Würzburg, 2007
- /115/ Siemens AG: München, url.: [www.automation.siemens.com/mcms/mc/en/services/engineering-support/machine-simulator](http://www.automation.siemens.com/mcms/mc/en/services/engineering-support/machine-simulator)

## Lebenslauf

<b>Persönliches:</b>	Name	Annika Carolin Kufner
	Geburtsort	Nürnberg
	Geburtstag	08.07.1982
	Eltern	Sebastian Kufner und Gertrud Kufner, geb. Neuhöfer
	Familienstand	ledig
<b>Schulbildung:</b>	1988 - 1992	Grundschule, Neunkirchen am Brand
	1992 - 2001	Emil-von-Behring-Gymnasium, Spardorf, Kreis Erlangen, Abiturzeugnis vom 29. Juni 2001
<b>Studium:</b>	2001 - 2008	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens - Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt, Diplomzeugnis vom 29. Februar 2008
	08/2005 - 05/2006	Auslandsstudium an der University of Illinois, USA, Fachbereich Industrial Engineering
	05/2008 - 05/2011	Doktorandin, Robert Bosch GmbH, Zentrale Forschung und Voraentwicklung, Fertigungsautomatisierung, Schwieberdingen
<b>Berufstätigkeit:</b>	seit 08/2011	Research Scientist, Robert Bosch (South East Asia) Pte Ltd., Corporate Research, Singapore



# ISW/IPA Forschung und Praxis

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Herausgegeben bis Band 57 von Prof. Dr.-Ing. G. Stute †  
ab Band 58 von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.mult. Dr.-Ing. E.h G. Pritschow  
ab Band 161 von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Verl

---

## Erschienen bei Springer-Verlag:

- 1 Schmid, D.: Numerische Bahnsteuerung, 1973.
- 2 Schwegler, H.: Fräsbearbeitung gekrümmter Flächen, 1972.
- 3 Eisinger, J.: Numerisch gesteuerte Mehrachsenfräsmaschinen, 1972.
- 4 Nann, R.: Rechnersteuerung von Fertigungseinrichtungen, 1972.
- 5 Augsten, G.: Zweiachsige Nachformeinrichtungen, 1972.
- 6 Karl, B.: Die Automatisierung der Fertigungsvorbereitung durch NC-Programmierung, 1972.
- 7 Eitel, H.: NC-Programmiersystem, 1973.
- 8 Knorr, E.: Numerische Bahnsteuerung zur Erzeugung von Raumkurven auf rotationssymmetrischen Körpern, 1973.
- 9 Bumiller, S.: Viskohydraulischer Vorschubantrieb, 1974.
- 10 Maier, K.: Grenzregelung an Werkzeugmaschinen, 1974.
- 11 Waelkens, J.: NC-Programmierung, 1974.
- 12 Bauer, E.: Rechnerdirektsteuerung von Fertigungseinrichtungen, 1975.
- 13 König, H.: Entwurf und Strukturtheorie von Steuerungen für Fertigungseinrichtungen, 1976.
- 14 Damsohn, H.: Fünfachsiges NC-Fräsen, 1976.
- 15 Jetter, H.: Programmierbare Steuerungen, 1976.
- 16 Henning, H.: Fünfachsiges NC-Fräsen gekrümmter Flächen, 1976.
- 17 Boelke, K.: Analyse und Beurteilung von Lagesteuerungen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, 1977.

- 18 Götz, F.-R.: Regelsystem mit Modellrückkopplung für variable Streckenverstärkung, 1977.
- 19 Tränkle, H.: Auswirkungen der Fehler in den Positionen der Maschinenachsen beim fünfachsigem Fräsen, 1977.
- 20 Stof, P.: Untersuchungen über die Reduzierung dynamischer Bahnabweichungen bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, 1978.
- 21 Wilhelm, R.: Planung und Auslegung des Materialflusses flexibler Fertigungssysteme, 1978.
- 22 Kappen, N.: Entwicklung und Einsatz einer direkten digitalen Grenzregelung für eine Fräsmaschine mit CNC, 1979.
- 23 Klug, H. G.: Integration automatisierter technischer Betriebsbereiche, 1978.
- 24 Binder, D.: Interpolation in numerischen Bahnsteuerungen, 1979.
- 25 Klingler, O.: Steuerung spanender Werkzeugmaschinen mit Hilfe von Grenzregeleinrichtungen, 1979.
- 26 Schenke, L.: Auslegung einer technologisch-geometrischen Grenzregelung für die Fräsbearbeitung, 1979.
- 27 Wörn, H.: Numerische Steuersysteme – Aufbau und Schnittstellen eines Mehrprozessorsteuersystems, 1979.
- 28 Osofisan, P. B.: Verbesserung des Datenflusses beim fünfachsigem NC-Fräsen, 1979.
- 29 Berner, J.: Verknüpfung fertigungstechnischer NC-Programmiersysteme, 1979.
- 30 Böbel, K.-H.: Rechnerunterstützte Auslegung von Vorschubantrieben, 1979.
- 31 Dreher, W.: NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken in fertigungstechnisch orientierten Programmiersystemen, 1980.
- 32 Schurr, R.: Rechnerunterstützte Projektsteuerung hydrostatischer Anlagen, 1981.
- 33 Sielaff, W.: Fünfachsiges NC-Umfangfräsen verwundener Regelflächen. Beitrag zur Technologie und Teileprogrammierung, 1981.
- 34 Hesselbach, J.: Digitale Lageregelung an numerisch gesteuerten Fertigungseinrichtungen, 1981.
- 35 Fischer, P.: Rechnerunterstützte Erstellung von Schaltplänen am Beispiel der automatisierten Hydraulikplanzeichnung, 1981.
- 36 Ackermann, U.: Rechnerunterstützte Auswahl elektrischer Antriebe für spanende Werkzeugmaschinen, 1981.

- 37 Döttling, W.: Flexible Fertigungssysteme – Steuerung und Überwachung des Fertigungsablaufs, 1981.
- 38 Firnau, J.: Flexible Fertigungssysteme – Entwicklung und Erprobung eines zentralen Steuersystems, 1982.
- 39 Herrscher, A.: Flexible Fertigungssysteme – Entwurf und Realisierung prozeßnaher Steuerungsfunktionen, 1982.
- 40 Spieth, U.: Numerische Steuersysteme – Hardwareaufbau und Ablaufsteuerung eines Mehrprozessorsteuersystems, 1982.
- 41 Schimmele, A.: Rechnerunterstützter Entwurf von Funktionssteuerungen für Fertigungseinrichtungen, 1982.
- 42 Sanzenbacher, M.: NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken mit gekrümmten Flächen, 1982.
- 43 Walter, W.: Interaktive NC-Programmierung von Werkstücken mit gekrümmten Flächen, 1982.
- 44 Huan, J.: Bahnregelung zur Bahnerzeugung an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, 1982.
- 45 Erne, H.: Taktile Sensorführung für Handhabungseinrichtungen – Systematik und Auslegung der Steuerungen, 1982.
- 46 Plasch, D.: Numerische Steuersysteme – Standardisierte Softwareschnittstellen in Mehrprozessor-Steuersystemen, 1983.
- 47 Wang, Z. L.: NC-Programmierung – Maschinennaher Einsatz von fertigungstechnisch orientierten Programmiersystemen, 1983.
- 48 Schwager, J.: Diagnose steuerexterner Fehler an Fertigungseinrichtungen, 1983.
- 49 Klemm, P.: Strukturierung von flexiblen Bediensystemen für numerische Steuerungen, 1984.
- 50 Runge, W.: Simulation des dynamischen Verhaltens elektrohydraulischer Schaltungen – Einsatz von geräteorientierten, universellen Simulationsbausteinen, 1984.
- 51 Steinhilber, H.: Planung und Realisierung von Werkzeugversorgungssystemen für die NC-Bearbeitung, 1984.
- 52 Ohnheiser, R.: Integrierte Erstellung numerischer Steuerdaten für flexible Fertigungssysteme, 1984.
- 53 Keppeler, M.: Führungsgrößenerzeugung für numerisch bahngesteuerte Industrieroboter, 1984.
- 54 Kohler, P.: Automatisiertes Messen mit NC-Werkzeugmaschinen, 1985.

- 55 Rieger, K.-H.: Rechnerunterstützte Projektierung der Hardware und Software von Speicherprogrammierten Steuerungen, 1985.
- 56 Vogt, G.: Digitale Regelung von Asynchronmotoren für numerisch gesteuerte Fertigungseinrichtungen, 1985.
- 57 Chmielnicki, S.: Flexible Fertigungssysteme – Simulation der Prozesse als Hilfsmittel zur Planung und zum Test von Steuerprogrammen, 1985.
- 58 Renn, W.: Struktur und Aufbau prozeßnaher Steuergeräte zur Verkettung in flexiblen Fertigungssystemen, 1986.
- 59 Harig, K.: Quantisierung im Lageregelkreis numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen, 1986.
- 60 Frank, H.: Programmier- und Überwachungsfunktionen für teileartbezogene NC-Werkzeugmaschinen, 1986.
- 61 Möller, H.: Integrierte Überwachungs- und Diagnose-Systeme für numerische Steuerungen, 1986.
- 62 Fink, H.: Einsatz speicherprogrammierbarer Steuerungen in der Fertigungstechnik, 1986.
- 63 Fleckenstein, J.: Zustandsgraphen für SPS – Grafikunterstützte Programmierung und steuerungsunabhängige Darstellung, 1987.
- 64 Wagner, E.: Steuerungen von Koordinatenmeßgeräten mit schaltenden und messenden Tastsystemen, 1987.
- 65 Grimm, W.: Diagnosesystem für steuerungsperiphere Fehler an Fertigungseinrichtungen, 1987.
- 66 Swoboda, W.: Digitale Lageregelung für Maschinen mit schwach gedämpften schwingungsfähigen Bewegungsachsen, 1987.
- 67 Gruhler, G.: Sensorgeführte Programmierung bahngesteuerter Industrieroboter, 1987.
- 68 Walker, B.: Konfigurierbarer Funktionsblock Geometriedatenverarbeitung für numerische Steuerungen, 1987.
- 69 Mayer, J.: Werkzeugorganisation für flexible Fertigungszellen und -systeme, 1988.
- 70 Lederer, R.: Programmierung von NC-Drehmaschinen mit mehreren Werkzeugschlitten, 1988.
- 71 Häberle, G.: NC-Musterprogrammierung für rechnerintegrierte Textilfertigung, 1988.
- 72 Pfeiffer, D.: Kompensation thermisch bedingter Bearbeitungsfehler durch prozeßnahe Qualitätsregelung, 1988.



- 73 Schmidt, W.: Grafikunterstütztes Simulationssystem für komplexe Bearbeitungsvorgänge in numerischen Steuerungen, 1988.
- 74 Egner, M.: Hochdynamische Lageregelung mit elektrohydraulischen Antrieben, 1988.
- 75 Schittenhelm, W.: Konfigurierbares Bedienungssystem für Steuerungen an Fertigungseinrichtungen, 1988.
- 76 Scheifele, D.: Grafisch dynamische Simulation des Bearbeitungsvorgangs für Doppelschlittendrehmaschinen, 1988.
- 77 Keuper, G.: Automatisierte Identifikation der Streckenparameter servohydraulischer Vorschubantriebe, 1989.
- 78 Kayser, K.-H.: Kollisionserkennung in numerischen Steuerungen mit der Distanzfeldmethode, 1989.
- 79 Viefhaus, R.: Fräsergeometriekorrektur in Numerischen Steuerungen für das fünfachsige Fräsen, 1989.
- 80 Zirbs, J.: Fertigungsgerechte Aufbereitung von Flächenverbänden bei der NC-Programmierung im Formenbau, 1989.
- 81 Ruoff, W.: Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern, 1989.
- 82 Jantzer, M.: Bahnverhalten und Regelung fahrerloser Transportsysteme ohne Spurbindung, 1990.
- 83 Schumacher, H.: Einheitliche Programmierung von Automatisierungskomponenten roboterbestückter Bearbeitungs- und Montagezellen, 1991.
- 84 Schimonyi, J.: NC-Programmierung für das Werkzeugschleifen, 1991.
- 85 Wurst, K.-H.: Flexible Robotersysteme – Konzeption und Realisierung modularer Roboterkomponenten, 1991.
- 86 Hagl, R.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Vorschubantrieben mit selbstanpassender Lageregelung, 1991.
- 87 Krebsler, G.: Betriebssystem für NC mit einheitlichen Schnittstellen, 1992.
- 88 Lei, W.-T.: Flächenorientierte Steuerdatenaufbereitung für das fünfachsige Fräsen, 1992.
- 89 Diehl, G.: Steuerungsperipheres Diagnosesystem für Fertigungseinrichtungen auf Basis überwachungsgerechter Komponenten, 1992.
- 90 Nepustil, U.: Offene NC-Schnittstellen zur Korrektur von Fertigungsfehlern, 1992.
- 91 Bauder, M.: Konfigurierbare Robotersteuerung mit allgemeiner Transformation, 1992.

- 92 Philipp, W.: Regelung mechanisch steifer Direktantriebe für Werkzeugmaschinen, 1992.
- 93 Härdtner, G. M.: Wissensstrukturierung in Diagnoseexpertensystemen für Fertigungseinrichtungen, 1992.
- 94 Wiedmann, H.: Objektorientierte Wissensrepräsentation für die modellbasierte Diagnose an Fertigungseinrichtungen, 1993.
- 95 Rudloff, H.: Hochgenaue Konturerzeugung bei Bewegungsachsen mit einer dominanten mechanischen Resonanzstelle, 1993.
- 96 Brantner, K.: Adaptierbares Leitsteuerungssystem für flexible Produktionssysteme, 1993.
- 97 Kugler, W.: Kommunikationsmechanismen für offene Numerische Steuerungssysteme, 1994.
- 98 Schnurr, B.: Elektrodynamisches Antriebssystem zur Unrundbearbeitung, 1994.
- 99 Schneider, J.: Fehlerreaktion mit Speicherprogrammierbaren Steuerungen – ein Beitrag zur Fehlertoleranz, 1994.
- 100 Siewert, U.: Systematische Erstellung adaptierbarer Leitsteuerungssoftware am Beispiel der Durchsetzungsplanung, 1994.
- 101 Heger, G. F. J.: Maschinenferner Qualitätsregelkreis in flexiblen Fertigungssystemen, 1994.
- 102 Hofmeister, W.: Objektorientiert strukturiertes Programmiersystem für NC-Mehrschlittenmaschinen, 1994.
- 103 Horn, A.: Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten, 1994.
- 104 Rentschler, U.: Fehlertolerantes Präzisionsfügen, 1995.
- 105 Junghans, G.: Modulares grafikunterstütztes Simulationssystem für Bearbeitungs- und Handhabungsvorgänge, 1995.
- 106 Heller, J.: Sensorgestützte Bewegungserzeugung leitlinienloser Transporthfahrzeuge, 1995.
- 107 Wieland, E.: Anwendungsorientierte Programmierung für die robotergestützte Montage, 1995.
- 108 Ketterer, G.: Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungsachsen, 1995.
- 109 Reibetanz, Th.: Situationsorientierte Bearbeitungsmodellierung zur NC-Programmierung, 1995.

- 110 Frager, O.: Durchgängige Programmierung von Fertigungszellen, 1996.
- 111 Ordenewitz, R.: Betriebsweite Bereitstellung von Werkzeuginformationen, 1996.
- 112 Daniel, C.: Dynamisches Konfigurieren von Steuerungssoftware für offene Systeme, 1996.
- 113 Angerbauer, R.: Anwenderorientierte Programmierung fahrerloser Transportsysteme, 1996.
- 114 Krauß, F.: Splinverarbeitung in numerischen Steuerungen für das fünfachsiges Fräsen, 1996.
- 115 Schittenhelm, K.-M.: Einsatz vorgefilterter Führungsgrößen für Bewegungsachsen zur Bahnerzeugung, 1997.
- 116 Häberle, U.: Einheitliche Anwenderschnittstelle für Feldbussysteme, 1997.
- 117 Strassacker, D.: Testumgebung für die Implementierung und Inbetriebnahme eines adaptierbaren Leitsteuerungssystems, 1997.
- 118 Renz, B.: Hochdynamische Strahlagekorrektursysteme zur Erhöhung der Bahnengenauigkeit von CO<sub>2</sub>-Laserbearbeitungsmaschinen, 1997.
- 119 Itterheim, C.: Objektorientiertes Bearbeitungsmodell für Freiformflächen – Erstellung und maschinengebundene Modifikation –, 1997.
- 120 Müller, J.: Objektorientierte Softwareentwicklung für offene numerische Steuerungen, 1997.
- 121 Glöckler, M.: Verbesserung des Störverhaltens elektrohydraulischer lage geregelter Zylinderantriebe, 1998.
- 122 Uhl, J.: Entwurfssystematik für ein dezentral strukturiertes, objektorientiertes Fertigungsleitsystem, 1998.
- 123 Hammann, G.: Modellierung des Abtragsverhaltens elastischer, robotergeführter Schleifwerkzeuge, 1998.
- 124 Scholich-Tessmann, W.: Direktantriebe für Industrieroboter, 1998.
- 125 Wagner, R.: Robotersysteme zum kraftgeführten Entgraten grobtolerierter Leichtmetallwerkstücke mit Fräsworkzeugen, 1998.
- 126 Anders, C.: Adaptierbares Diagnosesystem bei Transferstraßen, 1998.
- 127 Fahrbach, C.: Regelung hochdynamischer elektrischer Servo-Direktantriebe in Fertigungseinrichtungen, 1999.
- 128 Sperling, W.: Modulare Systemplattformen für offene Steuerungssysteme, 1999.

## **Erschienen bei Jost-Jetter Verlag:**

- 129 Kehl, G.: Gestaltung von Formgedächtnis-Aktorsystemen für sensorgeführte Inspektionsgeräte, 1999.
- 130 Brandl, Th.: Anlageninformationssystem - Informationsmodell und Erstellungssystematik, 1999.
- 131 Gronbach, H.: Simulationswerkzeug für die Gestaltung modularer CO<sub>2</sub>-Laserbearbeitungsmaschinen, 1999.
- 132 Lutz, R.: Softwaretechnik für Maschinennahe Steuerungsfunktionen bei Fertigungseinrichtungen, 1999.
- 133 Tran, T. L.: Allgemeine Transformation für Maschinen mit Parallelkinematiken, 2000.
- 134 Bretschneider, J.: Reglerselbsteinstellung für digital geregelte, elektromechanische Antriebssysteme an Werkzeugmaschinen, 2000.
- 135 Schoenberg, M.: Zuverlässiger Fertigungsprozess bei Transferstraßen durch präventive Maßnahmen, 2000.
- 136 Uhl, A.: Flexibles Telerobotersteuerungssystem auf der Basis offener numerischer Steuerungen, 2000.
- 137 Rui Li: Agentenbasierte NC-Planung für die Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszentren, 2001.
- 138 Wildermuth, D.: Bahnvorbereitung in numerischen Steuerungen für Parallelkinematiken, 2001.
- 139 Handel, D.: Werkergerechte NC-Programmierung zur Komplett-Schleifbearbeitung von Bohrwerkzeugen, 2001.
- 140 Kosiedowski, U.: Adaptive Vorsteuerverfahren für elektromechanische Bewegungsachsen an Werkzeugmaschinen, 2001.
- 141 Haug, K.: Laser-Lichtschnittsensorik für die Automatisierung von Metall-Schutzgasschweißprozessen, 2002.
- 142 Hohenadel, J.: Einheitliches Steuerungssystem für NC und RC, 2002.
- 143 Wälde, K.: Sicherstellung der Softwarequalität von Anwendungsmodulen und Systemplattformen in offenen Steuerungssystemen, 2002.
- 144 Litto, M.: Störungsinformationssystem – Informationsmodell und Erstellungssystematik, 2002.
- 145 Schweiker, A.: Offene numerische Steuerungen für prozessabhängige Bearbeitungen – vereinheitlichte Struktur, Funktionen und Schnittstellen – , 2003.
- 146 Rempp, B.: Regelungstechnische Untersuchung durchsatzgeregelter Produktionssysteme, 2003.

- 147 Eppler, C.: Kompensation fremderregter Schwingungen in Antriebssystemen mit Umlaufgetrieben, 2003.
- 148 Weiner, M.: Wiederverwendungsgerechte Entwicklungssystematik von Feinplanungssoftware für die flexible Fertigung, 2004.
- 149 McCormac, St.: Lageregelung hydraulischer Manipulatoren unter Einsatz eines Ferraris-Sensors, 2004.
- 150 Lehner, W.-D.: Regelung von Vorschubachsen unter Verwendung der Relativbeschleunigung, 2005.
- 151 Lewek, J.: Adaptierbares Informationssystem zur Erstellung baukastenbasierter Fertigungseinrichtungen, 2005.
- 152 Laible, U.: Aufbau numerischer Steuerungssysteme für sicherheitskritische Anwendungen, 2005.
- 153 Bürger, Th.: Durchgängige analytische Qualitätssicherung für numerische Steuerungssoftware, 2005.
- 154 Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung, 2005.
- 155 Heusinger, S.: STEP-NC-basierter Korrekturkreis für die Schlichtbearbeitung von Freiformflächen, 2005.
- 156 Kirchberger, R.: Verbesserte Auswertung inkrementeller Messsysteme durch schnelle Signal-Vorverarbeitung, 2005.
- 157 Conrath, M.: Systematische Gestaltung von frequenzadaptierbaren Ultraschall-Werkzeugsystemen zum Einsatz in fertigungstechnischen Prozessen, 2005.
- 158 Wadehn, W.: Gestaltung von Antriebssystemen für formadaptive Strukturen, 2005.
- 159 Horber, H.: Fugendetektion bei Lichtbogenschweißprozessen mit robuster Signalverarbeitung für optische Sensoren, 2006.
- 160 Dreyer, J.: Situative Informationsbereitstellung an Fertigungseinrichtungen Informationsmodell und Erstellungssystematik, 2006.
- 161 Fritz, S.: Rekonstruktion von Prozesskräften aus Antriebssignalen von Werkzeugmaschinen, 2006.
- 162 Staudt, S.: Spezifikation und Konformitätstest zur Interoperabilität von automatisierten Produktionsmaschinen, 2006.
- 163 Reichle, R.: Einsatz von Internet-Werkzeugen und -Diensten in numerischen Steuerungssystemen für Werkzeugmaschinen, 2006.
- 164 Kaiser, L.: Systematik für das Qualitäts- und Projektmanagement bei der Abwicklung von Unikatprojekten, 2006.

- 165 Garber, Th.: Nutzung des redundanten Freiheitsgrades von sechsachsigen Parallelkinematik-Maschinen, 2007.
- 166 Altenburger, R.: Dynamische Eigenschaften und Regelung mechanisch verkoppelter Antriebssysteme, 2007.
- 167 Korajda, B.: Steuerungstechnische Verfahren zur echtzeitfähigen Kompensation der Fräserabdrängung, 2007.
- 168 Röck, S.: Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen, 2007.
- 169 Prieße, J.: Verfahren zur durchgehenden dezentralen Planung in Werkstattstrukturen, 2007.
- 170 Boye, T.: Vorhersage der kinematischen Kalibriergröße von Parallelkinematiken, 2008.
- 171 Joannides, M.: Ein Beitrag zur volumenorientierten 3D-Objektrekonstruktion aus digitalen Daten, 2009.
- 172 Pruschek, P.: Verfahren zur anwendungsgerechten Parametrierung der Steuerung und Regelung von Vorschubachsen, 2009.
- 173 Fritsch, D.: Steuerung selbstorganisierender Multi-Roboter-Systeme für dynamische Sammelaufgaben am Beispiel der Bekämpfung maritimer Ölverschmutzungen, 2009.
- 174 Schmitz, S.: Industrielle Powerline-Kommunikation für Antriebseinheiten in Werkzeugmaschinen, 2010.
- 175 Bengel, M.: Workpiece-centered Approach to Reconfiguration in Manufacturing Engineering, 2010.
- 176 Weimer, T.: Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in Fabrikplanung und -betrieb, 2010.
- 177 Oglochin, V.: Maschinenübergreifender agentenbasierter Informationsaustausch für die Störungsbeseitigung, 2010.
- 178 Kramer, C.: Offene Antriebsreglerplattform, 2011.
- 179 Stotz, M.: Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen, 2011.
- 180 Selig, A.: Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten, 2011.
- 181 Meyer, C.: Aufnahme und Nachbearbeitung von Bahnen bei der Programmierung durch Vormachen von Industrierobotern, 2011.
- 182 Meier, M.: Verfahren zum emulationsgestützten MES-Engineering für die Photovoltaikindustrie, 2011.

- 183 Walther, M.: Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben, 2011.
- 184 Lechler, A.: Konzeption einer funktional einheitlichen Applikationsschnittstelle für Ethernet-basierte Bussysteme, 2011.
- 185 Kircher, C.: Selbstadaptierende NC-Steuerung für rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen, 2011.
- 186 Puzik, A.: Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik, 2011.
- 187 Neher, J.: Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen, 2012.
- 188 Kufner, A.: Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen, 2012.

