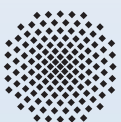
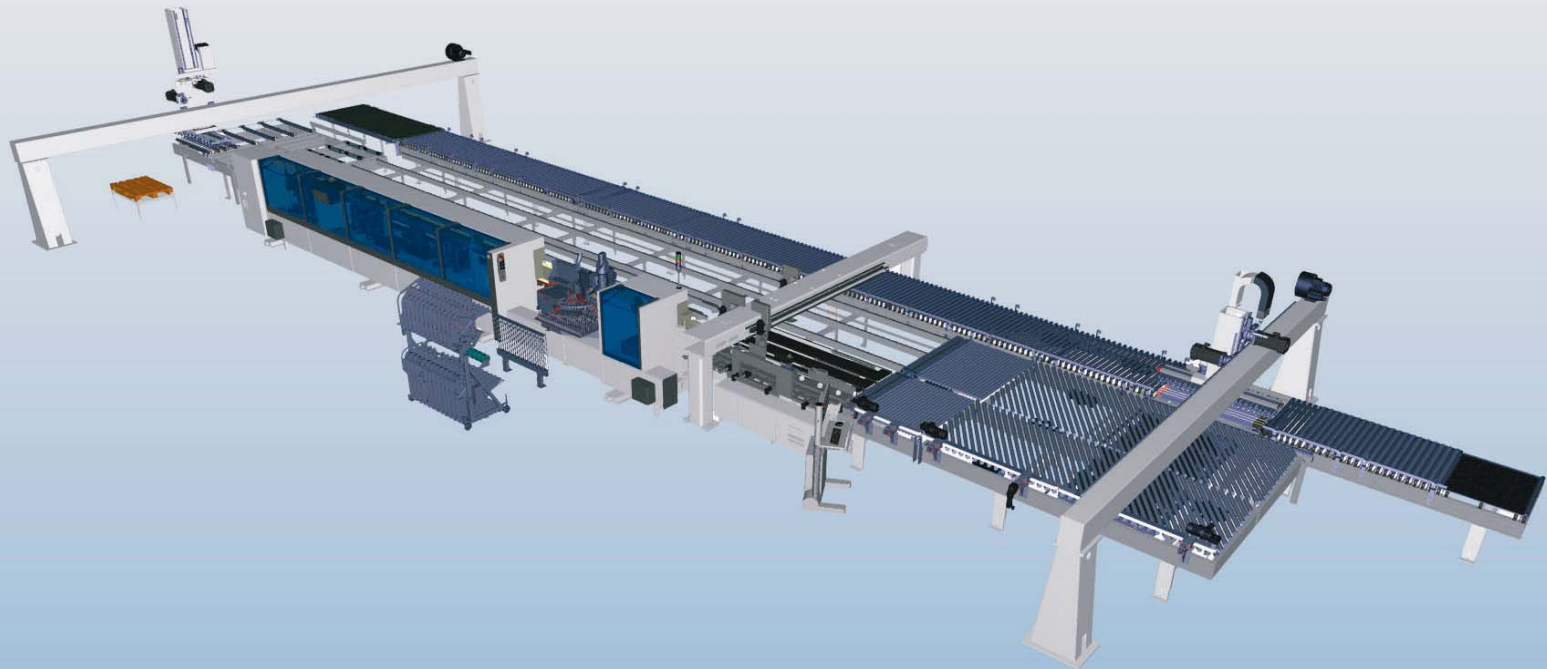


STEFAN MICHAEL SCHEIFELE

---

# Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1



## **STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 107**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Stefan Michael Scheifele

## **Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11/9 70-11 01  
info@ipa.fraunhofer.de; www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>1,4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel<sup>3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,5</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl<sup>3</sup>

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup>Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup>Institut für Photovoltaik (IPV) der Universität Stuttgart

<sup>5</sup>Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

Titelbild: © Mit freundlicher Genehmigung der Homag GmbH

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1618-5

**D 93**

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70-25 00

Telefax 07 11 9 70-25 08

E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)

URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

# **Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Stefan Michael Scheifele**

aus Bietigheim-Bissingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Tag der mündlichen Prüfung: 06. September 2019

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen  
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2019



---

## Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl für die Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich danke ich herzlich für das Interesse am Thema und der Übernahme des Mitberichts.

Den Herren Prof. i.R. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Günter Pritschow, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Kayser und Dipl.-Ing. (FH) Winfried Hills danke ich für die sehr hilfreichen fachlichen Diskussionen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ISW, besonders den Herren Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Dr.-Ing. Armin Lechler, Dr.-Ing. Christian Scheifele und Dipl.-Ing. Jens Friedrich danke ich für die konstruktive und stets freundschaftliche Zusammenarbeit. Die vielen Diskussionen im Kollegenkreis haben mich fachlich und persönlich bereichert und geprägt.

Ein großer Dank geht an die Kollegen der Homag Group, besonders Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ludwig Albrecht, sowie der Industriellen Steuerungstechnik GmbH (ISG), besonders den Herren Dr.-Ing. Christian Daniel und Dipl.-Ing. Ulrich Eger, für die erfolgreiche, freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten.

Bei Frau Heide Kreuzburg bedanke ich mich für die fürsorgliche Organisation des Promotionsprozesses.

Die vielseitige Unterstützung aus meinem Familien- und Freundeskreis hat ferner zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Eltern Edith Scheifele und Dr.-Ing. Dieter Scheifele für die Förderung meiner Begabungen und die vielseitige Unterstützung meiner Promotion. Ein großer Dank geht an meinen Bruder Herrn Dr.-Ing. Christian Scheifele.

Stefan Scheifele

im März 2020



---

## Kurzfassung

Vom Maschinenbau erwartet der Markt kundenspezifische und kurzfristig lieferbare Maschinen und Anlagen in hoher Qualität bei zunehmender Komplexität, bedingt durch einen zunehmenden Automatisierungsgrad. In den letzten Jahren optimierten innovative Anlagenhersteller dafür ihren Entwicklungsprozess durch Softwaretools für die Projektierung und durch Generatoren für die weitgehend automatische Erstellung von anlagenspezifischer Software und Parameterlisten für die Automatisierungsgeräte. Obwohl die dabei genutzten einzelnen Softwarebausteine immer wieder verwendet werden und man diese weitgehend als fehlerfrei erwarten darf, ist die neue automatisch generierte Kombination dieser oft nicht fehlerfrei. Bis zum Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme, welche die reale Steuerung an einem virtuellen Abbild der realen Maschine, der sog. „virtuellen Maschine“, betreibt und testet, konnten solche Fehler häufig erst bei der Inbetriebnahme der Anlage erkannt werden und waren dann aufwändig unter Zeitdruck zu korrigieren. Der Aufbau einer solchen virtuellen Maschine ist heute eine manuelle, zusätzliche und teure Aufgabe für Experten, obwohl doch die reale Maschine selbst samt Steuerungstechnik weitgehend automatisch im Engineeringprozess konfiguriert, parametrisiert und programmiert werden kann.

Im Rahmen der Arbeit wird daher zunächst dargestellt, nach welchen Prinzipien sich Maschinen und Anlagen heute auf Basis eines Baukastens aus wiederverwendbaren mechatronischen Baugruppen erstellen lassen, um dann der Frage nachzugehen, wie sich die mechatronische Aufteilung in Baugruppen auf die virtuelle Maschine übertragen lässt. Durch die anschließende Überführung von mechatronischen Baugruppen in cyber-physische Systeme (CPS) wird eine 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe umgesetzt, was den im Maschinenbau eingeführten Engineeringprozess im Kern unverändert lässt, den zu verändern bereits frühere andere Ansätze in der Praxis hat scheitern lassen. Zudem entsteht durch die CPS-Sichtweise die Möglichkeit, kinematische Ketten und Querbeziehungen aus der virtuellen Maschine zu erkennen und so die Erstellung des Simulationsmodells erstmals ganzheitlich zu automatisieren.



---

## Short summary

The market expects customer-specific and quickly available machines and systems of high quality and increasing complexity from mechanical engineering, which is caused by an increasing degree of automation. In recent years, innovative plant manufacturers have optimized their development processes with software tools for commissioning and generators for the largely automatic creation of plant-specific software and parameter lists for automation devices. Although the individual software modules used for this are used again and again and can be expected to be largely error-free, the new automatically generated combination of these is often not error-free. Until the use of virtual commissioning, which operates and tests the real controller on a virtual image of the real machine, the so-called "virtual machine", such errors could often only be detected when the system was commissioned and then had to be corrected under time pressure. Today, setting up such a virtual machine is a manual, additional and expensive task for experts, even though the real machine itself, including the control technology, can be configured, parameterized and programmed largely automatically in the engineering process.

In the context of this dissertation, the principles according to which machines and systems can today be created from reusable mechatronic modules on the basis of a modular system will therefore first be presented, in order to then investigate the question of how the mechatronic division into modules can be transferred to the virtual machine. Through the subsequent conversion of mechatronic assemblies into cyber-physical systems (CPS), a 1:1 relationship between the real and the virtual assembly is implemented, which leaves the engineering process introduced in mechanical engineering unchanged in its core, which has already failed in practice in other approaches to change. In addition, the CPS perspective makes it possible to recognize kinematic chains and cross-relationships from the virtual machine, thus automating the creation of the simulation model holistically for the first time.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort des Autors .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>III</b>
<b>Short summary .....</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einführung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
1.1 Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer Systeme .....	2
1.2 Unterstützung durch die virtuelle Inbetriebnahme .....	4
1.3 Der „Digitale Zwilling“ im Kontext der virtuellen Inbetriebnahme .....	8
1.4 Grundlegende Anforderungen an die virtuelle Inbetriebnahme einer Maschine bzw. Anlage.....	12
<b>2 Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Anforderungsanalyse .....</b>	<b>17</b>
<b>4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im     Maschinenbau .....</b>	<b>19</b>
4.1 Modularisierung der Hardware .....	19
4.2 Modularisierung der Software.....	26
4.2.1 Individuelle Anpassung des Steuerungssystems .....	28
4.3 Mechatronische Module.....	29
4.3.1 Begriffsdefinition „Mechatronik“.....	29
4.3.2 Die mechatronische Hardware.....	30
4.4 Mechatronisches, funktionsorientiertes Engineering von Produktionsmaschinen auf Basis des mechatronischen Informationsmodells .....	32
4.5 Projektierung mechatronischer Maschinen und Anlagen.....	36

4.6	Zusammenfassung zum Stand der Technik.....	39
4.7	Unterstützung des Entwicklungsprozesses durch die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) .....	39
4.7.1	Echtzeitfähige Hardware-In-The-Loop Simulation .....	41
4.7.2	Ansätze zur automatisierten Modellerstellung .....	43
4.7.3	Zusammenfassung .....	45
4.7.4	Lösungsansatz .....	46
<b>5</b>	<b>Konzeption .....</b>	<b>49</b>
5.1	Schnittstellen mechatronischer Baugruppen .....	50
5.1.1	Kommunikative Schnittstelle.....	50
5.1.2	Funktionale Schnittstelle.....	53
5.1.3	Mechanische Schnittstelle .....	54
5.1.4	Energetische Schnittstelle .....	57
5.1.5	Kompatibilität von Baugruppen.....	58
5.1.6	Zusammenfassung .....	58
5.2	Einführung virtueller Baugruppen.....	59
5.2.1	Bedeutung der P-Schicht für die VU.....	60
5.2.2	Bedeutung der Daten der F-Schicht für die VU .....	62
5.2.3	Bedeutung der Daten der M-Schicht für die VU .....	64
5.2.4	Bedeutung der Daten der C-Schicht für die VU.....	69
5.2.5	Zusammenfassung .....	69
5.3	Definition einer Kommissionierungsliste.....	70
5.4	Aufbau einer virtuellen Anlage aus VU.....	72
5.5	Integration in den mechatronischen Engineeringprozess.....	74
5.5.1	Einführung einer einheitlichen Baugruppensicht.....	76
5.5.2	Nachweis der Ableitbarkeit der für die virtuelle Maschine notwendigen Sichten auf eine CPS-Modellierung .....	79
5.6	Zusammenfassung.....	83

5.7	Konzeption des Modellgenerators zum automatisierten Aufbau einer virtuellen Maschine bzw. Anlage .....	83
5.8	Wandel des mechatronischen Engineeringprozesses hin zum Engineering auf Basis von CPS.....	88
5.8.1	Rekonfiguration und Modernisierung vorhandener Maschinen und Anlagen.....	91
<b>6</b>	<b>Realisierung .....</b>	<b>93</b>
6.1	Ergänzung einer CPS „Spindelkopf“ durch ein Verhaltens- und ein Geometriemodell .....	93
6.1.1	Modellierung des Verhaltensmodells .....	94
6.1.2	Modellierung des Geometriemodells.....	99
6.2	Ergänzung einer CPS „Materialflusselement“ durch ein Verhaltens- und ein Geometriemodell.....	100
6.3	Ergänzung von CPS für Werkzeuge und Werkzeugaufnahmen .....	104
6.4	Realisierung des Modellgenerators .....	107
<b>7</b>	<b>Verifikation .....</b>	<b>111</b>
7.1	Fazit zur Verifikation .....	117
7.2	Technology Readiness Level.....	118
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Der mechatronische Entwicklungsprozess nach Förderal .....	1
Abbildung 1-2:	V-Modell als Makrozyklus, entwickelt aus (VDI 2206) .....	3
Abbildung 1-3:	Anteil der Einzeldisziplinen am Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme, nach (Eigner et al. 2014) .....	5
Abbildung 1-4:	Zeitanteile bei der Inbetriebnahme, nach (VDW 1997) .....	5
Abbildung 1-5:	Festgelegte Lebensdauerkosten über die Zeit zur Beseitigung von Mängeln, nach (Walden et al. 2015) .....	6
Abbildung 1-6:	Gegenüberstellung des mechatronischen Entwicklungsprozesses ohne und mit VIBN .....	7
Abbildung 1-7:	Schematischer Aufbau einer komplexen Anlagensimulation mit Echtzeitkommunikation zwischen den Anlagenteilen .....	13
Abbildung 2-1:	Mechatronisches Engineering unterstützt durch den Digitalen Zwilling .....	16
Abbildung 4-1:	Klassischer Aufbau am Beispiel einer Achseinheit (Wurst et al. 2006) .....	20
Abbildung 4-2:	Rekonfigurierbares Robotersystem (Pritschow et al. 2009) .....	21
Abbildung 4-3:	Funktionale Integration am Beispiel einer Achseinheit (Wurst et al. 2006) .....	23
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung eines Baukastens für modulare Maschinen (Scheifele et al. 2016a) .....	24
Abbildung 4-5:	Modulares Hochleistungs-Dreh-Fräszentrum RatioLine der INDEX-Werke GmbH & Co. KG (INDEX RatioLine) .....	25
Abbildung 4-6:	Infrastruktur des OSACA Systems (Pritschow et al. 2001) .....	27

---

Abbildung 4-7:	Mechatronik – Synergie aus dem Zusammenwirken verschiedener Disziplinen, entwickelt aus (Isermann 2008) .....	30
Abbildung 4-8:	Anordnung einer Werkzeugmaschine mit modularem Design (Pritschow et al. 2003) .....	31
Abbildung 4-9:	Engineering-Prozess mit Hilfe von wiederverwendbaren mechatronischen Komponenten (nach (Angerbauer et al. 2010)) .....	34
Abbildung 4-10:	Teilprozesse Entwicklung und Auftragsdurchlauf, entwickelt aus (Angerbauer et al. 2010) unter Berücksichtigung des baukastenbasierten Engineerings .....	35
Abbildung 4-11:	Einfluss der Entwicklungsphasen auf Kosten, Zeit und Qualität (nach (Angerbauer et al. 2010)) .....	36
Abbildung 4-12:	Ablauf der Projektierung mit EPEDA 3, nach (Doll 2010) .....	37
Abbildung 4-13:	Referenzbild „Engineering mechatronischer Maschinen und Anlagen“ (Scheifele et al. 2016a) .....	39
Abbildung 4-14:	Gesamtarchitektur eines Hardware-in-the-Loop Simulators nach (Pritschow et al. 2005) .....	42
Abbildung 4-15:	Vorgehensmodell bei der Erstellung einer HILS .....	43
Abbildung 4-16:	Homogenisierung des Engineerings realer und virtueller Maschinen (Scheifele et al. 2016b) .....	47
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Steuerungssystem und Baugruppe .....	51
Abbildung 5-2:	Schematische Darstellung von Funktionalitätsbeziehungen zwischen Baugruppen .....	54
Abbildung 5-3:	Konstruktionszeichnung eines Werkzeugwechselsystems mit hervorgehobenem Konstruktionsnullpunkt KN0 .....	55
Abbildung 5-4:	Skelettmodell eines Maschinenauftrisses .....	56

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-5:	Projektierungsablauf mit Unterstützung der CFPM-Schicht .....	59
Abbildung 5-6:	Notwendige Informationen aus den P-Schichten für die Erstellung der virtuellen Baugruppe .....	60
Abbildung 5-7:	Modellierung nach dem EVA-Prinzip, nach (Scheifele et al. 2016a), unter Berücksichtigung der P-Schicht .....	61
Abbildung 5-8:	Schematische Darstellung der Abbildung von Funktionalitätsbeziehungen zwischen virtuellen Baugruppen.....	64
Abbildung 5-9:	Beschreibung einer kinematischen Kette in Denavit-Hartenberg-Notation (Roddeck 2016) .....	65
Abbildung 5-10:	Montagekoordinatensysteme von drei Maschinenunterbaugruppen, (DIN 4003-210) .....	66
Abbildung 5-11:	Skelettmodell beispielhaft auf virtuellen Baugruppen angewandt.....	67
Abbildung 5-12:	Schematische Darstellung der Transformation der CAD-Baugruppe in ein Skelettmodell der virtuellen Baugruppe .....	68
Abbildung 5-13:	Aufbau einer virtuellen Maschine mit der Skelettmethode.....	68
Abbildung 5-14:	Aufbau einer Kommissionierungsliste, entwickelt aus (Litto et al. 2004) .....	71
Abbildung 5-15:	Aufbau einer Funktionsbaugruppe, entwickelt aus (Litto et al. 2004) .....	72
Abbildung 5-16:	Ergänzung der Entwicklungsphasen um die virtuellen Baugruppen und der virtuellen Absicherung der Konstruktion .....	75
Abbildung 5-17:	Homogenisierung des Engineerings realer und virtueller Maschinen (Scheifele et al. 2016b) .....	76

---

Abbildung 5-18:	Zusammenführung der Modelle im mechatronischen Baukasten zum cyber-physischen System (CPS).....	77
Abbildung 5-19:	Verschiedene Sichtweisen auf dasselbe CPS .....	78
Abbildung 5-20:	Sichtenkonzept auf ein CPPS .....	78
Abbildung 5-21:	Referenzbild „Projektierung von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS)“ .....	79
Abbildung 5-22:	3-achsige Fräsmaschine zur Überprüfung der Konzeption .....	80
Abbildung 5-23:	Experiment zur ersten Überprüfung des Ansatzes nach (Scheifele et al. 2016b).....	81
Abbildung 5-24:	Stand der Generierung des Verhaltensmodells durch den Modellgenerator nach Schritt 5 (schematische Darstellung) .....	85
Abbildung 5-25:	Stand der Generierung des Verhaltensmodells durch den Modellgenerator nach Schritt 8 (schematische Darstellung der mechanischen Verkettung).....	86
Abbildung 5-26:	Ergebnis der automatischen Erstellung des Geometriemodells (schematische Darstellung) .....	87
Abbildung 5-27:	Aufbau eines reduzierten (virtuellen) CPPS beim Kunden, nach Scheifele et al. 2017.....	88
Abbildung 5-28:	Projektierungsprozess eines CPPS aus einem CPS-Baukasten heraus, nach Scheifele et al. 2017.....	89
Abbildung 5-29:	Bereitstellung der CPS-Daten über ein Kommunikationssystem, nach Scheifele et al. 2017 .....	92
Abbildung 6-1:	Umsetzungsbeispiel Funktionsbaugruppe „Spindelkopf“ .....	93
Abbildung 6-2:	Kommissionierungsliste des Spindelkopfes .....	94
Abbildung 6-3:	Vorgehen bei der Modellierung eines Verhaltensmodells .....	95

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6-4:	Modellierung einer Rotationsachse mit Sercos-Antriebsumrichter .....	97
Abbildung 6-5:	Beispielhafte Modellierung der MU_11X_Basic .....	98
Abbildung 6-6:	Trennung des Spindelkopfes in Geometriebaugruppen (GBgr) und Kombination zum Geometriemodell (GU).....	99
Abbildung 6-7:	Geometriemodell des Linear-Elements .....	101
Abbildung 6-8:	Geometriemodell des Kurven-Elements.....	102
Abbildung 6-9:	Modellierung des Verhaltensmodells von Materialflussanwendungen.....	103
Abbildung 6-10:	Gesamtaufbau der Förderanlage aus 4 Linear-Elementen, zwei Kurven-Elementen und zwei Werkstücksensoren .....	104
Abbildung 6-11:	Konstruktionszeichnung eines Werkzeugschaftes mit Kegel 7/24 nach (DIN ISO 7388-1).....	105
Abbildung 6-12:	Koordinatensysteme an einer Werkzeugeinheit nach DIN 4003-172 (DIN 4003-172) .....	106
Abbildung 6-13:	Übertragen der DIN-Normen auf den Teller eines Werkzeugwechslers. Die funktionalen Schnittstellen des Werkzeugwechslers liegt auf der Bezugsebene.....	107
Abbildung 6-14:	Ablaufplan des Modellgenerators ausgehend von einer Kommissionierungsliste.....	110
Abbildung 7-1:	Ablauf der Generierung einer HILS (schematische Darstellung).....	111
Abbildung 7-2:	Funktionsbaugruppen (CPS) der Kommissionierungsliste von Maschine 1 .....	113
Abbildung 7-3:	Automatisiert erstelltes Geometriemodell der Maschine 1 aus den virtuellen Funktionsbaugruppen von Abbildung 7-2.....	114

Abbildung 7-4:	Beispielmaschine aus virtuellen Baugruppen, Werkzeugverwaltung und Materialflusselemente.....	115
Abbildung 7-5:	Anlagenteil einer Fertigungsanlage für die vollautomatisierte Möbelfertigung .....	116

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Generierung von Simulationsmodellen .....	45
Tabelle 2:	Namenskonvention für Ein-/Ausgänge .....	52
Tabelle 3:	Vergleich der benötigten Aufbauzeiten der virtuellen Maschine für Maschine 1 .....	113
Tabelle 4:	Vergleich der benötigten Aufbauzeiten der virtuellen Maschine für Maschine 2 .....	116
Tabelle 5:	Abschließender Vergleich der Anforderungen aus Kapitel 3 mit dem Ergebnis dieser Arbeit .....	121

---

## Abkürzungsverzeichnis

API	Programmiersprachen-Schnittstelle, engl. „Application Programming Interface“
BU	Verhaltensmodell, engl. „Behavior Unit“
BMK	Betriebsmittelkennzeichen
CNC	rechnergestützte numerische Steuerung, engl. „Computerized Numerical Control“
CPS	Cyber-physisches System
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.
E/A	Eingang/Ausgang, bzw. Eingänge/Ausgänge (eines Steuerungssystems oder einer Komponente)
EK	Einzelkomponente
ENI	EtherCAT Network Information, Feldbusbeschreibungdatei
FAT	Werksabnahme, engl. „Factory Acceptance Test“
FU	Funktionsbaugruppe, engl. „Functional Unit“
GU	Geometriemodell, engl. „Geometry Unit“
HIL	Hardware-in-the-Loop
HILS	Hardware-in-the-Loop Simulation
IBN	Inbetriebnahme einer Maschine oder Anlage
MIL	Model-in-the-Loop
MILS	Model-in-the-Loop Simulation
MU	Mechatronische Baugruppe, engl. „Machine Unit“
PDO	Prozessdatenobjekt, bzw. Prozessdatenobjekte
PLC	Englische Bezeichnung für eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)
SAT	Abnahmetest beim Kunden, engl. „Site Acceptance Test“
SDO	Servicedatenobjekt, bzw. Servicedatenobjekt
SIL	Software-in-the-Loop
SILS	Software-in-the-Loop Simulation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

## Abkürzungsverzeichnis

---

VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme einer Maschine oder Anlage
VU	Virtuelle mechatronische Baugruppe, engl. „Virtual Unit“
XML	Erweiterbare Auszeichnungssprache (engl. „Extensible Markup Language“)

---

# 1 Einführung und Motivation

Im heutigen Maschinen- und Anlagenbau spielt die Wiederverwendbarkeit einmal erstellter Konstruktionen eine große Rolle, denn nur so können Maschinen und Anlagen wirtschaftlich und auf hohem Qualitätsniveau mit kurzen Lieferzeiten hergestellt werden. Hinzu kommen Trends wie der zunehmende Wettbewerb und Kostendruck, sich verkürzende Planungs- und Realisierungszeiten, die zunehmende Komplexität und der Wandel hin zu automatisierten Anlagen. (Westkämper et al. 2009; Reuter et al. 2010; Jasperneite 2013; Weber 2015; Roth 2016; Uhlmann et al. 2017)

Gerade im Sondermaschinenbau haben sich deshalb modulare Maschinenkonzepte durchgesetzt: Maschinen lassen sich aus mechatronischen Baugruppen, welche in einem Baukasten organisiert sind, so aufbauen, dass sie die gewünschten Fertigungsaufgaben optimal erfüllen können. Der zugrundeliegende mechatronische Entwicklungsprozess ist jedoch individuell und herstellerspezifisch. Aus diesem Grund wird der Entwicklungsprozess heran gezogen, welcher im Forschungsprojekt „Föederal“ (Litto et al. 2004) entwickelt, standardisiert und dokumentiert ist. Dieser ist sequenziell und disziplinübergreifend organisiert (vgl. Abbildung 1-1):

Zuerst wird die Maschine mechanisch konstruiert, anschließend erfolgt die elektrische Konstruktion, der Aufbau, die Inbetriebnahme (IBN) und abschließend die Abnahme beim Kunden. Teil der Konstruktionsphase ist auch die Programmierung der benötigten Software. Verzögerungen innerhalb einem der Prozessschritte wirken sich somit negativ auf die Durchlaufzeit des Gesamtprozesses aus – meist geht dies zu Lasten der Inbetriebnahme als letztem Produktionsschritt. Kann der Zeitverzug nicht ausgeglichen und damit der versprochene Termin zum Produktionsstart nicht eingehalten werden, drohen Kundenunzufriedenheit, Mehrkosten (Nacharbeit, Konventionalstrafe, etc.) sowie ungeplante Personalbindung.

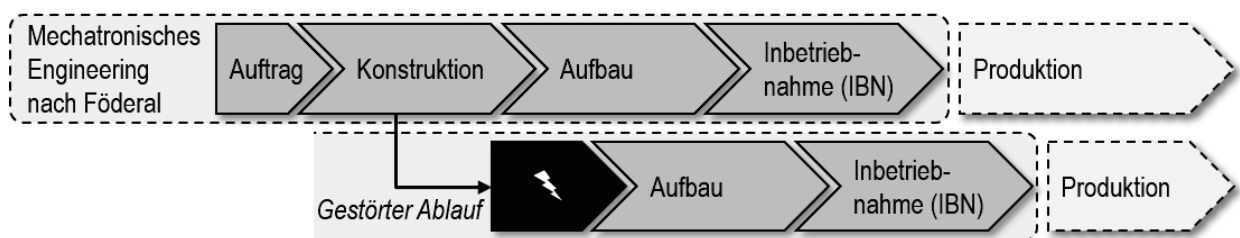


Abbildung 1-1: Der mechatronische Entwicklungsprozess nach Föederal

Der mechatronische Entwicklungsprozess setzt zudem auf viel Expertenwissen. Eine disziplinübergreifende und ganzheitliche Absicherung der Konstruktion findet nicht statt, sodass man erst bei der Inbetriebnahme erkennt, ob die Konstruktion wie vorgesehen funktioniert. Kann die Maschine die zugesagten Spezifikationen nicht erfüllen, werden zeitintensive Nacharbeiten oder sogar Neukonstruktionen notwendig.

### 1.1 Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer Systeme

Der Entwicklungsprozess nach Föederal basiert auf dem Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer Systeme, dem sog. V-Modell. Der VDI hat diesen in seiner Richtlinie 2206 (VDI 2206:2004-6) definiert. Unter Entwurf wird dabei *„die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen“* (Haberfellner et al. 1994) verstanden.

Abbildung 1-2 stellt das V-Modell nach VDI 2206 dar. Nach VDI 2206 besitzt es als Eingangsdaten die Anforderungen, welche den Ausgangspunkt eines konkreten Entwicklungsauftrags bilden. Das als Ergebnis des V-Modells entwickelte Produkt wird an diesen Anforderungen gemessen.

Die erste Phase des V-Modells ist der Systementwurf, der das Gesamtkonzept domänenübergreifend festlegt und abstrakt die physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Produktes beschreibt. Der darauffolgende domänenspezifische Entwurf konkretisiert diese in den am Entwurf beteiligten Domänen.

Die Systemintegrationsphase fasst anschließend die domänenspezifischen Ergebnisse zu einem Gesamtsystem zusammen und überprüft deren Zusammenspiel.

Begleitet werden die drei Phasen „Systementwurf“, „domänenspezifischer Entwurf“ und „Systemintegration“ durch die „Modellbildung und Analyse“. Hierbei werden die Systemeigenschaften abgebildet und z. B. mit rechnergestützten Methoden, wie z. B. der „virtuellen Inbetriebnahme“ untersucht.

Während den einzelnen Phasen des V-Modells findet ständig eine „Eigenschaftsabsicherung“ statt, welche sicherstellen soll, dass der aktuelle Stand des Entwurfs mit den anfangs formulierten Anforderungen übereinstimmt.

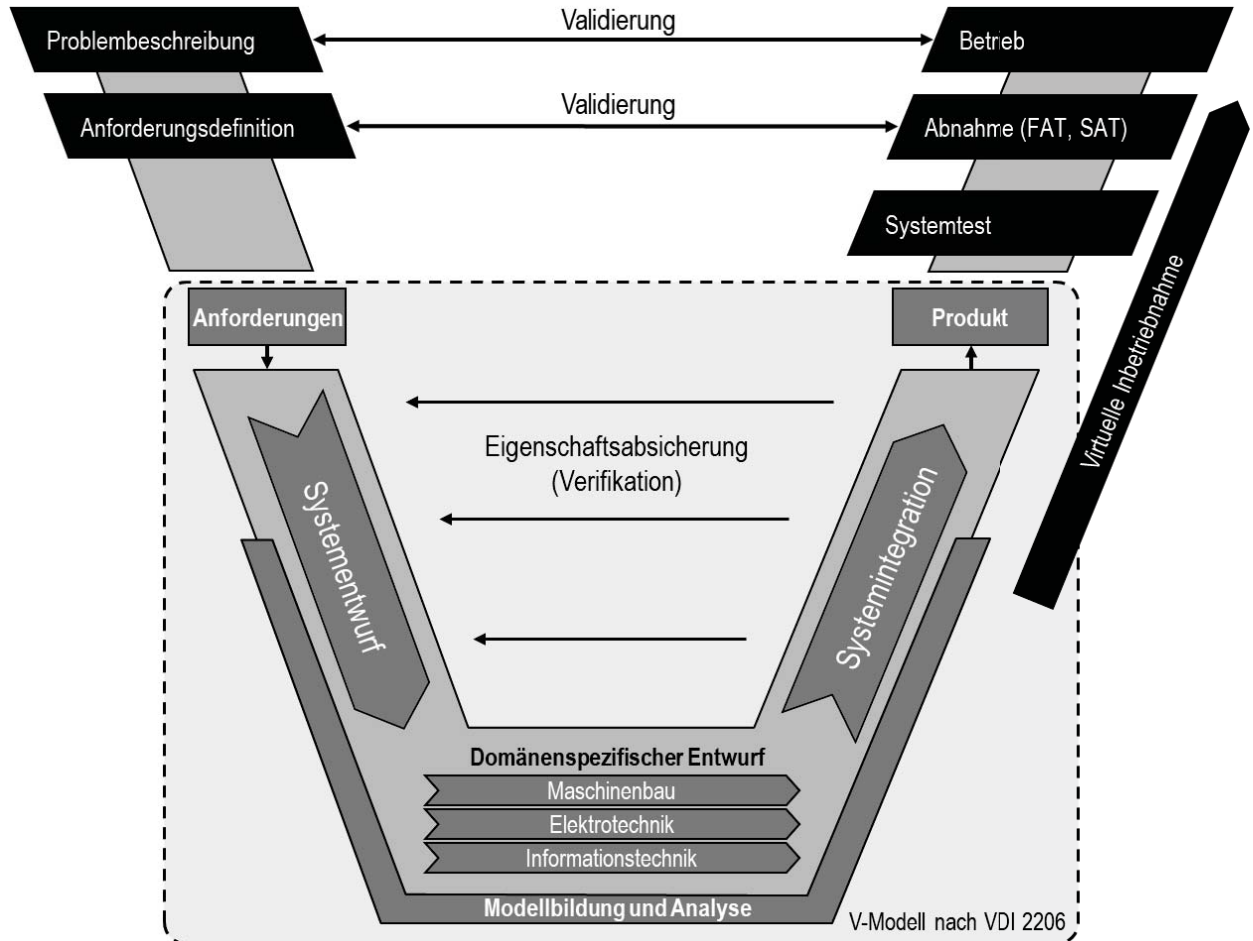


Abbildung 1-2: V-Modell als Makrozyklus, entwickelt aus (VDI 2206)

Für die Entwicklung einer Maschine bzw. Anlage muss das V-Modell jedoch um weitere Phasen ergänzt werden. Noch bevor ein Entwicklungsauftrag vergeben werden kann, muss zunächst das Problem detailliert beschrieben werden. Hieraus werden die Anforderungen definiert. Ist die Entwicklung des Produktes abgeschlossen schließen sich weitere Validierungsschritte an. Hierzu gehört die Phase des Systemtests, der Abnahme, sowie der Betrieb. Die Phase der Abnahme unterteilt sich dabei in die Werksabnahme (engl. „Factory Acceptance Test“, kurz „FAT“) beim Hersteller und den Abnahmetest am Zielort beim Kunden (engl. „Site Acceptance Test“, kurz „SAT“).

Mit der Entwicklung von Tools für die virtuelle Inbetriebnahme, bei der die reale Steuerung gegen ein Simulationsmodell der Maschine oder Anlage getestet wird, ergänzt

sich eine weitere, zum V-Modell parallele Phase. Auf diese soll im folgenden Kapitel 1.2 eingegangen und hier nur zur Vollständigkeit erwähnt werden.

Während die Eigenschaftsabsicherung nach VDI 2206 eine Verifikation in Form einer Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Produkt/Prozess/System und seiner Spezifikation darstellt, findet während der Abnahme, sowie dem Betrieb eine Validierung in Form einer Bewertung des Produkts, des Prozesses oder des Systems bezogen auf seinen Einsatzzweck statt.

Das Ergebnis eines Durchlaufs durch das V-Modell, der sog. „Makrozyklus“, ist das „Produkt“. Durch einen mehrfachen Durchlauf des V-Modells, mit dem Produkt des letzten Durchlaufs als Ausgangslage, lassen sich so die verschiedenen Produktreifegrade (Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt, etc.) beschreiben. Mit jedem Durchlauf nimmt somit die Konkretisierung des Produkts zu. Je komplexer ein Produkt, desto mehr Durchläufe durch das V-Modell sind erforderlich.

### **1.2 Unterstützung durch die virtuelle Inbetriebnahme**

In den letzten Jahren hat sich zudem gezeigt, dass die Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Maschine oder Anlage über die Hardware für sich genommen nicht mehr ausreicht, um den Innovationsprozess voran zu treiben. Die Funktionalität einer Maschine oder Anlage wird immer mehr durch ihre Software bestimmt (vgl. Abbildung 1-3). Eine Unterscheidung von Wettbewerbern und die Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen basiert immer mehr auf dieser. Software erlaubt es, die in Massenproduktion gefertigten Hardwareelemente zielgerichtet auf bestimmte Aufgaben auszurichten und dafür einzusetzen und dabei diese Lösungen exakt auf die Erfordernisse der entsprechenden Anwendungen zuzuschneiden (acatech 2010).

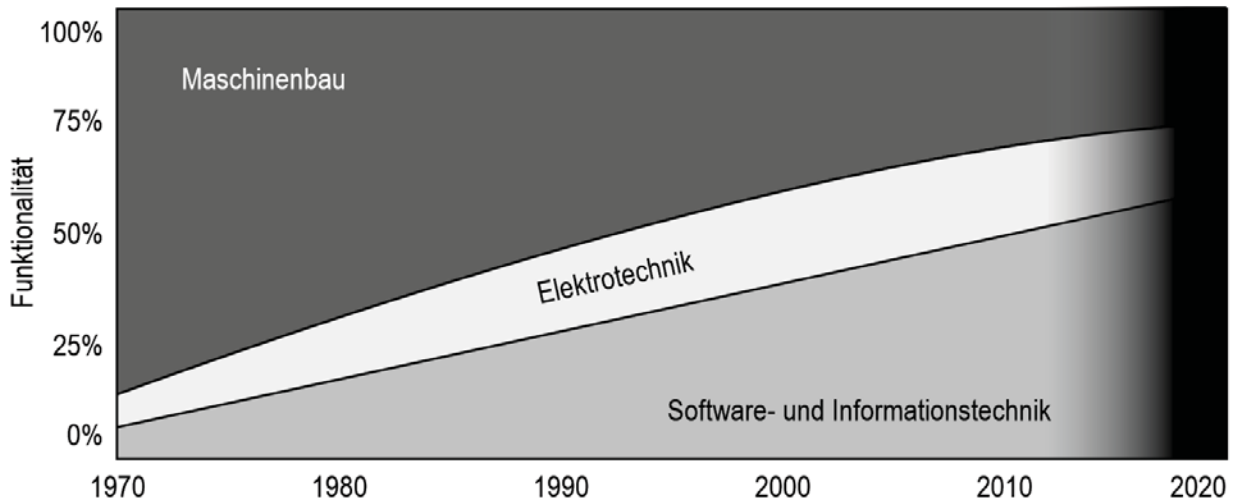


Abbildung 1-3: Anteil der Einzeldisziplinen am Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme, nach (Eigner et al. 2014)

Es ist ersichtlich, dass ein hoher Anteil der benötigten Projektlaufzeit somit auf die Erkennung und Behebung von Softwarefehlern während der Inbetriebnahmephase entfällt (VDW 1997). Der Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW) nennt für die benötigte Dauer der Inbetriebnahmephase zwischen 15 % und 25 % der Gesamtprojektdauer. Hiervon werden 90 % der Zeit für die Inbetriebnahme der Elektrik und der Steuerungstechnik benötigt, wovon 70 % durch Softwarefehlern begründet sind (vgl. Abbildung 1-4). Über 85 % der bei Inbetriebnahmen verursachten Störungen und Schäden gründen sich auf Fehlern und Mängeln aus den Vorphasen des Entwicklungsprozesses (Weber 2015).

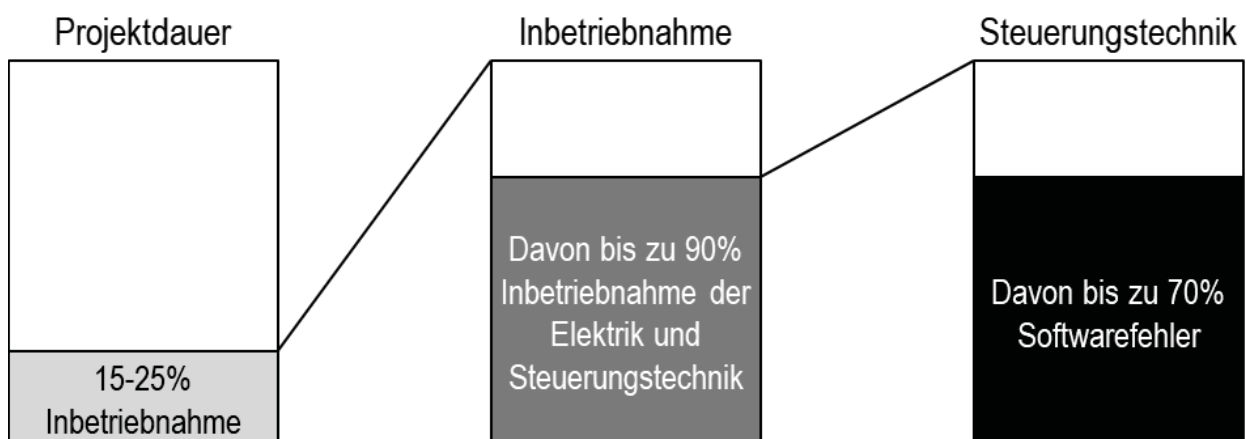


Abbildung 1-4: Zeitanteile bei der Inbetriebnahme, nach (VDW 1997)

Abbildung 1-5 stellt dar, wie sich die zu erwartenden Kosten zur Beseitigung von Mängeln über die Lebensdauer einer Produktionsmaschine oder –Anlage entwickeln. Entlang der Zeitachse sind die real aufgelaufenen Kosten über die Lebensdauer dargestellt. Die Kurve der „gebundenen Kosten“ stellt die durch Projektentscheidungen gebundenen Lebensdauerkosten dar. Der diagonale Pfeil unter der Kurve stellt zeigt auf, dass Fehler kostengünstiger sind, je frühzeitiger sie im Lebenszyklus erkannt und beseitigt werden.

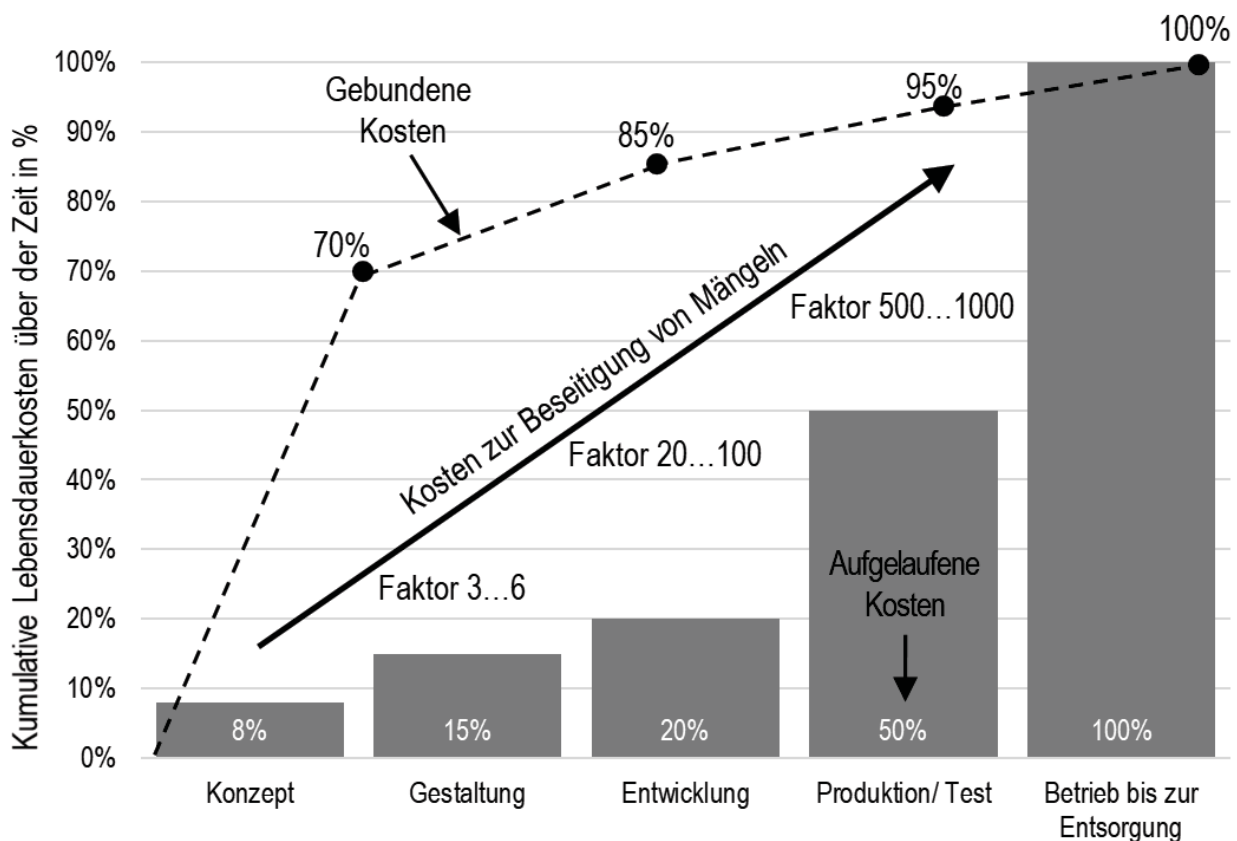


Abbildung 1-5: Festgelegte Lebensdauerkosten über die Zeit zur Beseitigung von Mängeln, nach (Walden et al. 2015)

Es ist zu erwarten, dass der Trend der Vernetzung von Maschinen und Anlagen (Gausemeier et al. 2013), insbesondere, wenn sie von verschiedenen Herstellern mit steuerungstechnischen Komponenten verschiedener Hersteller gebaut wurden, mit übergeordneten Systemen, wie z. B. einem Leitsystem, oder die Kommunikation untereinander den Anteil der Aufwendungen und die Risiken einer Inbetriebnahme weiter erhöht. Auch wenn Standards zur Kommunikation und anlagenspezifische Festlegungen zur Datenübergabe bestehen, kann doch die funktionale Integration an der Anlage erst erfolgen, wenn sie komplett aufgebaut ist.

Mit der zunehmenden Bedeutung der Software- und Informationstechnik gewinnt deren Test und Optimierung damit weiter an Bedeutung. Um nicht auf die Verfügbarkeit der Gesamtanlage warten zu müssen, hat sich die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) entwickelt: Sobald die Konstruktionsphase aller Disziplinen abgeschlossen sind, kann diese überprüft und das Steuerungssystem an einem virtuellen Modell der Maschine, der sog. „virtuellen Maschine“, in Betrieb gesetzt werden (vgl. Abbildung 1-6). Diese wird im Kontext von „Industrie 4.0“ auch oft als Teil des „Digitaler Zwilling“ bezeichnet (Langanke 2016; Baum 2018). Durch Abkopplung von Arbeitsschritten der Inbetriebnahme, welche nicht auf die reale Maschine angewiesen sind, sondern auch an einer Maschinensimulation durchgeführt werden können, kann der Entwicklungsprozess während der Aufbau-Phase parallelisiert und die benötigte Inbetriebnahmezeit an der Maschine deutlich reduziert werden (Pieloth 2013; Baum 2018). Während der VIBN werden dann Softwarefehler gefahrlos offenbart und korrigiert sowie Wechselwirkungen und Abläufe optimiert: „Sowohl das Steuerungssystem, als auch der Gesamtentwurf der mechanischen Konstruktion wird digital abgesichert“. Ebenso offenbaren sich mechanische Konstruktionsfehler. Es resultiert eine Zeit- und Kostenersparnis bei gleichzeitig höherer Qualität und Reifegrad der Software. Insbesondere könne auch Fehlerfälle, welche bei Nichterkennung die Maschine zerstören könnten, getestet werden, ohne die realen Komponenten zu gefährden. Ebenso ist eine Vorhersage von Prozessergebnissen, sowie eine Überwachung auf Ausfall und Kollision möglich (Pritschow 2002; Pritschow 2005; Pritschow et al. 2005).

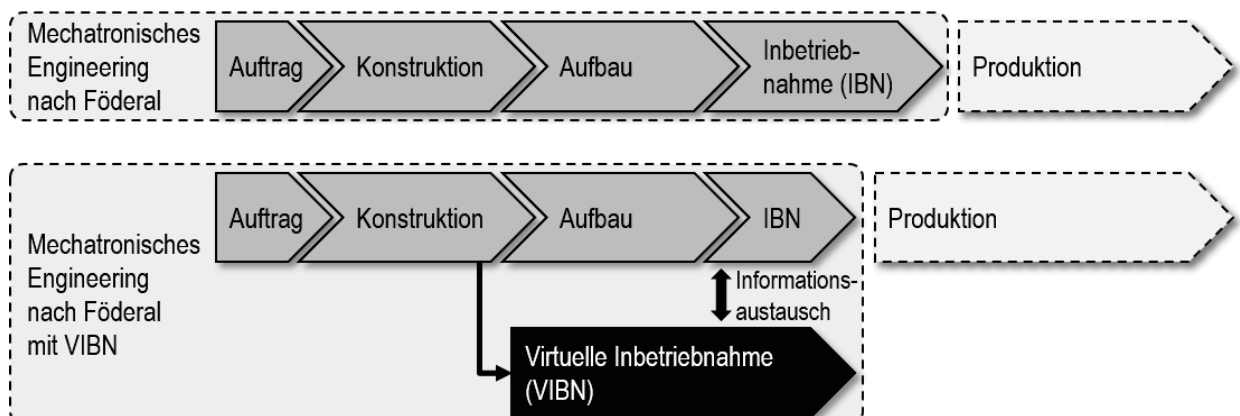


Abbildung 1-6: Gegenüberstellung des mechatronischen Entwicklungsprozesses ohne und mit VIBN

Folgt man dem VDI Fachausschuss 6.11 „Virtuelle Inbetriebnahme“ mit der Vision „Simulation 2025“ (Oppelt et al. 2016), so wird die Simulationstechnik durchgängig im Lebenszyklus einer Anlage verwendet und besonders im Engineering ein integraler Bestandteil der Arbeitsprozesse sein.

### 1.3 Der „Digitale Zwilling“ im Kontext der virtuellen Inbetriebnahme

Im Laufe der letzten Jahre wurde der Begriff „Digitaler Zwilling“ zum allgegenwärtigen Begriff im Kontext Industrie 4.0. Jedoch wurde er seit seiner Prägung im Jahr 2002 mehrfach unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte und Anwendungsfälle neu definiert (Chatti et al. 2019), weshalb es für die vorliegende Arbeit notwendig ist, den Begriff des „Digitalen Zwillings“ für die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen zu definieren.

Im Jahr 2010 wurde der „Digitale Zwilling“ von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) erstmals definiert (NASA 2010) als „[...] *eine integrierte multiphysikalische, mehrskalige, probabilistische Simulation eines Systems, das die besten verfügbaren physikalischen Modelle, Sensoraktualisierungen, Flottenhistorie usw. verwendet, um das Leben seines Zwillings in der realen Welt wiederzugeben.*“ Hierbei lag der Fokus hauptsächlich auf Fahr- bzw. Flugzeugen sowie der Zielerreichung der damit verfolgten Mission. Die Wahrscheinlichkeit eines Missionserfolgs sollte durch Anpassung des Missionsprofils unter Zuhilfenahme der Daten des Digitalen Zwillings erhöht werden.

Auch darauffolgende Definitionen des „Digitalen Zwillings“ bezogen sich auf Fahr- bzw. Flugzeuge. Erst im Jahr 2013 erfolgte die erste Definition des „Digitalen Zwillings“ in Bezug auf Werkzeugmaschinen bzw. Fertigungseinrichtungen durch Lee (Lee et al. 2013) als gekoppeltes Modell der realen Maschine, welches in einer Cloud-Plattform arbeitet und den Gesundheitszustand simuliert. Dieser soll durch analytische Algorithmen aus dem Modellwissen ermittelt werden.

Im Jahr 2015 rückte dann der Prozess in den Vordergrund: Der digitale Zwilling bezeichnet sehr realistische Modelle des Prozess-Status und seines Verhaltens in Interaktion mit der Umgebung in der realen Welt (Rosen et al. 2015).

Im Zuge einer groß angelegten Marketingkampagne hat auch die Siemens AG den Begriff des „Digitalen Zwilling“ erneut definiert (Siemens AG 2015): Der digitale Zwilling ist ein digitales Modell, welches vom Maschinendesign, über die Inbetriebnahme, bis hin zur Umrüstung und Betrieb der Maschine verwendet werden kann und somit das digitale Ebenbild der Maschine darstellt. Diese Definition ist die im Maschinen- und Anlagenbau heute gebräuchlichste Definition.

Da jedoch festgestellt wurde, dass im Lebenszyklus einer Maschine bzw. Anlage unterschiedliche Definitionen des Digitalen Zwilling mit unterschiedlichen Daten und Modellen notwendig sind, wurde die Definition inzwischen erweitert (Siemens AG 2018):

- **Digitaler Zwilling des Produkts**, der im Stadium der Definition und des Designs eines geplanten Produkts entsteht,
- **Digitaler Zwilling der Produktion**, welcher den Einsatz von Maschinen- und Anlagen abbildet. Dieser wird z. B. für die Erstellung des Steuerungsprogramms, sowie die virtuelle Inbetriebnahme genutzt.
- **Digitaler Zwilling der Performance**, welcher laufend mit Daten aus dem Betrieb von Produkten oder Produktionsanlagen gespeist wird. Mit ihm sollen Modelle für Instandhaltungsstrategien realisiert werden um z. B. Ausfallzeiten zu reduzieren.

Auch die Informatik beschäftigt sich mit digitalen Zwillingen. In diesem Themengebiet werden sie jedoch eher als Dienste oder Agentensysteme betrachtet. Dementsprechend wird die Definition ergänzt: *„Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht physische Dinge wie z. B. Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mithilfe einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird.“* (Kuhn 2017)

Im Kontext der Industrie 4.0 diskutieren Arbeitsgruppen (wie z. B. acatech, Bitkom, VDMA, ZVEI) die sog. „Verwaltungsschale“, welche zusammen mit dem Asset (dem realen Gegenstand) eine Industrie 4.0-Komponente bildet. Die Verwaltungsschale ist als das digitale Abbild eines Assets definiert und kann über die I4.0-Sprache nach VDI/VDE 2193 kommunizieren. Die Struktur der Verwaltungsschale wurde im Jahr

2016 festgelegt (Plattform Industrie 4.0 2016). Diese Definition entspricht weitestgehend der Definition durch die Siemens AG, erweitert um eine standardisierte Kommunikationsmöglichkeit zum Datenaustausch und integriert damit die Definition der Informatik in den Maschinen und Anlagenbau. Es ist derzeit keine konkrete Umsetzung in einem Produkt bekannt.

In eine sehr ähnliche Richtung versteht das Fraunhofer IOSB den Begriff des „Digitalen Zwillings“. Er sei „[...] ein Konzept, mit dem Produkte sowie Maschinen und ihre Komponenten mit Hilfe digitaler Werkzeuge modelliert werden - und zwar einschließlich sämtlicher Geometrie-, Kinematik- und Logikdaten. Ein Digitaler Zwilling ist das Abbild des physischen ‘Assets‘ in der realen Fabrik und erlaubt dessen Simulation, Steuerung und Verbesserung.“ (Sauer 2018) In der angedachten digitalen Zukunft werden wir digitale Zwillinge als umfassende physische und funktionale Modelle für jedes physische Gut benötigen (Boschert et al. 2016), z. B. eine Komponente, ein Produkt oder ein System um so effizient und möglichst umfassend die Produktion planen zu können.

Im heutigen Produktionsalltag werden jedoch Optimierungen (physisch oder in der Software) meist an der realen Maschine bzw. Anlage durchgeführt. Dies ist meist mit der Ablehnung des digitalen Zwillings durch das Personal begründet. Es entsteht das Problem, dass die reale Maschine bzw. Anlage verändert wird und der digitale Zwilling diese Änderung nicht eingepreist bekommt. Das Modell unterscheidet sich daher von der Realität. Es wird deshalb an Ideen und Lösungen geforscht, welche durch Erfassung der aktuellen Ressourcen-, Produkt- und Prozessinformationen Abweichungen zwischen den virtuellen Modellen und den realen Maschinen bzw. Anlagen detektiert und ermittelt können. Dies erfolgt durch Analyse der Hardwarekonfiguration und der Software, der Messung von Echtzeitinformationen, aber auch anhand von 3D-Bildern des realen Aufbaus, welche mit dem geplanten Aufbau verglichen werden. Basierend darauf wird eine domänenübergreifende Synchronisierung des digitalen Zwillings mit seinem realen Pendant durchgeführt. (Biesinger et al. 2018; Talkhestani et al. 2018; Biesinger et al. 2019)

Lenkt man den Fokus der Definition des digitalen Zwillings auf den Bereich der virtuellen Inbetriebnahme, so wird das Ergebnis an sehr konkreten Anforderungen gemessen:

- Der digitale Zwilling einer Maschine bzw. Anlage muss einen System- und Produktionstest inklusive Safety und aller Störsituationen ermöglichen.
- Der digitale Zwilling einer Maschine bzw. Anlage muss aus einzelnen Baugruppen bestehen, wie auch die reale Maschine bzw. Anlage. Dies ermöglicht es verschiedene Konfigurationen von Baugruppen zu testen.
- Die virtuelle Baugruppen bzw. Komponenten müssen reale Baugruppen bzw. Komponenten hinsichtlich Schnittstellen, Parametern, Betriebsarten und Echtzeitverhalten abbilden.
- Der digitalen Zwillinge soll als „Schattenanlage“ zur Optimierung der Produktion, Rekonfiguration der Anlagentechnik sowie zur Schulung des Bedienpersonals und Qualifizierung des Service eingesetzt werden können.

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, werden diese Forderungen an den Teil des digitalen Zwillings gestellt, welcher für die virtuelle Inbetriebnahme – also das virtuelle Modell der Maschine bzw. Anlage – genutzt wird (Langanke 2016; Baum 2018)(Langanke 2016; Baum 2018).

In dieser Arbeit soll unter dem Begriff des „Digitalen Zwillings“, in Anlehnung an (Siemens AG 2015), (Siemens AG 2018) sowie (Sauer 2018), die virtuelle Maschine, also die Simulation oder der Zusammenschluss der Simulationen, welche für die Programmierung und die Inbetriebnahme des Steuerungssystems notwendig sind, verstanden werden. Hierbei muss die Simulation die genannten Anforderungen erfüllen. Hinzu kommen weitere Anforderungen an die Simulation, welche im folgenden Kapitel diskutiert werden sollen.

## 1.4 Grundlegende Anforderungen an die virtuelle Inbetriebnahme einer Maschine bzw. Anlage

Abbildung 1-7 stellt schematisch eine komplexe Produktionsanlage dar. Die Anlage unterteilt sich in mehrere Einzelanlagen, welche durch ein Materialflusssystem miteinander verkettet sind. Die Steuerungen kommunizieren untereinander und mit einem Leitsystem über ein echtzeitfähiges Feldbussystem. Hieraus entstehen die folgenden Anforderungen an ein VIBN-System. Es muss gewährleistet sein...

- die verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen der Steuerung und dem Simulationsmodell, sowie zwischen den Steuerungen (Pritschow et al. 2005), aber auch zwischen den einzelnen Simulationsmodellen, da sonst das Zeitverhalten verzerrt wird,
- die taktgenaue Reproduzierbarkeit eines Anlagenzustandes unter gleichen Umgebungsbedingungen, sodass ein Simulationslauf beliebig oft durchgeführt werden kann und zu jedem Steuerungstakt das Simulationsmodell immer dieselben Ergebnisse erzeugt. Nur so können Programmfehler des Steuerungssystems zuverlässig nachvollzogen, identifiziert und korrigiert werden.
- dass das Verhalten der virtuellen Komponenten denen der realen Komponenten aus Sicht der Steuerungen entsprechen. Beispielsweise muss sich ein virtueller Antrieb im Rampenverhalten wie ein realer Antrieb verhalten. Nur so ist eine Vorhersage von Prozessergebnissen, sowie eine Überwachung auf Ausfall und Kollision möglich. Es wird somit notwendig werden, dass Komponentenhersteller den sog. „Digitalen Zwilling“ ihrer Komponente anbieten, denn nur sie kennen das genaue interne Verhalten.
- dass insbesondere auch Fehlerfälle, welche bei Nichterkennung die Maschine zerstören könnten, erfasst werden können, ohne die realen Komponenten zu gefährden. Da dafür sicherheitsgerichtete Steuerungen („Safety-PLC“) an der Maschine eingesetzt werden, die zu ihrer über einen Feldbus abgesetzten E/A-Technik über spezifische Protokolle kommunizieren, ist auch dieses Sicherheitsverhalten in der virtuellen Maschine zwingend abzubilden.

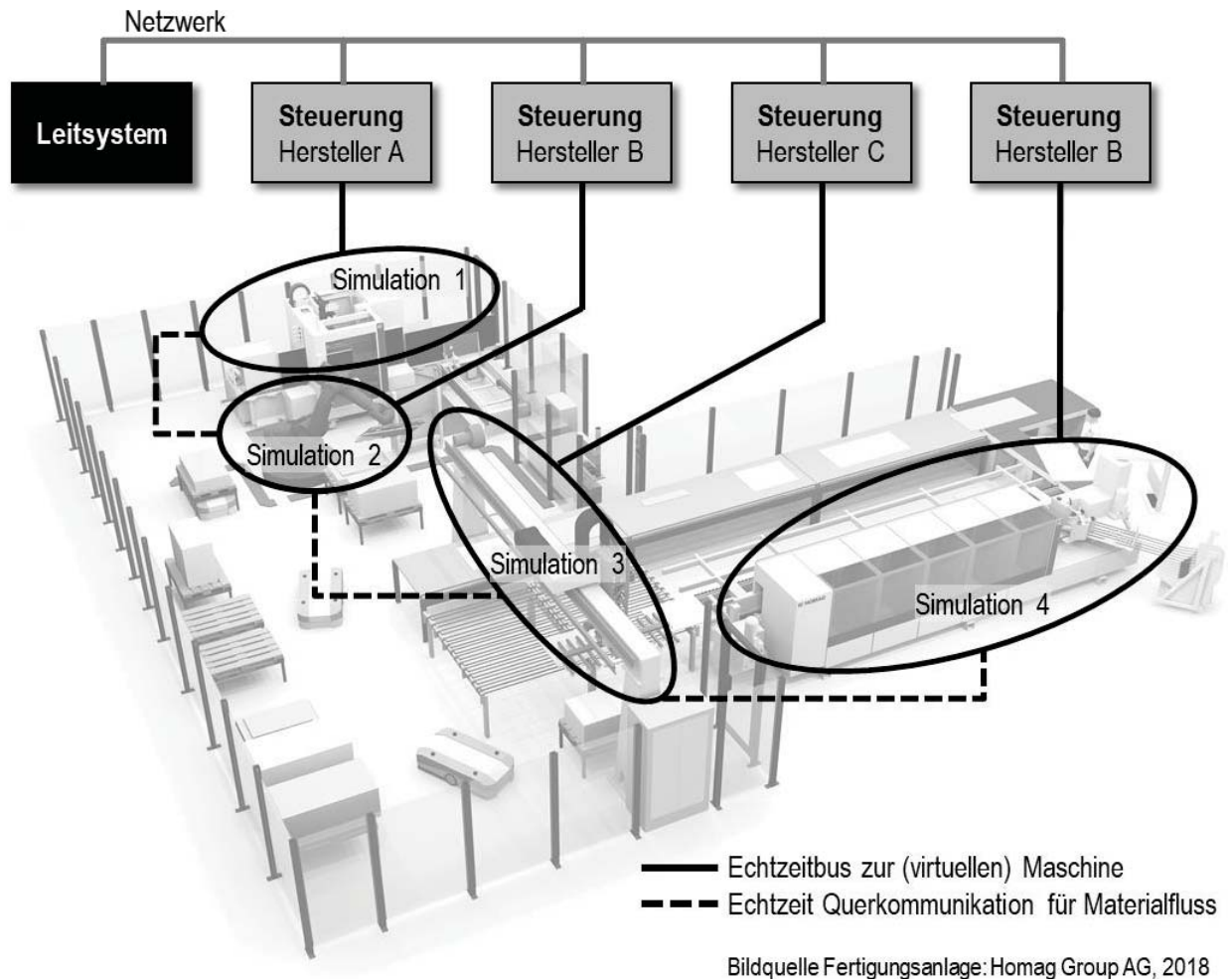


Abbildung 1-7: Schematischer Aufbau einer komplexen Anlagensimulation mit Echtzeitkommunikation zwischen den Anlagenteilen

Diese Anforderungen lassen sich nur durch eine Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) mit Feldbuskoppelung zum realen Steuerungssystem erfüllen, welche auch die Simulationsmodelle in Steuerungsechtzeit, also im Feldbustakt berechnen kann. Hierbei ist es essentiell, dass die virtuelle Maschinenkomponente eine Antwort auf eine Führungsgröße des Steuerungssystems innerhalb der vorgegebenen Zykluszeit (meist 1 ms) zurücksendet, um dem Verhalten der realen Maschinenkomponente zu entsprechen und so einen hohen Abbildungsgrad des gesamten Anlagenmodells zu erreichen.

Derzeit ist nur eine Lösung bekannt, die genannte Anforderungen erfüllt, welcher den Forschungsstatus verlassen und als Produkt industriell eingesetzt wird: Röck beschreibt in seiner Dissertation „Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen

*Steuerungselementen“* (Röck 2007), wie die notwendigen Algorithmen zur echtzeitfähigen und deterministischen Berechnung des Verhaltensmodells (Logik , Dynamik und Kinematikmodell) gestaltet sein müssen, um numerischer Robustheit und ausreichender Genauigkeit zu genügen. Damit ist eine verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen dem zeitdeterministischen Rechenkern der HILS und der Steuerung realisierbar, welche zudem eine taktgenaue Reproduzierbarkeit der Simulationsergebnisse ermöglicht.

---

## 2 Zielsetzung der Arbeit

Die für die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) von Maschinen und Anlagen benötigten Simulationsmodelle werden heute meist für die VIBN einer einzelnen Maschine bzw. Anlage entwickelt. In einer zweiten, parallelen und vom eigentlichen Entwicklungsprozess abgekoppelten Entwicklung werden diese komplett manuell durch Experten neu erstellt. Da Regelwerke und Vorgehensmodelle zur mechatronisch korrekten Modellierung der virtuellen Baugruppe oft fehlen oder ungünstig gestaltet sind werden die erstellten Modelle oft wenig wiederverwendet. Auch kommt es vor, dass die Modularisierung einer Maschine oder Anlage nicht in allen Disziplinen dieselben Modulgrenzen nutzt, sodass ein Modul nicht über alle Disziplinen hinweg aus einer Maschine oder Anlage herausgelöst werden kann. Eine Wiederverwendung einmal modellierter Baugruppen ist so nicht gegeben.

Der hohe Aufwand zur Erstellung eines Simulationsmodells wird daher häufig als zu groß angesehen, obwohl der Nutzen der VIBN bekannt ist (Pieloth 2011; Pieloth 2013; Langanke 2016; Baum 2018) und einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf der Inbetriebnahmephase hat. Viele Maschinenhersteller verzichten somit auf die VIBN und gehen Risiken bei der Inbetriebnahme der realen Maschine ein.

Wäre es für die Maschinenbauunternehmen möglich, ohne aufwändiges manuelles Programmieren, Simulationsmodellen ihrer Maschinen und Anlagen im Rahmen ihres bestehenden mechatronischen Entwicklungsprozesses zu erstellen, könnten sie mit den Vorteilen der VIBN ihre Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit steigern. Hierfür notwendig ist, dass die Modellerstellung integraler Bestandteil des grundsätzlichen Entwicklungsprozesses ist und weitestgehend auf vorhandene Informationen zurückgreift.

Ist dieser Schritt geschafft, ist das Simulationsmodell nicht nur auf die VIBN beschränkt, sondern kann über diese Phase hinaus gewinnbringend genutzt werden (vgl. Abbildung 2-1). Beispielsweise können während dem Entwicklungsprozess Änderungen an der Maschinenkonstruktion überprüft, Fehler korrigiert und Wechselwirkungen optimiert werden. Erst dann erfolgt die Freigabe zur physischen Herstellung. Eine

## 2 Zielsetzung der Arbeit

---

Zeit- und Kostenersparnis bei gleichzeitig höherer Qualität und Reifegrad der Gesamtmaschine bzw. –Anlage wird erwartet.

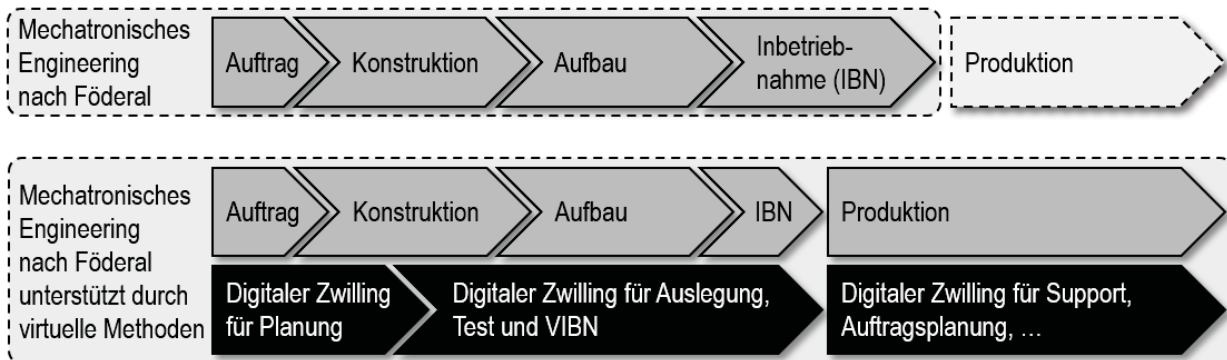


Abbildung 2-1: *Mechatronisches Engineering unterstützt durch den Digitalen Zwilling*

Es leitet sich die Zielsetzung der Arbeit ab:

- Die Erstellung der virtuellen Maschine ist integraler Bestandteil des Engineeringprozesses und muss als solcher mitentwickelt werden.
- Die virtuelle Maschine zur virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) mittels einer Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) nach Röck muss wirtschaftlich und automatisiert erstellt werden.
- Eine Nutzung der virtuellen Inbetriebnahme muss für jede projektierte Maschine und nicht nur als Option für komplexe Maschinen und Anlagen zur generellen Erhöhung der Qualität und ganzheitlichen Absicherung der Funktionalität wirtschaftlich gestaltet sein.
- Die virtuelle Maschine für den Vorabtest von Um- und Aufrüstungen der Maschine bzw. Anlage muss konzeptionell berücksichtigt sein.

---

### 3 Anforderungsanalyse

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass der moderne Maschinen- und Anlagenbau in Baugruppen denkt. Hiermit schafft er die Möglichkeit Funktionalität zu kapseln und wiederverwendbar zu gestalten. Eine schnelle Anpassung von standardisierten Maschinen und Anlagen an individuelle Kundenwünsche ist so mit einer beschränkten Anzahl an Baugruppen möglich. Auch erhöht sich die Wartbarkeit und Qualität der Maschinen und Anlagen. Der hierfür genutzte Baukasten ist herstellerspezifisch und stellt das Know-how eines Herstellers dar. Ein Austausch des Baukastens gegen einen anderen ist aufgrund der darauf abgestimmten Tools und Automatisierungslösungen nicht möglich, sodass sich die Lösungsfindung an der Erweiterung des bestehenden mechatronischen Baukastens orientieren muss.

Aus den vorherigen Kapiteln leiten sich also die für diese Arbeit geltenden Anforderungen an die Konzeption und die Realisierung der virtuellen Maschine ab:

#### **Anforderung 1: Erhalt der Modularisierung, 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe**

Es ist essentiell die durch die Maschinenbaugruppen gegebene Modularität auch in der virtuellen Maschine umzusetzen. Nur so kann eine 1:1-Beziehung zwischen virtueller und realer Baugruppe hergestellt werden. Ebenso müssen funktionale und logische Abhängigkeiten (z. B. die kinematische Kette der Maschine) abgebildet werden. Nur dann lassen sich virtuelle Maschinen und Anlagen ebenso modular aufbauen wie die realen Maschinen und Anlagen.

#### **Anforderung 2: Integration in den mechatronischen Engineeringprozess als neue Disziplin**

Um die virtuelle Maschine im Engineering wirtschaftlich nutzbar zu machen, muss diese als die neue Disziplin „Digitaler Zwilling“ in den Engineeringprozess nach Föederal integriert werden. Das bisher getrennte Entwickeln von realer und virtueller Baugruppe muss zu einem gemeinsamen, simulationsunterstützten Entwicklungsprozess fusionieren. Nur so kann das etablierte mechatronische Engineering wirtschaftlich in ein Digital Engineering gewandelt und der initiale

Zusatzaufwand zur Erstellung der digitalen Maschinenbaugruppe gerechtfertigt werden.

#### **Anforderung 3: Automatische Generierung der virtuellen Maschine**

Die Erstellung virtueller Maschinen und Anlagen muss wirtschaftlich und damit automatisiert erfolgen. Ziel muss sein, sämtliche Maschinen und Anlagen, die auf Basis des herstellerspezifischen mechatronischen Baukastens gebaut wurden, auch virtuell zusammenstellen zu können. Nur so kann sich das mechatronische Engineering zum Digital Engineering entwickeln und ein Nutzen aus der virtuellen Maschine wirtschaftlich gezogen werden.

#### **Anforderung 4: Nutzung der virtuellen Maschine über die virtuelle Inbetriebnahme hinaus**

Beim Digital Engineering soll die Planung der Produktionsmaschine bzw. -Anlage, unter Berücksichtigung des zu fertigenden Produktes, des dafür notwendigen Prozesses und der Produktionsstätte digital erfolgen und nicht mehr ausschließlich auf Expertenwissen basieren. Mit Hilfe der virtuellen Maschine werden am virtuellen Modell der Maschine bzw. Anlage Änderungen vorgenommen, Fehler korrigiert und Wechselwirkungen optimiert. Erst dann erfolgt die Freigabe zur physischen Herstellung. Eine Zeit- und Kostenersparnis bei gleichzeitig höherer Qualität und Reifegrad wird erwartet.

Hinzu kommt die Möglichkeit der Mitarbeiterschulung, des „Remote-Support“ und der Parallel- und vorausschauenden Produktion zum Schutz der Maschine bzw. Anlage.

Im Folgenden soll die Konzeption einer Lösung für die Zielsetzung dieser Arbeit erfolgen. Diese soll anhand häufiger Beispiele realisiert und anschließend an zwei High-End-Maschinen verifiziert werden.

---

## **4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau**

Im Folgenden soll ein Überblick über den Stand der Technik bei der Erstellung von virtuellen Maschinen für die virtuelle Inbetriebnahme gegeben werden. Zu Beginn werden die Grundlagen zur Modularisierung von Maschinen und Anlagen in wiederverwendbare mechatronische Baugruppen erklärt, anschließend wird auf den mechatronischen Entwicklungsprozess eingegangen. Abschließend werden Forschungsarbeiten zur automatisierten Erstellung virtueller Maschinen beleuchtet und aktuelle Defizite bei der Integration der virtuellen Maschine in den mechatronischen Entwicklungsprozess herausgearbeitet.

### **4.1 Modularisierung der Hardware**

Im klassischen Maschinenbau, der sich auch heute noch in kostengünstigen und technisch wenig anspruchsvollen Maschinen wiederfindet, wird zwischen Funktion und baulicher Unterbringung der für die Funktionserfüllung notwendigen Teilkomponenten unterschieden. Sie werden nicht als Einheit, sondern getrennt voneinander betrachtet. Abbildung 4-1 stellt dies exemplarisch am Beispiel einer Achseinheit dar. Die Achseinheit besitzt die benötigte Sensorik, sowie den Motor als Aktor. Im Schaltschrank befinden sich die Steuerung, die Leistungsversorgung, sowie der Wechselrichter. Es ergibt sich somit eine Vielzahl von Schnittstellen zwischen Schaltschrank und Achseinheit. Hinzu kommen weitere Schnittstellen, wie z. B. Prozessmittel (hydraulische, pneumatische oder Schmiermittelversorgung).

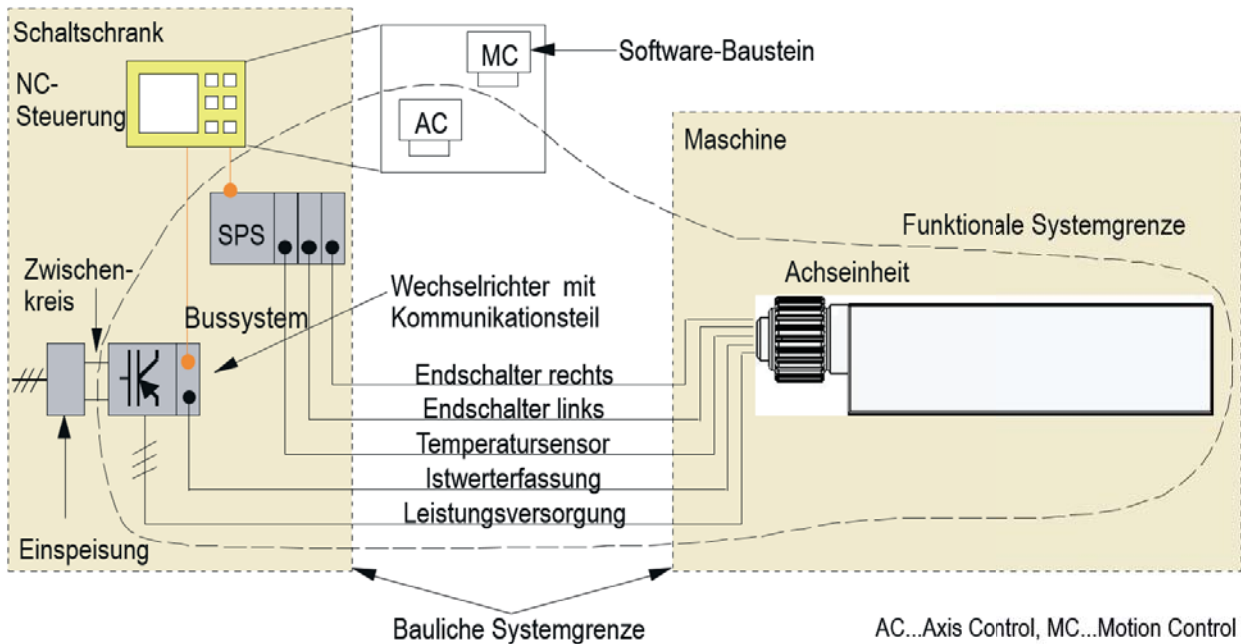


Abbildung 4-1: Klassischer Aufbau am Beispiel einer Achseinheit (Wurst et al. 2006)

Um das Jahr 2000 wurden sogenannte „(re)konfigurierbaren Maschinen“ diskutiert (Koren et al. 1999). Ein erster Prototyp eines rekonfigurierbaren Robotersystems (vgl. Abbildung 4-2) wurde von Wurst im Jahr 1991 vorgestellt (Wurst 1991). Ziel der Modularisierung in wiederverwendbare Module war das Hinzufügen, Entfernen oder Verändern von Modulen zu oder von einem Roboter in kurzer Zeit zu ermöglichen. Es wurde erkannt, dass die Wahl der Systemgrenzen eines Moduls die Komplexität der Modulschnittstelle, ebenso wie die Rekonfigurationseffizienz bestimmt.

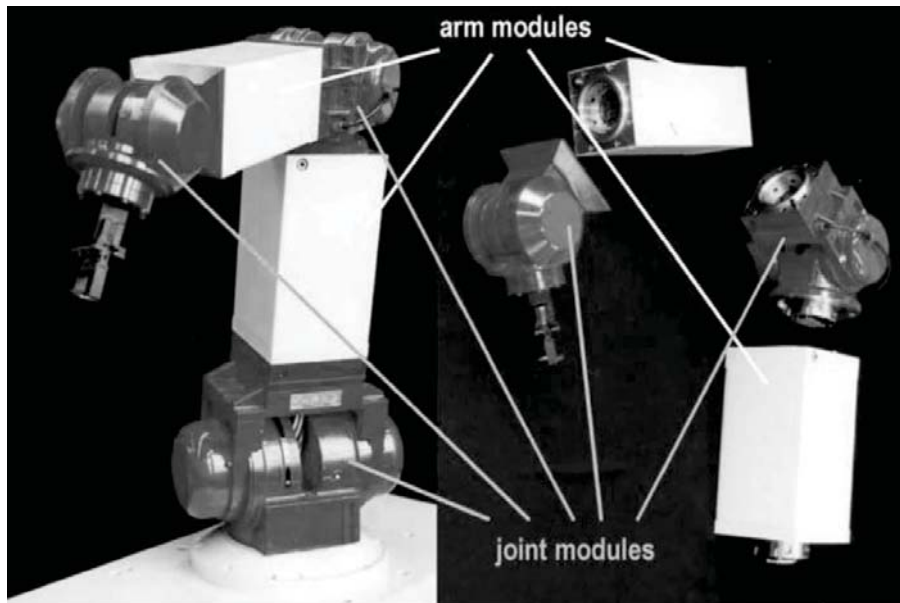


Abbildung 4-2: Rekonfigurierbares Robotersystem (Pritschow et al. 2009)

Als einheitliche Modulschnittstellen wurden identifiziert:

- Die **mechanische Schnittstelle**, welche die einzelnen Module physisch miteinander verbindet,
- die **funktionale Schnittstelle**, welche die Funktionalität beschreibt, wie z. B. 2-achsiges Robotergelenk mit Differentialgelenk,
- die **energetische Schnittstelle**, welche das Modul mit Energie versorgt,
- die **kommunikative Schnittstelle**, welche die Kommunikation zwischen Modul und Steuerungssystem ermöglicht.

Ein solches Modul ist also ein Subsystem, welches so wenig externe Schnittstellen wie möglich besitzt. D. h. allerdings auch, dass dieses Modul auf eine einzige oder einige gleiche Funktionen beschränkt sind, wie z. B. ein Greifer, damit das Modul eine abgeschlossene, autonome, funktionale Einheit bildet.

(Re-)konfigurierbare Maschinensysteme bestehen somit aus veränderbaren definiert zusammensteckbaren Modulen mit einheitlichen Schnittstellen, die sich in ihren kinematischen und dynamischen Eigenschaften parametrisch verändern lassen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnte eine einheitliche Definition von Modulen, unabhängig davon, ob diese einen Roboter, eine Produktionsmaschine oder ein Produktionssystem aufbauen, gefunden werden.

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

Nach (Pritschow et al. 2003) und (Wurst et al. 2006) gelten folgende Konstruktionsrichtlinien:

- Jegliche Schnittstellen von Modulen müssen einfach gestaltet sein, um ein zeitminimales (Re)Konfigurieren zu ermöglichen.
- Die Festlegungen von funktionalen und baulichen Systemgrenzen sind aufeinander abzustimmen, damit sinnvolle und überschaubare Schnittstellen entstehen.
- Der funktionale Umfang der Module muss es erlauben, die Maschinenfähigkeit einfachst nachzuweisen beziehungsweise er muss diese gewährleisten.
- Mechanisch gekoppelte Systeme (Vermaschungen) sind zu vermeiden.
- Wo immer möglich, sind autonome, autarke Prozessmodule zu schaffen und einzusetzen.
- Konfigurierungswerkzeuge in Form von Simulationswerkzeugen und Auslegungsprogrammen, die in ihrer Struktur die (re)konfigurierbaren Maschinen und Anlagen widerspiegeln, gilt es bereitzustellen.
- Schnelle Diagnoseverfahren zum Ermitteln der Maschinenfähigkeit müssen zur Verfügung gestellt werden.

Berücksichtigt man diese Konstruktionsrichtlinien, so ergibt sich ein idealisiertes Konzept einer Achseinheit (vgl. Abbildung 4-3). Alle für die Funktionserbringung benötigten Komponenten sind in das Modul integriert – das Modul wird autark. Lediglich die Leistungsversorgung, sowie ein Bussystem zur Kommunikation mit dem zentralen Steuerungssystem existieren als Schnittstellen.

Einen entsprechenden mechatronischen Baukasten aus solchen autarken Einheiten zum Aufbau einer rekonfigurierbaren Produktionsmaschine wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 467 „*Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion*“ der Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) im Teilprojekt C entworfen (Heisel et al. 2004; Westkämper 2006).

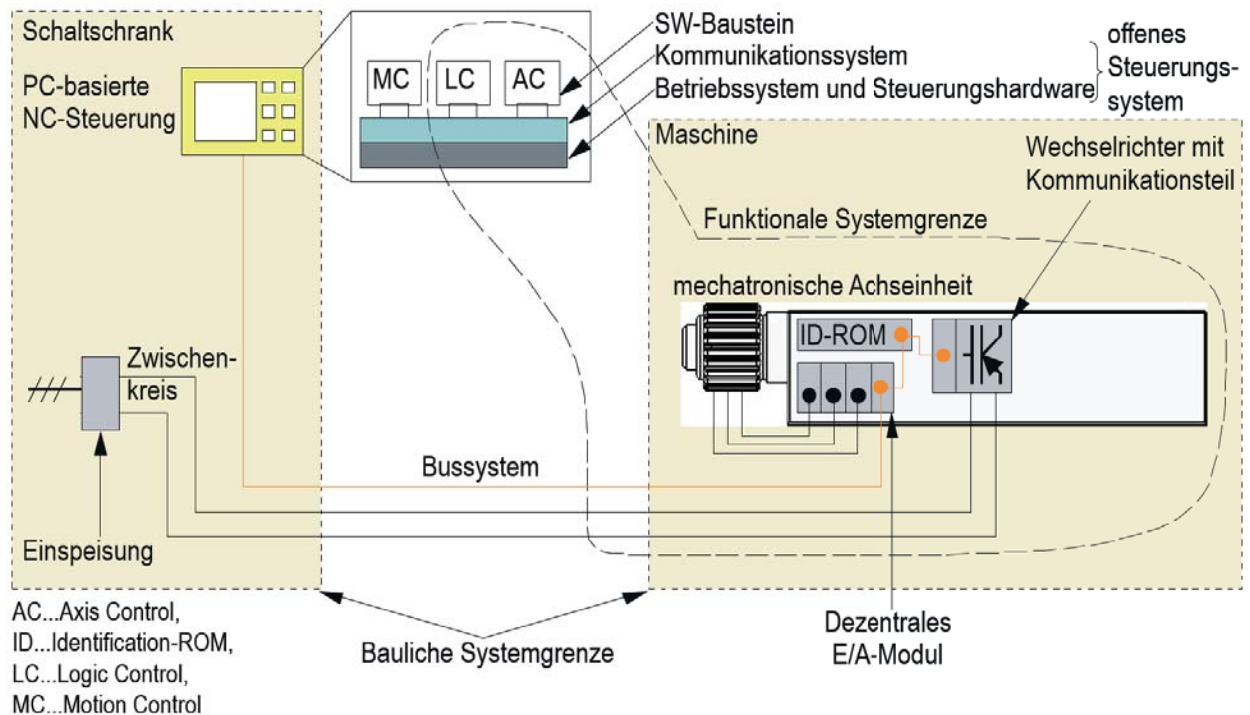


Abbildung 4-3: Funktionale Integration am Beispiel einer Achseinheit (Wurst et al. 2006)

Funktionale Einheiten wie die in Abbildung 4-3 vorgestellte Achseinheit sind heute oft Zulieferkomponenten, welche der Maschinenhersteller komplett bezieht. Durch die Reduzierung der Schnittstellen zur Steuerung auf eine einzige Kommunikationsschnittstelle sind Komponentenhersteller so konzeptionierter Einheiten gezwungen, einen herstellerübergreifenden Standard anzubieten – aufgrund der vielen am Markt verfügbaren Bussysteme kann dies durchaus problematisch und die Entwicklung teuer sein. Bei den Antrieben selbst ist das in gewissem Umfang gelungen. Die Zustandsautomaten für die Antriebsbetriebsarten orientieren sich oft an den standardisierten Geräteprofilen von CiA402 (DIN EN 61800-7-201) oder Sercos (DIN EN 61800-7-204). Für die vielen anderen vom Maschinenbau eingesetzten Baugruppen ist das aber eher die Ausnahme, was die kleineren Hersteller dann doch wieder zwingt, weiterhin auf die traditionelle Bauweise mit einem zentralen Schaltschrank zu setzen.

Innovative Hersteller von Produktionsmaschinen und Produktionsanlagen besitzen einen unternehmensspezifisch standardisierten funktionsorientierten Baukasten, aus welchem sie kundenspezifische Produktionsmaschinen und Anlagen in einem vorgeordneten Rahmen, den sogenannten Baureihen, aufbauen können (vgl. Abbildung 4-4). Es wird eine erhöhte Wiederverwendung der Baukastenelemente auch über Baureihen

4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau und Produktionslinien hinweg (Kommunalität) und auch zwischen mehreren Generationen (Carry-over) angestrebt (Neuhausen 2001; Krause et al. 2018).

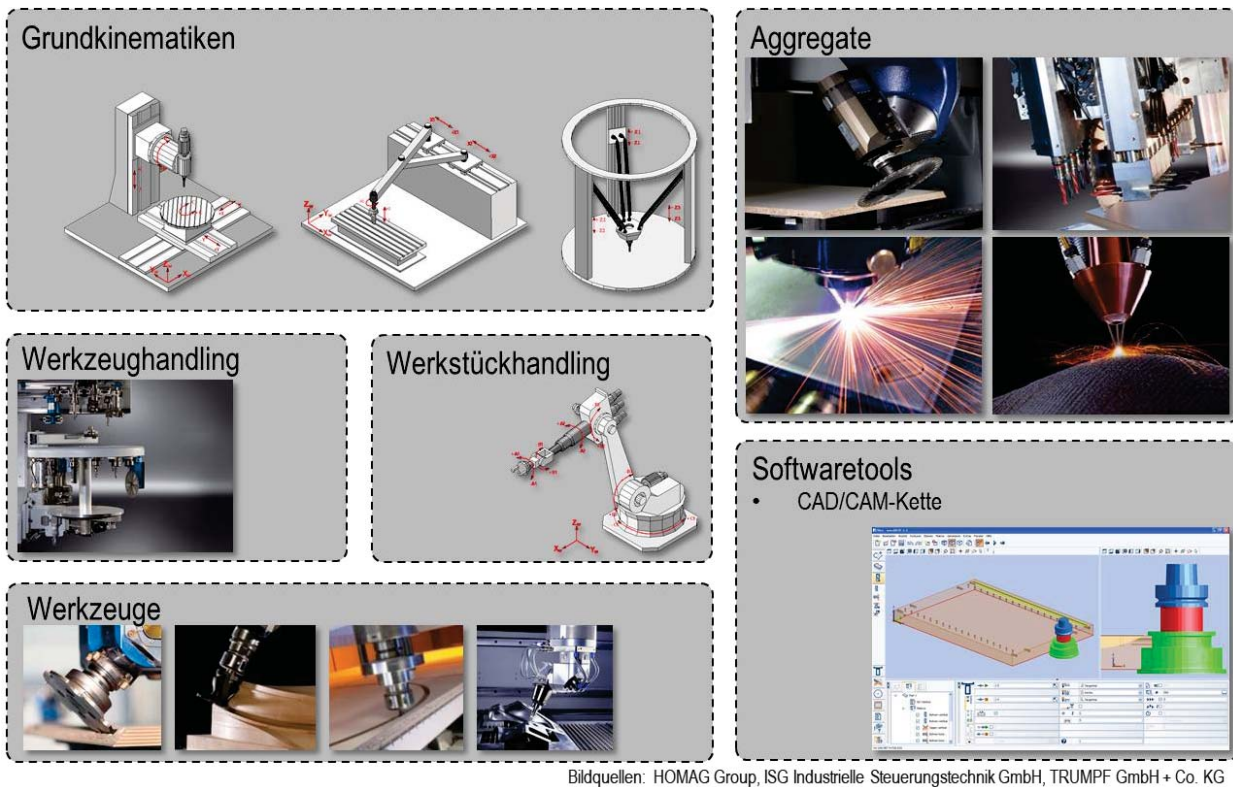


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung eines Baukastens für modulare Maschinen (Scheifele et al. 2016a)

Ein solcher mechatronische Baukasten besitzt also eine Baumstruktur, mit dem Baukasten als Stamm, den Baureihen als abgehende Hauptästen, den Baugruppen als Zweige und schließlich den Komponenten als Blätter.

Für den Aufbau einer konkreten Maschine wird zunächst festgelegt, zu welcher Baureihe die Maschinen gehören soll. Hieraus ergeben sich die Größe des Maschinenbettes, sowie der zur Verfügung stehende Bauraum für Baugruppen. Essentielle Baugruppen wie z. B. Werkzeugwechsler oder Aggregate werden zunächst, optionale Baugruppen, wie ein automatisiertes Werkstückhandling anschließend bestimmt. Baugruppen sind aus Komponenten aufgebaut, beispielsweise einer Linearachse. Eine alternative einsetzbare Baugruppe verwendet als Komponente einen rotatorische Achse. Die Entscheidung, welche Baugruppe eingesetzt wird, ergibt sich aus der Kundenanforderung.

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

Als Beispiel für die Modularisierung von Maschinen in der Praxis lässt sich das Hochleistungs-Dreh-Fräszentrum RatioLine der INDEX-Werke GmbH & Co. KG (Abbildung 4-5) anführen. Durch den modulbasierten Aufbau kann ein hochproduktives oder ein hochflexibles Drehfräszentrum für kleine oder große Losgrößen aufgebaut werden.

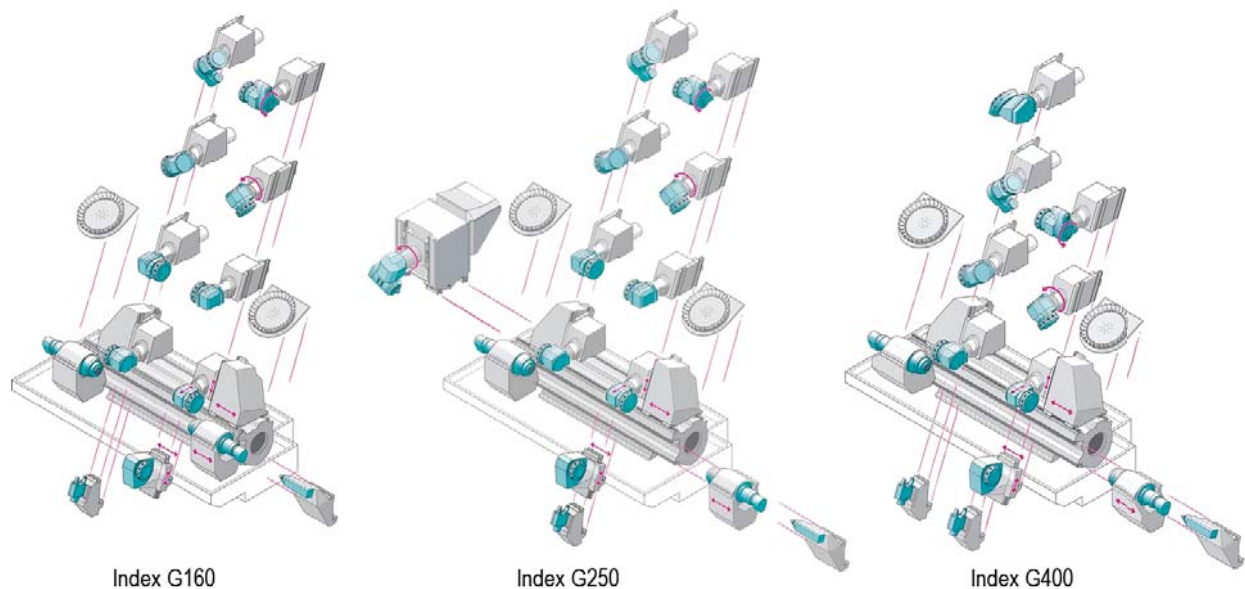


Abbildung 4-5: Modulares Hochleistungs-Dreh-Fräszentrum RatioLine der INDEX-Werke GmbH & Co. KG (INDEX RatioLine)

Es ist naheliegend, dass man zunächst annahm, dass eine so gestaltete Maschine sehr leicht umbauen könnte. Weil aber aus wirtschaftlichen und geometrischen Gründen die von den Baugruppen benötigten Prozessmittel wie Elektrik, Hydraulik und Pneumatik zentral zur Verfügung gestellt werden müssen, wird die Maschine durch Rohre, Schläuche und Kabel durchzogen. Dies bedingt, dass eine zu Beginn noch modulare Maschine anschließend starr gekoppelt und somit später nur mit großem Aufwand veränderbar ist.

Ein weiteres Praxisproblem stellt sich, wenn ein Baugruppentausch neue Anforderungen an die Prozessmittel stellt, da dieses zunächst aus wirtschaftlichen Gründen für die ursprünglich verwendeten ausgewählt wurde. Die Idee der Rekonfigurierbarkeit der Hardware fand deshalb kaum Anwendung.

Produktionsanlagen werden deshalb heute meist als „flexible Fertigungssysteme“ aufgebaut. Im Vergleich zu rekonfigurierbaren Produktionsanlagen, bei denen der Aufbau

des Systems sich dem zu fertigenden Produkt anpasst, wird bei flexiblen Fertigungssystemen die Konfiguration des Systems beibehalten (Koren 2006; Koren et al. 2010). Die Anpassung an das Produkt erfolgt durch die Änderung des Materialflusses und der Auswahl der im flexiblen Fertigungssystem alternativ angebotenen Bearbeitungsprozesse.

Solche Anpassungen sind bisher jedoch individuelle Prozesse, weshalb sich die Wissenschaft darum bemüht, diese zu systematisieren (Hoang et al. 2016): Es werden Charakteristiken identifiziert, welche die Fertigungsfähigkeiten beeinflussen. Dies sind z. B.:

- Fertigungsmöglichkeiten,
- Parameterbereiche der Fertigungsvorgänge,
- Satz von durchführbaren Sequenzen von Fertigungsvorgängen,
- Stückzeiten.

Anschließend werden diese Charakteristiken möglichen Adaptionskategorien gegenübergestellt. Hierbei handelt es sich z. B. um die Integration weiterer Fertigungsmöglichkeiten, der Anpassung der Produktionsparameter oder der Anpassung des Materialflusses. Auf Basis dieses Vorgehensmodells verspricht man sich die für die Um- bzw. Aufrüstung benötigte Zeit zu minimieren, die Arbeiten zu vereinfachen und Fehler zu vermeiden. (Hoang et al. 2016)

### **4.2 Modularisierung der Software**

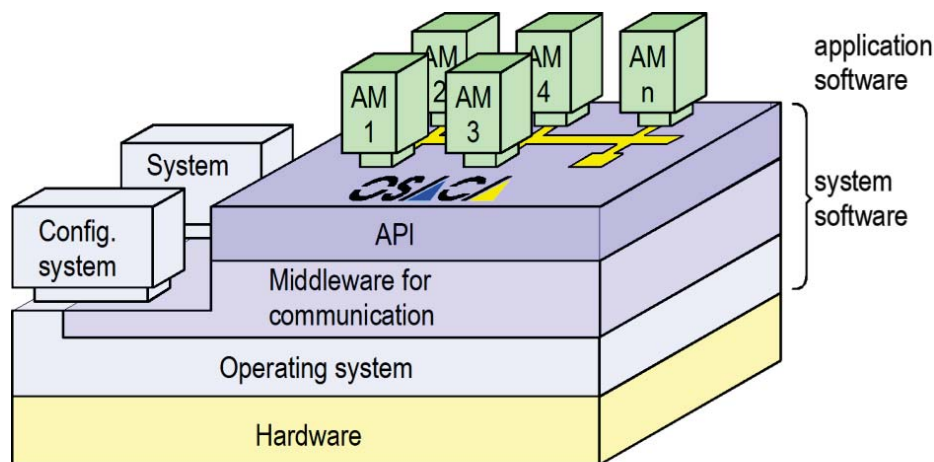
Mit der Einführung der Integrierten Schaltungstechnik und der Software-Hochsprache C konnten Ende der 1980er Jahre fortschrittliche Steuerungen entwickelt werden, die auf austauschbaren Softwaremodulen beruhten.

International betrachtet gab es die drei wesentlichen wissenschaftlichen Ansätze aus Japan, den USA und Europa zur Modularisierung und Strukturierung von Steuerungssoftware mit dem Ziel eine Referenzarchitektur für offene, konfigurierbare Steuerungssysteme zu schaffen (Koren 1998). Dies waren Arbeiten der Interessensgemeinschaft OSEC (OSEC: Open System Environment for Controller) und JOP in Japan, der Interessensgemeinschaft OMAC in Nordamerika und dem OSACA-Projektconsortium

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

(OSACA: Open System Architecture for Controls within Automation Systems) (OSACA 1996; OSACA Association 2001) in Europa (Katz et al. 2000). Es ist nicht bekannt, dass aus den Spezifikationen von OSEC, JOP und OMAC bisher Produkte entstanden sind (Kircher 2011).

Im Rahmen des OSACA-Projektes wurde eine Referenzarchitektur für ein offenes, objektorientiertes und konfigurierbares Steuerungssystem definiert. Die Steuerung besitzt hierbei eine einheitliche Softwareplattform mit einheitlichen Schnittstellen (engl. „API“, „Application Programming Interface“) für austauschbare Applikationsmodule (vgl. Abbildung 4-6). Über ein Konfigurationslaufzeitsystem ist es möglich die Steuerung automatisiert durch das Interpretieren von textbasierten Konfigurationsdateien zu konfigurieren (Müller 1997; Sperling 1999).



AM: Application Module    API: Application Programming Interface

Abbildung 4-6: Infrastruktur des OSACA Systems (Pritschow et al. 2001)

Im Jahr 2001 wurde für CIRP ein entsprechender Abschlussbericht „Open Controller Architecture Past, Present and Future“ (Pritschow et al. 2001) geschrieben. Aus einer Bausteinbibliothek sollte der Anwender in einfacher Weise seine angepasste Steuerung konfigurieren können.

Das europäische OSACA-Nachfolgeprojekt OCEAN nahm sich der Echtzeitkommunikation zwischen den Applikationsmodulen und der Sicherung der Wartbarkeit des Gesamtsystems an. Man entschied sich dafür die Open Source Implementierungen von RT-CORBA (Real-Time CORBA) und Linux mit Echtzeit-Erweiterung zu verwenden (OCEAN Consortium 2002).

Leider konnten sich die Hersteller weder auf eine einheitliche Klassenbibliothek noch auf eine einheitliche Plattform zur Aufnahme der dann durch Vererbung abgeleiteten herstellerspezifischen Applikationsmodule einigen. Die Vision der Austauschbarkeit war so nicht realisierbar. Dennoch haben die durch OSACA und OCEAN entwickelten Referenzarchitekturen Einfluss auf einige der heute verfügbaren modularen Steuerungssysteme genommen. Im Kern wurde durch das Projekt die objektorientierte Denkweise in der industriellen Steuerungstechnik eingeführt. Diese lassen eine individuelle Anpassung durch Konfiguration und Parametrierung und damit eine optimale Anpassung an eine konkrete Maschine zu, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

### **4.2.1 Individuelle Anpassung des Steuerungssystems**

Als Steuerungen im Anlagenbau kennt man heute die rechnergestützte numerische Steuerung (CNC, engl. „Computerized Numerical Control“), die ähnlich aufgebaute Robotersteuerung (RC, engl. „Robot Control“) und die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, engl. PLC, „Programable Logic Control“), oft mit eingebauter Bewegungssteuerung (MC, engl. „Motion-Control“). Mehr und mehr übernehmen CNC auch die klassischen Aufgaben von RC.

Vereinfacht dargestellt dient die CNC der Bewegungssteuerung von Maschinenachsen von Bearbeitungsmaschinen. Die SPS wird zur Lösung von weiteren steuerungstechnischen Automatisierungsaufgaben wie z. B. Maschinen- und Sicherheitsfunktionen genutzt. Die Hauptaufgabe der SPS ist die Fehlererkennung und primäre Fehlerreaktion (Pieloth 2011) aber auch die Steuerung der maschinenspezifischen Funktionen der Peripherieaggregate (z. B. Kühlschmiermittelpumpe, Werkzeug- und Werkstückwechselsysteme). Sie ist vom Anwender frei programmier- und maschinenspezifisch anpassbar. Sie übernimmt durch Koppelung mit anderen SPS heute auch die früheren Leitsteuerungsaufgaben.

Die wesentliche Anpassung der CNC an die konkrete Maschine oder Anlage findet üblicherweise über Parameterlisten statt, die die anzusteuernenden Achsen über die sogenannten „Achspanparameterlisten“ (ISG MDS-Axis 2018) beschreiben. Kinematische Koppelungen von Maschinenachsen werden z. B. in „Kanalparameterlisten“ (ISG

MDS-Channel 2018) beschrieben. Über kommerziell bedingte „Optionen“ werden in der CNC bereits fest implementierte Funktionalitäten freigeschaltet. Eine maschinenabhängige Zusammenstellung von Applikationsmodulen gemäß der Vorstellung des Projektes OSACA findet dort also nicht statt.

Die automatische Konfiguration einer CNC aus dem mechatronischen Engineeringprozess ist realisiert, da die Eigenschaften der Maschinenachsen und die notwendigen Koppelungen bekannt sind. Ebenso werden heute die Steuerungsprogramme für eine SPS insbesondere dann automatisch erzeugt, wenn ihre Programmierung der Norm DIN EN 61131-3 (DIN EN 61131-3) folgt. Hier kommen dann die wiederverwendbaren Programm-Organisationseinheiten (POU, engl. „Programming Organization Unit“) zum Einsatz, die sich direkt aus den eingesetzten Komponenten und Baugruppen ableiten.

### **4.3 Mechatronische Module**

Die Konzepte der Modularisierung der Hardware, als auch der Modularisierung der Software wurden in den letzten Jahren zu einer mechatronischen Modularisierung zusammengefasst, welche eine einheitliche Sichtweise auf Mechanik, Elektrik und Software ermöglicht. Die dafür notwendigen Modulschnittstellen, als auch die Methoden zur Modularisierung und Kapselung von Funktionalität sind bekannt.

#### **4.3.1 Begriffsdefinition „Mechatronik“**

Der Begriff „Mechatronik“ ist im modernen Maschinenbau allgegenwärtig. Nach (Neugebauer et al. 2007), sowie der VDI-Richtlinie 2206 (VDI 2206) bezeichnet der Begriff „Mechatronik“ *„das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung“* (vgl. Abbildung 4-7). Man muss also zwischen der mechatronischen Hardware, also der realen Ausprägung des mechatronischen Moduls, und einem abstrakten mechatronischen Informationsmodell, das alle Informationen über ein mechatronisches Modul besitzt und alle Informationen zum Bau automatisch erzeugt, unterscheiden.

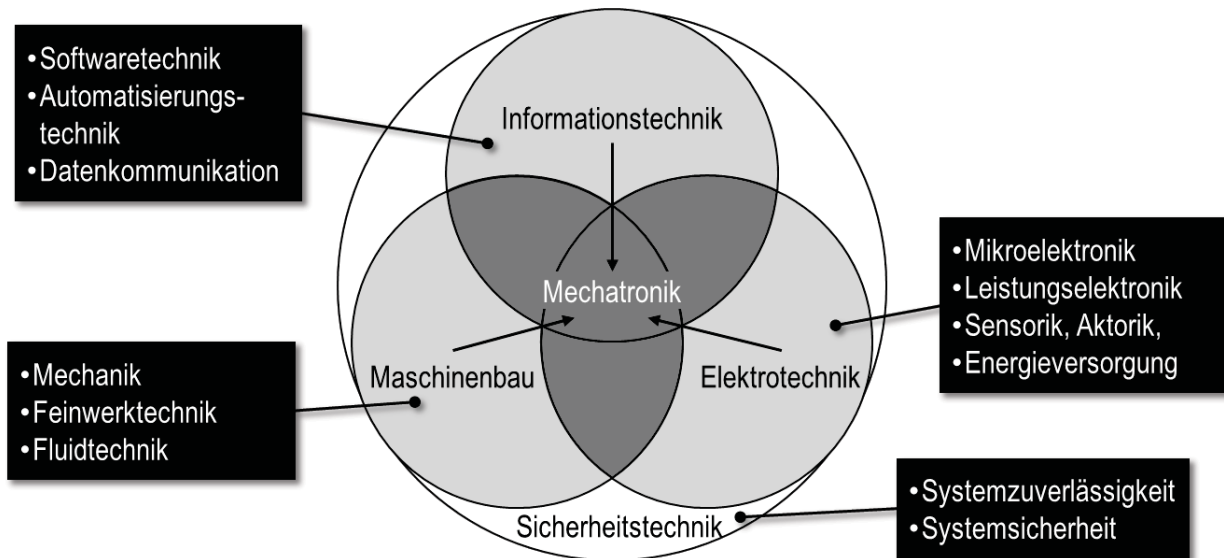


Abbildung 4-7: Mechatronik – Synergie aus dem Zusammenwirken verschiedener Disziplinen, entwickelt aus (Isermann 2008)

### 4.3.2 Die mechatronische Hardware

Beim idealisierten Ansatz der mechatronischen Module nach (Pritschow et al. 2003) und (Kircher et al. 2004) sind mechatronischen Module abgeschlossene funktionale Einheiten, welche nicht nur Mechanik, Elektrik und Software umfassen, sondern auch ein eigenes Steuerungssystem besitzen. Nur durch ein solches schaltschrankloses Konzept kann die schnelle, modulare Austauschbarkeit heute praktisch umgesetzt werden (vgl. Abbildung 4-8). Anwendung findet ein solches Konzept heute in der Förder- und Verpackungstechnik und z. B. in den Durchlaufmaschinen zur Holzbearbeitung, also überall dort, wo man funktional abgeschlossene Einzelmaschinen über einen „Durchlauf der Werkstücke“ aneinander ketten kann. Ein modulares Robotersystem nach Abbildung 4-2 ist damit aber derzeit nicht realisierbar, da keine industriell verfügbare Steuerungslösung bekannt ist, die unabhängige Einzelachsen über eine achsübergreifende Bahnvorschrift zu koppeln in der Lage wäre.

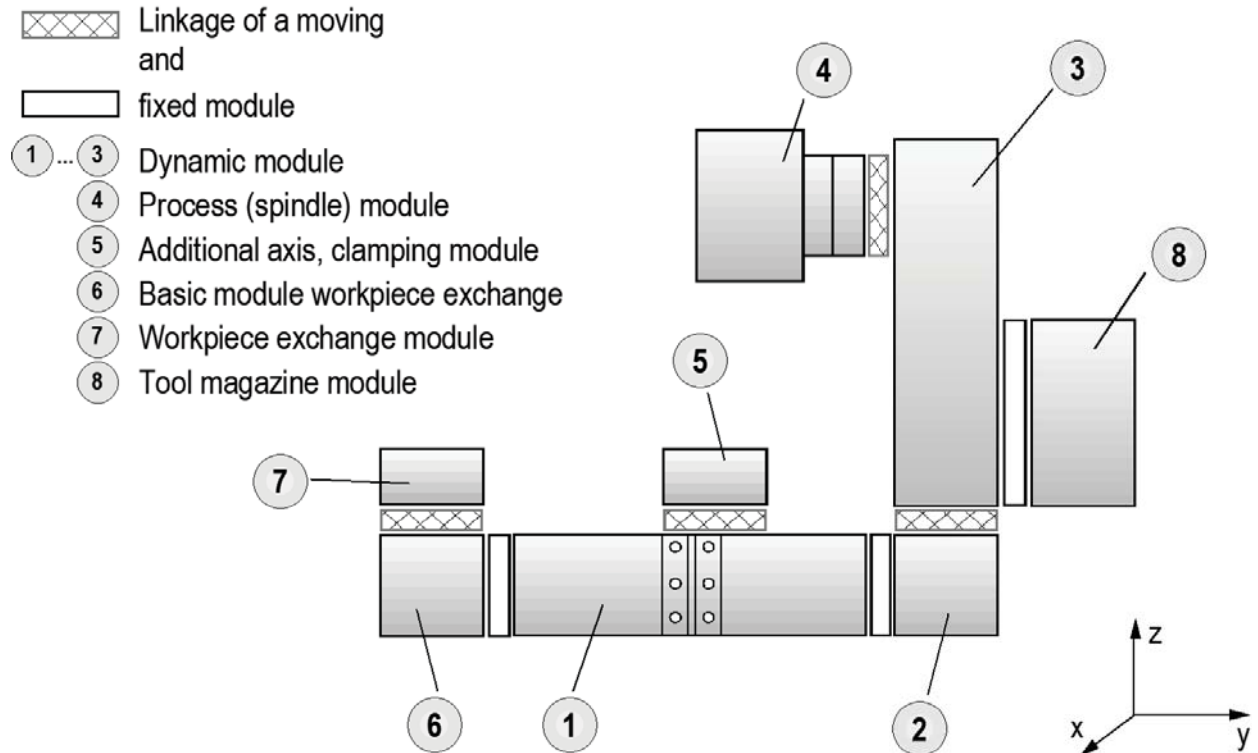


Abbildung 4-8: Anordnung einer Werkzeugmaschine mit modularem Design (Pritschow et al. 2003)

Der Werkzeug- oder Holzmaschinenbau bezeichnet Einheiten deshalb bereits als mechatronisch, wenn sie aus Mechanik und Elektrik bestehen und zur Erfüllung ihrer Funktion an eine zentrale Steuerung angeschlossen werden müssen, also die Steuerungsfunktion selbst nicht besitzen. Eingebaute steuerungstechnische Funktionalitäten beschränken sich im Wesentlichen auf eine Signalvorverarbeitung. Ein weiterer Grund ist wirtschaftlicher Natur. Die übliche E/A-Peripherie gruppiert zur Kostenreduktion 4, 8, 16 oder auch 32 E/A-Punkte in eine Geräteklemme („E/A-Terminal“ genannt). Will man möglichst keine dieser E/A-Punkte unbelegt lassen, ist man genötigt, diese ohne mechatronische Zuordnung den Komponenten und Baugruppen zuzuweisen. Selbst der fortschrittlichste allgemeine Maschinen- und Anlagenbau greift deshalb auf ein schaltschrankbehaftetes Konzept zurück, d. h. die Mechanik wird von der Elektrik getrennt aufgebaut.

Die mit diesem Konzept einhergehende hohe Komplexität kann nur noch durch Engineeringtools für das funktionale Engineering beherrscht werden. Denn nicht nur der elektrische Aufbau wird deutlich komplexer als beim idealisierten mechatronischen Konzept. Auch die Steuerungsprogramme nehmen an Komplexität deutlich zu. Dieses

benötigte Abstraktionsschichten, um einerseits modular aufgebaut zu sein, andererseits aber auch mit dem schaltschrankbehafteten, kostengünstigen Aufbau umgehen zu können.

### **4.4 Mechatronisches, funktionsorientiertes Engineering von Produktionsmaschinen auf Basis des mechatronischen Informationsmodells**

Die aus der Softwaretechnik bekannte objektorientierte Modellierung von Softwaresystemen (Balzert 1999) wird auch für die funktionsorientierte Modellierung von Maschinen angewandt. Der abstrakte, hierarchische Aufbau eines Baukastens aus Klassen und Instanzen stellt das Grundgestaltungsmittel dar.

Eine **Klasse** (auch Objekttyp genannt) ist bei der Objektorientierung als ein abstrahiertes Modell bzw. ein Bauplan eines Objektes definiert. Klassen besitzen Attribute (Eigenschaften) und Methoden (Verhaltensweisen). Auf den Maschinenbau übertragen besitzen Klassen die Mechanik- und Elektropläne, aber auch die Software und Dokumentation.

Im Baukasten werden zunächst **Basisklassen** (z. B. Werkzeugwechsler) definiert. Die Basisklassen unterteilen sich in abgeleitete Unterklassen (stationärer Werkzeugwechsler, mitfahrender Werkzeugwechsler) und in deren Unterklassen (8-fach, 12-fach), usw.

Durch die Vererbung werden Daten der darüber liegenden Klassen in die betrachtete Klasse integriert, können dort genutzt oder überschrieben und den darunterliegenden Klassen zur Verfügung gestellt werden.

Eine **Instanz** beschreibt die konkrete Ausprägung einer Klasse, beispielsweise eine konkrete Einheit „Werkzeugwechsler, stationär, 8-fach“ einer Maschine.

Das für das mechatronische, funktionale Engineering erforderliche Vorgehensmodell nach dem Prinzip der Objektorientierung wurden u. a. in den Forschungsprojekten „Föederal“ (2004) (Litto et al. 2004) und „AQUIMO“ (2010) (Angerbauer et al. 2010) entwi-

ckelt. Der Engineering-Prozess wird in die beiden Tätigkeiten „Entwicklung“ und „Projektierung“ aufgeteilt. Dadurch ist das Engineering gezwungen, projektneutrale, wiederverwendbare, mechatronische Komponenten nach vorgegebenen Standards zu entwickeln und in einem Baukasten abzulegen. Abbildung 4-4 stellt schematisch einen solchen Baukasten dar. Die so entstehende Baukastenkomponente verfügt über disziplinspezifische Daten (Stücklisten für die Mechanik, Stromlaufpläne für die E-Technik, Programmbausteine für die Softwaretechnik, etc.).

Das Projekt „Föederal“ beschäftigte sich mit der Analyse der Projektierung von kundenspezifischen Maschinen und Anlagen. Das Verbesserungspotenzial wurde in der großen Anzahl an Funktionseinheiten identifiziert, welche von Auftrag zu Auftrag identisch oder zumindest ähnlich enthalten waren. Es wurde ein Vorgehen erarbeitet, das die wiederverwendbaren Projektbestandteile in Komponenten modularisiert und standardisiert.

In Abbildung 4-9 ist als Beispiel ein Greifer dargestellt. Er ist in mehreren Alt-Projekten (linke Seite des Bildes) enthalten, kommt hierin aber in verschiedenen Varianten vor. Föederal standardisiert nun den Greifer funktionsorientiert und legt ihn als Baukastenkomponente ab. Das so entstehende Maximalmodell kann nun durch seine Eigenschaften und Parameter so konfiguriert werden, dass daraus die für ein neues Projekt benötigte Variante, im Bild „Maschineinheit“ (MU; engl. „Machine Unit“) entsteht. Im Beispiel in Abbildung 4-9 sind dies die drei Parameter Aktorik, Rückstellbewegung und Endlagenkontrolle. Während dem Projektieren werden diese Parameter Auftragspezifisch gesetzt. Beispielsweise kann ein Greifer mit pneumatischer Aktorik, einer aktiven Rückstellung durch Betätigung eines Ventils, sowie mit Endlagenkontrolle eingesetzt werden. Werden andere Parameter gewählt, entsteht eine weitere Variante der Baukastenkomponente „Greifer“.

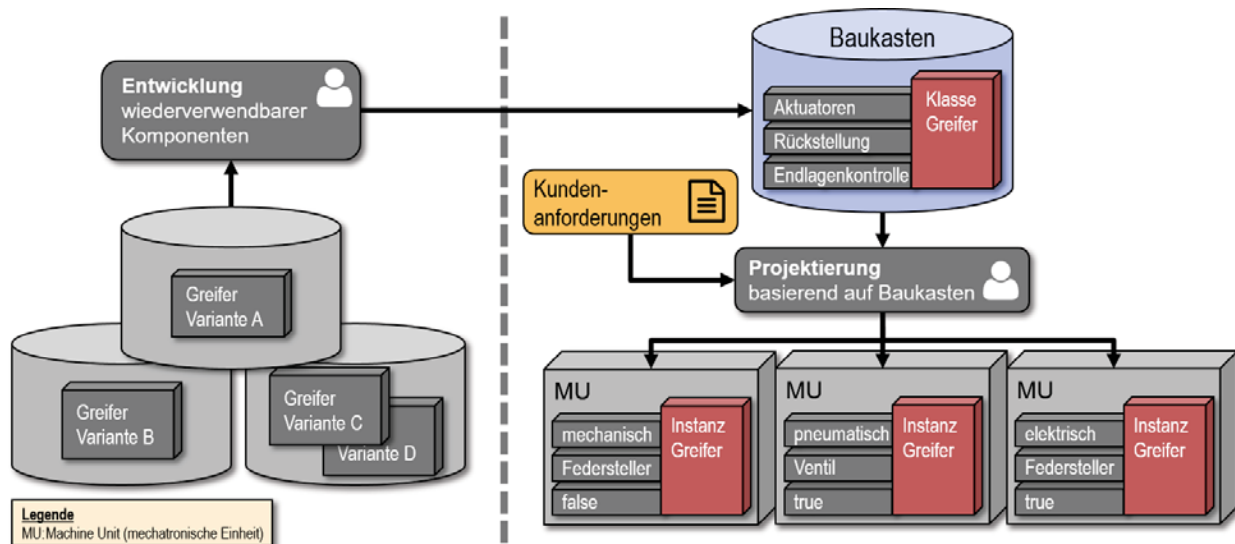


Abbildung 4-9: Engineering-Prozess mit Hilfe von wiederverwendbaren mechatronischen Komponenten (nach (Angerbauer et al. 2010))

Durch Kombination mehrerer Baukastenkomponenten entstehen die Baugruppen, welche eine vorgegebene Funktion erfüllen. Für die Erfüllung komplexerer Funktionen, für die mehrere Baugruppen benötigt werden, können Funktionsbaugruppen definiert werden.

Es ergibt sich ein hierarchisierter Aufbau des Baukastens:

$$\text{Baukastenkomponente} \xrightarrow{1..n} \text{Baugruppe} \xrightarrow{1..n} \text{Funktionsbaugruppe}$$

Im Projekt „Adaptierbares Modellierungswerkzeug und Qualifizierungsprogramm für den Aufbau firmenspezifischer mechatronischer Engineering-Prozesse“ (AQUIMO) wurden die beiden Teilprozesse „Entwicklung“ und „Auftragsdurchlauf“ als die beiden wesentlichen Teilprozesse für die Optimierung von Engineering-Prozessen erkannt (vgl. Abbildung 4-10).

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

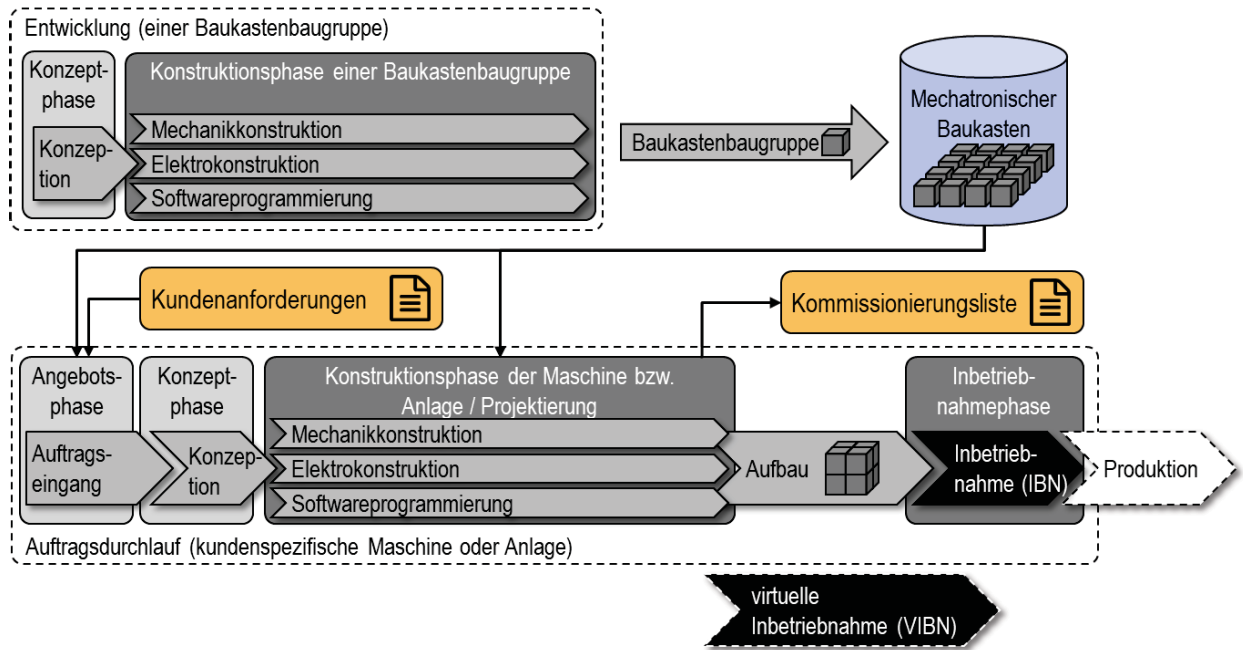


Abbildung 4-10: Teilprozesse Entwicklung und Auftragsdurchlauf, entwickelt aus (Angerbauer et al. 2010) unter Berücksichtigung des baukastenbasierten Engineerings

Die Vorgehensmodelle und Ansätze, welche im Projekt „Föederal“ erarbeitet wurden optimierten den Auftragsdurchlauf. Das Projekt AQUIMO baut darauf auf und befasst sich mit der Optimierung des Entwicklungsprozesses von Bauelementen. Es wurde erkannt, dass eine gemeinsame Sprache der verschiedenen Disziplinen Mechanik, Elektrik, Fluidik und Softwaretechnik fehlt, welche es allen Disziplinen ermöglicht zusammen das Produkt zu entwickeln, Probleme schnell zu erkennen und interdisziplinär zu beheben. Der etablierte serielle Entwicklungsprozess sollte aufgebrochen werden.

Im Projekt „AQUIMO“ wurde außerdem erkannt, dass der Einfluss der ersten Engineering-Phase auf die Kosten, die benötigte Zeit, sowie die erreichbare Qualität am höchsten ist (vgl. Abbildung 4-11). Aus diesem Grund wird bei der entwickelten AQUIMO-Methode mit einer interdisziplinären Entwicklungsphase begonnen, welche die Möglichkeiten und das Potential jeder Disziplin zusammenbringt. Ziel ist es ein funktionales, mechatronisches Konzept für eine möglichst optimale mechatronische Komponente zu entwerfen (die Rahmenbedingungen für die optimale Lösung sind hierbei vom Entwicklerteam zu setzen. Dies könnten Rahmenbedingungen hinsichtlich Kosten, Geschwindigkeit, Bauraum, Fertigungsqualität, etc. sein.).

## 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

Steht das erste Konzept fest, wird mit der Konstruktion in den einzelnen Fachdisziplinen begonnen. Das in der ersten interdisziplinären Phase (im Bild „Interdis. Eng.“) entwickelte funktionale, mechatronische Konzept dient hierbei als Grundlage. Es enthält u. a. die funktionale Struktur, ein vereinfachtes 3D-Modell, sowie ein Ablaufmodell. Das Konzept wird in weiteren interdisziplinären und disziplinspezifischen Entwicklungsphasen stückweise weiter detailliert.

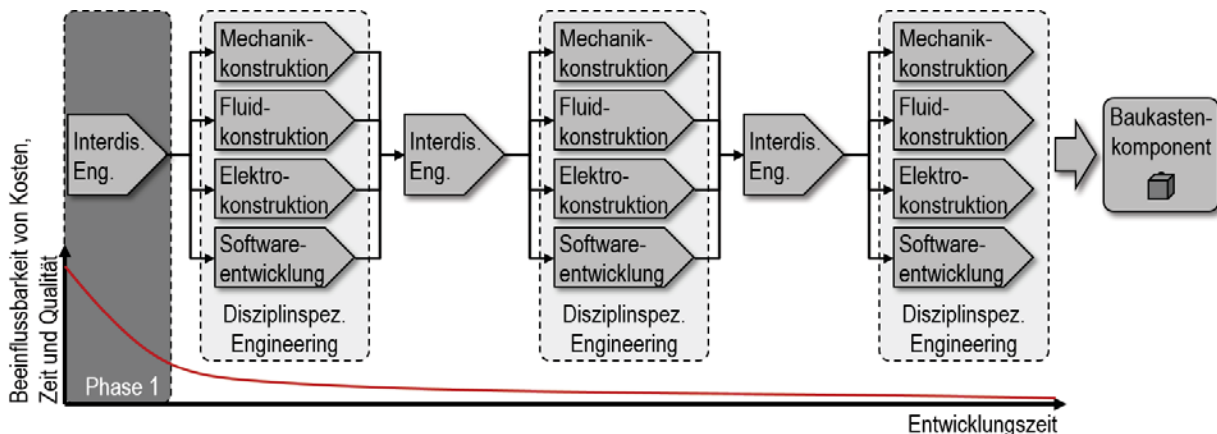


Abbildung 4-11: Einfluss der Entwicklungsphasen auf Kosten, Zeit und Qualität (nach (Angerbauer et al. 2010))

Durch die in die einzelnen Fachdisziplinen parallelisierte Arbeiten, sowie die interdisziplinären Phasen, welche dem interdisziplinären Austausch und Abgleich dienen, kann die Durchlaufzeit, sowie die erforderlichen finanziellen Mittel zur Erstellung einer neuen mechatronischen Komponente deutlich reduziert werden. Ebenso ist sichergestellt, dass das gewünschte Optimum der Lösung erreicht wird.

### 4.5 Projektierung mechatronischer Maschinen und Anlagen

Der Begriff „Projektierung“ wird im Maschinen- und Anlagenbau für die Zusammenstellung von kundenspezifischen Maschinen und Anlagen auf Basis einer Kundenanforderung verwendet. Unterstützt wird sie durch Projektierungstools, die mit hinterlegten Regelwerken eine funktionierende Gesamtkonfiguration hervorbringen. Das Projektierungstool kennt hierbei sämtliche mechatronischen Baugruppen, sowie deren Querbeziehungen, Abhängigkeiten und Kompatibilitäten. Einer Baugruppe sind disziplinspezifische Daten zugeordnet, wie z. B. ECAD, MCAD, Dokumentation, Konfigurationsdaten für die CNC und die SPS, kundenspezifische Bedienoberfläche, Wartungspläne

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

und Fehlertexte in allen Sprachen. Unter Berücksichtigung dieser Daten leitet das Projektierungstool den Anwender durch die Zusammenstellung einer neuen Maschinen- bzw. Anlagenkonfiguration und konfiguriert Generatoren für die Erzeugung des SPS-Quellcodes, sowie die Konfiguration der CNC. Im Rahmen des AQUIMO-Projektes wurde hierfür das Softwarewerkzeug EPEDA (Kurzform für „Entwicklung, Projektierung und Erstellung eines Datensystems zur Anlagenbeschreibung“) genutzt (Doll 2010)(vgl. Abbildung 4-12). Dieses prinzipielle Vorgehen ist in verschiedenen Ansätzen dokumentiert (Litto et al. 2004; VDI/VDE 3695-2).

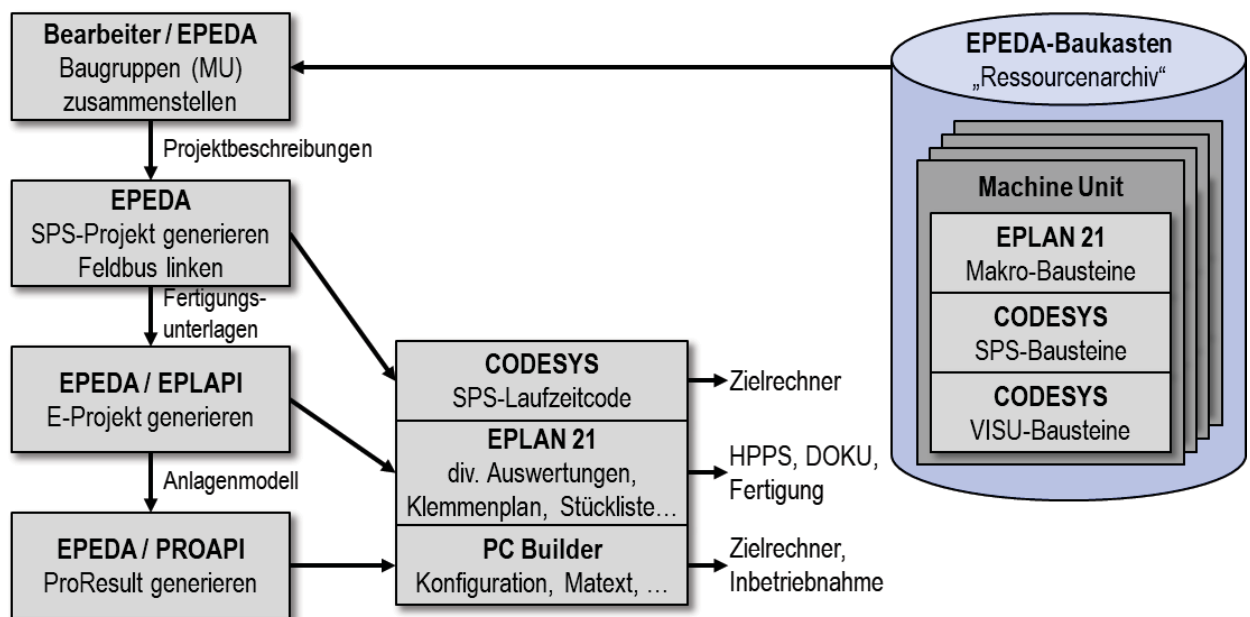


Abbildung 4-12: Ablauf der Projektierung mit EPEDA 3, nach (Doll 2010)

Die Projektierung einer neuen Produktionsmaschine beginnt mit dem Kundenwunsch. Hieraus wird eine Anforderungsliste formuliert. Es wird unter anderem die Basismaschine bzw. der Maschinentyp ausgewählt, die geforderten Bearbeitungsmöglichkeiten und die Bearbeitungsqualität beschrieben, die zu verbauenden Maschinenoptionen bestimmt sowie eine durchschnittliche Fertigungszeit eines Referenzwerkstücks festgelegt.

Diese Anforderungsliste dient als Grundlage für die eigentliche Projektierung der Produktionsmaschine. Der Entwicklungsingenieur trägt sie in das verwendete Projektierungstool ein, welches unter Berücksichtigung von Kompatibilität, Querbeziehungen und Kombinationsmöglichkeiten eine Kommissionierungsliste erstellt. Diese beschreibt die Maschine als Gesamtheit ausgewählter mechatronischer Baugruppen

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

(MU, engl. „Machine Unit“) des Baukastens. Die zu den MU im Baukasten hinterlegten Informationen werden nun für den mechanischen und elektrischen Aufbau und auch für die Steuerung verwendet:

- Beim mechanischen und elektrischen Aufbau der Produktionsmaschine werden die MU, wie vom Kommissionierungstool vorgesehen, an den mechanischen Schnittstellen der Basismaschine befestigt.
- Das SPS-Programm sowie die CNC-Konfiguration der Steuerung werden über die Informationen der Kommissionierungsliste automatisiert generiert.

Abschließend erfolgt die Inbetriebnahme der Produktionsmaschine. Sicherheitstechnische Anforderungen, welche die Maschine bzw. Anlage erfüllen muss, sind in Richtlinien wie (VDI 2854) festgehalten. Eine Inbetriebnahme besteht aus einem Komponententest, durch welchen auf korrekte Verkabelung sowie korrekte Funktion der einzelnen MU überprüft wird. Anschließend erfolgt der Softwaretest, welcher die Maschine als Ganzes anspricht. Hierzu gehört nicht nur die reine Bewegung der Maschine, sondern auch Fehlerreaktion, Genauigkeit und Produktivität. Durch anschließende Anpassungen und Optimierungen des generierten Programmes und Konfiguration der Steuerung wird die Maschine auf die Kundenanforderungen hin getrimmt. Erst hier kann erkannt werden, ob die Maschine die Leistung erbringen kann, welche vom Kunden in der Anforderungsliste gefordert war.

In der Anforderungsliste ist oft auch ein Referenzwerkstück definiert, welches als abschließender Test der Maschine oder Anlage gefertigt werden muss. Dies kann entweder bei einer Werksabnahme (engl. „Factory Acceptance Test“, kurz „FAT“) beim Hersteller oder dem Abnahmetest am Zielort beim Kunden (engl. „Site Acceptance Test“, kurz „SAT“) stattfinden.

Der beschriebene Ablauf von der Projektierung bis zur fertigen Maschine oder Anlage ist in Abbildung 4-13 schematisch dargestellt. Es soll im Folgenden als Referenzbild für die mechatronische Projektierung dienen. Der eingezeichnete Generator/Konfigurator für die Anpassung von CNC und SPS trägt dem Rechnung, dass Steuerungen dem Stand der Technik folgend in ihrer steuerungstechnischen und programmtechnischen Ausstattung automatisch konfiguriert und parametrierbar werden können.

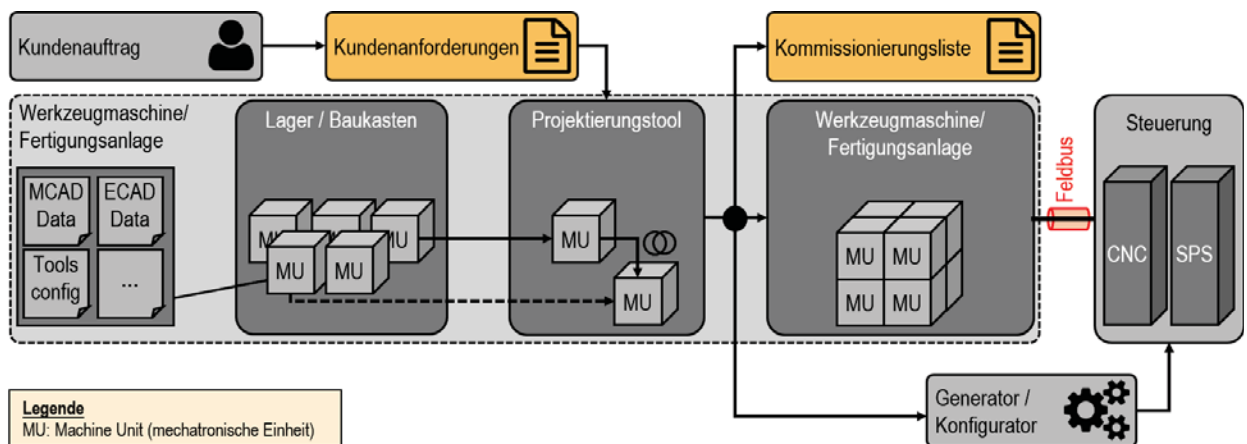


Abbildung 4-13: Referenzbild „Engineering mechatronischer Maschinen und Anlagen“ (Scheifele et al. 2016a)

### 4.6 Zusammenfassung zum Stand der Technik

Die Arbeiten zur Modularisierung der Hardware, als auch die Arbeiten zur Modularisierung der Software haben zu einer mechatronischen Sichtweise und einer Unterteilung von Maschine und Anlagen in wiederverwendbare, funktionale Module geführt. Die Forschungsprojekte „Föderal“ und „AQUIMO“ bildeten die Grundlage zur Schaffung eines mechatronischen, funktionalen Baukastens, aus welchem heraus Maschinen und Anlagen projiziert werden können. Die damit einhergehende hohe Komplexität des Projektierungsprozesses verlangt nach Tools zur Unterstützung der Projektierung, welche ein mechatronisches, funktionsorientiertes Engineering ermöglichen.

### 4.7 Unterstützung des Entwicklungsprozesses durch die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)

Seit Anfang der 2000er Jahre wurden Softwaretools entwickelt, welche es Herstellern von Produktionsmaschinen und Produktionsanlagen erlauben, ihre Software anhand von einem virtuellen Abbild ihres Produktes virtuell in Betrieb zu nehmen (Bauernhansl 2015). Primär stand die Verifikation des Steuerungssystems im Vordergrund (Kreusch 2002; Röck 2007; Wunsch 2007). Ziel der virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) ist das Aufdecken und Beheben von Fehlern aus dem Engineering des Steuerungscode des Steuerungssystems. So kann die Qualität der Software insgesamt verbessert werden, denn nach Expertenmeinung (Pieloth 2011) dienen mehr als 2/3 eines SPS-

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

Programmes nur der Reaktion auf äußere Einflüsse sowie der Fehlererkennung und der primären Fehlerreaktion. Lediglich 1/3 bilden die Funktionalität. Insbesondere können auch Fehlerfälle, welche bei Nichterkennung die Maschine zerstören könnten, getestet werden, ohne die realen Komponenten zu gefährden. Ebenso ist eine Vorhersage von Prozessergebnissen, sowie eine Überwachung auf Ausfall und Kollision möglich (Pritschow 2002; Pritschow 2005; Pritschow et al. 2005).

Die Richtlinie VDI 4499 Blatt 1 (VDI 4499-1) nennt die folgenden Testfälle:

- Fehler im Steuerungscode, z. B. logische Fehler, Tipp- und Kopierfehler,
- Testen der Bedienoberflächen,
- Ablauffehler im Steuerungscode, z. B. Erzeugen von Kollisionen sowie fehlerhafte Freigabe- und Verriegelungssignale,
- Testen und Validieren des dynamischen Verhaltens der Anlage, z. B. beim Voll- und Leerfahren, Einricht-, Hand- oder Automatikbetrieb,
- Berücksichtigung von Sonderfällen, z. B. Ein /Ausschleusen von Bauteilen,
- Validierung der geplanten Anlagenparameter, z. B. Taktzeit, Ausbringung, Verfügbarkeit,
- gezielte Simulation von Störungssituationen, z. B. Kabelbruch, Sensorausfall.

Wird die VIBN an Anlagen und vernetzten Maschinen durchgeführt, so kommen Test der Anbindung an die Leittechnik, sowie Diagnose-, Überwachungs- und Arbeitsvorbereitungstools hinzu.

Erwartet man, dass das so mittels VIBN in Betrieb genommen Steuerungssystem auch an der realen Maschine exakt funktioniert, so muss die VIBN an einem Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulationsaufbau durchgeführt werden. Nur hier wird der reale Zielsteuerungscode auf einem realen Steuerungssystem gegen ein simuliertes Anlagenmodell getestet (VDI/VDE 3693-1).

### 4.7.1 Echtzeitfähige Hardware-In-The-Loop Simulation

Röck hat erkannt, dass für eine VIBN einer Steuerung die verlustfreie und zeitsynchrone Kommunikation zwischen der Steuerung und einem zeitdeterministischer Rechenkern der Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) einen integralen Bestandteil darstellt (Röck 2007). Die Steuersignale werden isochron im Verhaltensmodell verarbeitet. Dieses unterteilt sich in die drei deterministischen Modelle für die Logik, die Dynamik und die Kinematik der simulierten Maschine oder Anlage, welche numerischer Robustheit bei ausreichender Genauigkeit genügen müssen. Nur so kann eine taktgenaue Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Simulation gewährleistet werden. Es wird ebenfalls keinerlei Modifikation des Steuerungssystems notwendig. Die Inbetriebnahme-Ergebnisse sind somit auf die reale Anlage direkt übertragbar.

Abbildung 4-14 stellt die Gesamtarchitektur seines Entwurfes dar. Ein (Feld-) Bustreiber liest die aktuell von der Steuerung vorgegebenen Soll-Werte ein und übermittelt sie über eine Echtzeit-Schnittstelle an den Simulationskern. Dort wird das Verhalten (Logik, Dynamik und Kinematik) der Maschine entsprechend dem zuvor modellierten Simulationsmodell in Echtzeit berechnet. Die durch den Simulationskern berechneten Ist-Werte werden ebenfalls in Echtzeit an die Steuerung zurückgeliefert. Zur Darstellung und Aufzeichnung werden alle berechneten Zustandsdaten an ein Monitoringwerkzeug übergeben. Da die Echtzeit-Schnittstelle und das Monitoringwerkzeug auf unterschiedlichen Zeitebenen arbeiten wird ein FIFO-Speicher zwischengeschaltet, um die beiden Zeitebenen zu entkoppeln und eine verlustfreie Datenübermittlung zu garantieren.

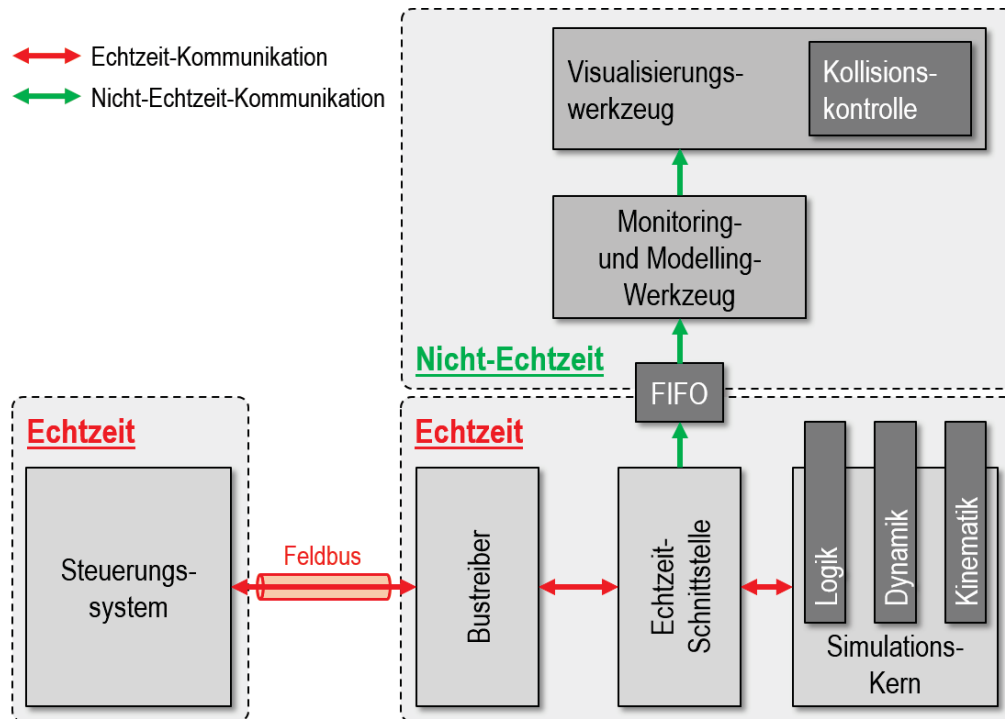


Abbildung 4-14: Gesamtarchitektur eines Hardware-in-the-Loop Simulators nach (Pritschow et al. 2005)

Er unterscheidet bei der Erstellung eines Simulationsmodells für eine Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) zwischen der Erstellung eines Verhaltensmodells und eines Geometriemodells zur Visualisierung.

Grundsätzlich orientiert sich das Gesamtmodell der Maschine oder Anlage an der korrekten Feldbus-Antwort auf eine Feldbus-Anfrage des Steuerungssystems.

Das Verhaltensmodell bildet das Feldbusverhalten der Maschine oder Anlage nach. Sein Vorgehensmodell für die Erstellung eines Verhaltensmodells teilt die Gesamtmaschine zunächst in Einzelkomponenten (EK) auf. Eine Einzelkomponente kann z. B. ein Hydraulikzylinder, ein Schalter, ein Sensor, etc. sein. Das Verhaltensmodell der Einzelkomponente wird anschließend aus einer vom Simulationstool bereitgestellten Bausteinbibliothek abgebildet.

Das Geometriemodell bestimmt er aus der den CAD-Daten der mechanischen Konstruktion. Durch geeigneten Import in das Simulationstool, die Aufteilung auf Kinematikelemente und deren datentechnische Verbindung zu den Positionsdaten der kinematischen Kette des Verhaltensmodelles stellt er ein grafisches Abbild der bewegten Maschine her.

Abbildung 4-15 zeigt nun dieses Vorgehensmodell entsprechend der Darstellung in Abbildung 4-13.

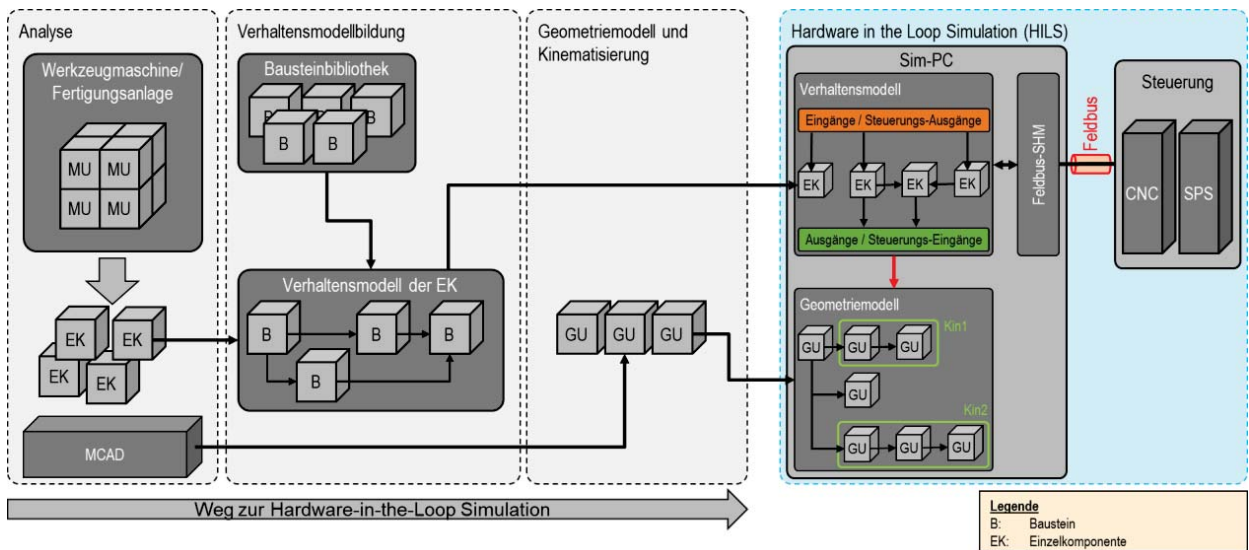


Abbildung 4-15: Vorgehensmodell bei der Erstellung einer HILS

#### 4.7.2 Ansätze zur automatisierten Modellerstellung

Dem praktischen Einsatz einer HILS steht oft der benötigte hohe Aufwand zur Erstellung einer virtuellen Maschine entgegen. Um diese zu reduzieren gab es bereits mehrere Forschungsarbeiten zur automatisierten Erstellung des Verhaltensmodells.

Röck sieht vor, dass aus Bausteinen eines Grundumfanges umfangreiche parametrierbare und gekapselte Bausteine aggregiert und der Bibliothek zugeführt werden können. Die Verwendung dieser mächtigeren Bausteine reduzieren den Modellierungsaufwand erheblich. Vom Simulationssystem werden die aggregierten Bausteine automatisch, unter Berücksichtigung der Parameter, in ein Netzwerk von Grundbausteinen umgesetzt.

Voß beschreibt in ihrer Dissertation „Wiederverwendbare Simulationsmodelle für die domänen- und disziplinübergreifende Produktentwicklung“ (Voß 2012) ein Konzept zur domänen- und disziplinübergreifenden Wiederverwendung vorhandener Simulationsmodelle von einzelnen Maschinenkomponenten in verschiedenen Simulationssystemen. Der Modellentwickler wählt Bausteine daraus, die in der Summe das Gesamtverhalten seiner Maschine beschreiben. Automatisiert ist anschließend die Generierung eines Simulationsmodells für ein konkretes Simulationssystem.

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

Lindworsky geht in seiner Dissertation (Lindworsky 2011) mit der „teilautomatischen Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest“ einen Schritt weiter. Ausgehend vom CAD-Modell der kompletten Maschine oder Anlage identifiziert er automatisch alle Elemente, die mit der SPS interagieren werden. Für diese Elemente, z. B. ein Sensor, kennt sein System C++-Programmteile, die das E/A-Verhalten als Verhaltensmodell abbilden. Durch aneinanderreihen dieser Code-Stücke entsteht ein Gesamtmodell der Maschine. Lindworsky betrachtet in seiner Lösung nur den Materialfluss durch Anlagen und lässt CNC-Maschinen außen vor.

Kufner (Kufner 2012) identifiziert solche mit der SPS interagierenden Elemente aus dem Stromlaufplan der Anlage. Für diese kennt ihre Lösung sogenannte Metamodelle. Mittels einer Ableitungsvorschrift generiert sie aus diesen konkret auf die erkannten Elemente angepasste Verhaltensmodelle für ein HILS nach dem Ansatz von Röck. Unbeachtet bleibt die kinematische Verkettung der Baugruppen, da diese im Stromlaufplan nicht hinterlegt ist, sodass nur das logische Verhalten der Anlage betrachtet wird.

Voß, Lindworski und Kufner beschäftigen sich nicht mit Bearbeitungsmaschinen und geben deshalb keine Antwort auf die auf Modellgenerierung für mechanisch und kinematisch verkettete Baugruppen. Sie verzichten auch auf eine visuelle Darstellung der Maschine, die ihrem Verhaltensmodell folgt, welche aber wichtig für die visuelle Überprüfung ist. Gerade bei Bearbeitungsmaschinen und Industrierobotern ist die Kollisionkontrolle essentiell, welche nur durch ein Geometriemodell der Anlage erfolgen kann. Ein disziplinübergreifendes Verständnis der betrachteten Fertigungsanlage über die mechatronischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Steuerungstechnik fehlt somit.

Alle Autoren beschreiben Ansätze zur Aufwandsreduzierung durch eine gewisse Automatisierung. Lediglich Kufner sieht vor, aus einem bereits vorliegenden Ergebnis des im Maschinenbau etablierten Entwicklungsprozesses ein Verhaltensmodell abzuleiten. Eine Integration in den mechatronischen Entwicklungsprozess hat somit noch nicht stattgefunden, sodass die virtuelle Inbetriebnahme und die Absicherung der Konstruktion durch eine virtuelle Maschine als Zusatzaufwand betrachtet werden muss.

### 4.7.3 Zusammenfassung

Die in Forschungsarbeiten und Dissertationen (Lindworsky 2011; Kufner 2012; Voß 2012) vorgeschlagene Generierung von Verhaltensmodellen verzichten auf die im Engineeringprozess nach Föderal und AQUIMO bekannten und dort als essentiell beurteilten Sicht auf mechatronische Maschinenbaugruppen. Röck erlaubt eine gewisse Beibehaltung der Baugruppensicht durch die Möglichkeit, eine baugruppenorientierte Bibliothek komplexer Verhaltensmodelle aufzubauen. Diese Möglichkeit sieht er jedoch beim grafischen Modell nicht vor.

Der weitest gehende Ansatz zur automatischen Modellgenerierung nach (Kufner 2012) setzt auf einem Teilergebnis des mechatronischen Engineerings auf, nämlich dem Stromlaufplan einer Maschine. Nur die darin enthaltenen Informationen können für das Verhaltensmodell genutzt werden. Dazu gehört beispielsweise nicht das Wissen über eine Interaktion mechanischer Baugruppen, wozu die kinematische Kette gehört.

	Röck	Lindworsky	Kufner	Voß
1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe (mechatronische Modularität)				
Integration in den mechatronischen Entwicklungsprozess				
Automatisierte Erstellung der virtuellen Maschine				
Modell für CNC- und Durchlaufmaschinen, Materialfluss				

Agenda	
Nicht erfüllt	
Teilweise erfüllt	
Erfüllt	

Tabelle 1: Zusammenfassung der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Generierung von Simulationsmodellen

Da jedoch der mechatronische Engineeringprozess im fortschrittlichen Maschinenbau auf einem Baukasten basiert, die Baukastenkomponente also in allen Disziplinen vollständig beschrieben ist, stellt sich die Frage, warum diese „Primärdaten“ der Baukastenkomponente nicht auch für die virtuelle Maschine und damit ohne Informationsverlust genutzt werden. Eine Maschine ist damit heute mechanisch, elektrisch, funktional

## 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

und steuerungstechnisch über eine Liste der zum Einsatz vorgesehenen Baugruppen in Form einer Kommissionierungsliste für den Maschinenbau ausreichen definiert. Nachdem die genannten Disziplinen alle auf die Baugruppensicht abgestellt werden konnten, muss diese Baugruppensicht für die VIBN in Form einer 1:1-Beziehung zwischen mechatronischer Maschinenbaugruppe (MU, engl. „Maschine Unit“) und virtueller Maschinenbaugruppe (VU, engl. „Virtual Unit“) ebenfalls gelten. Der Vorteil wäre dann darin zu erwarten, dass der bereits vorhandene Engineeringprozess unverändert bliebe und lediglich, um die virtuelle Maschine erweitert werden müsste.

### **4.7.4 Lösungsansatz**

Liegen die einzelnen MU als VU vor, so bietet es sich an, die virtuelle Maschine auf dieselbe Weise zu erstellen, wie auch die reale Maschine. Etablierte Abläufe und Softwaretools ließen sich so ohne Anpassung direkt weiter nutzen. Erweitert man das Referenzbild Abbildung 4-13 um die virtuelle Maschine, so entsteht Abbildung 4-16: Das Projektierungstool erzeugt aus der Anforderungsliste des Kunden eine Kommissionierungsliste, welche für den Aufbau der realen, als auch für die virtuelle Maschine genutzt wird. Aus einem Baukasten heraus – bei der virtuellen Maschine aus einer Datenbank heraus – werden für die Anforderungen passende Baugruppen ausgewählt und zusammengestellt. Während eine MU aus sämtlichen Engineeringdaten der Maschinenbaugruppe besteht, besteht eine VU aus dem Verhaltensmodell (BU, engl. „Behavior Unit“) und dem Geometriemodell (GU, engl. „Geometry Unit“) der Maschinenbaugruppe.

#### 4 Stand der Technik des mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinenbau

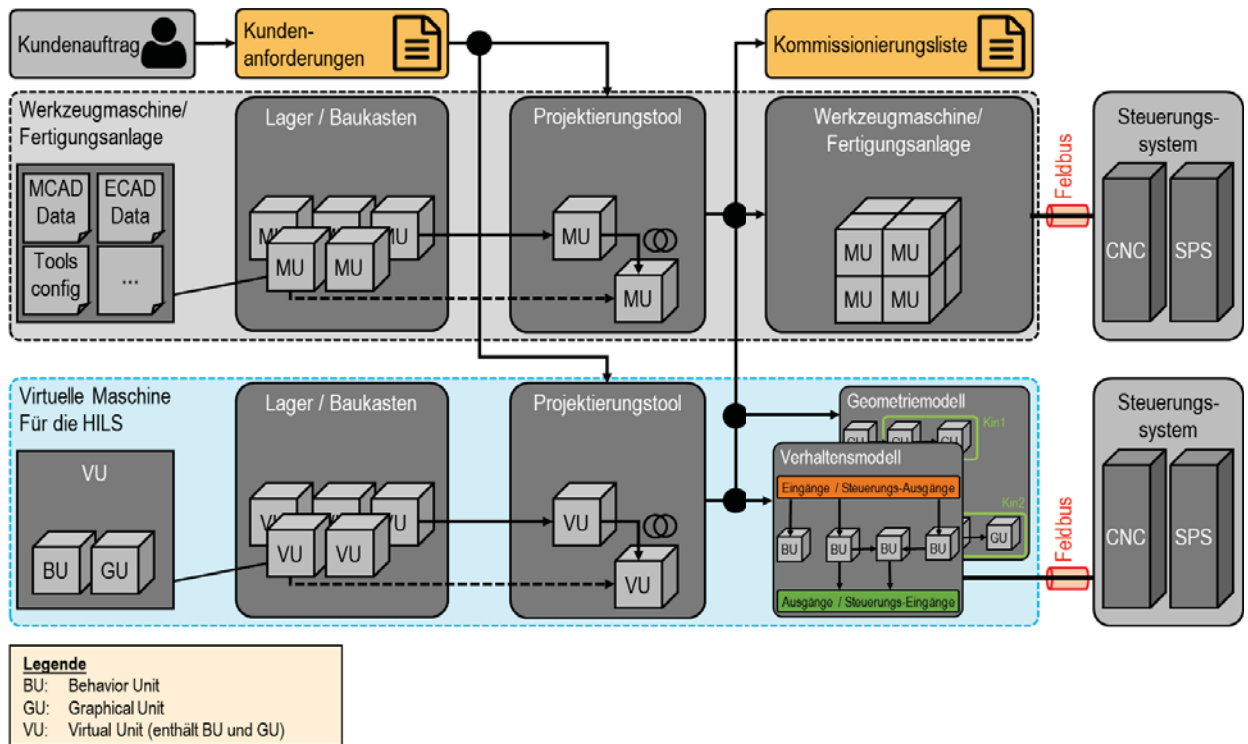


Abbildung 4-16: Homogenisierung des Engineerings realer und virtueller Maschinen (Scheifele et al. 2016b)

Vor Beantwortung dieser Fragen, wäre im Rahmen der Konzeption zunächst zu untersuchen, ob durch die Kommissionierungsliste und ihren MU tatsächlich alle Querbeziehungen erfasst werden und diese auch für die VU gültig und ausreichend sind.



---

## 5 Konzeption

Der mechatronische Engineeringprozess zerlegt die Gesamtmaschine in einzelne, voneinander unabhängige mechatronische Baugruppen (MU, engl. „Machine Unit“).

Einer MU sind disziplinspezifische Daten zugeordnet, wie z. B. ECAD, MCAD, Dokumentation, Konfigurationsdaten für die CNC und die SPS, kundenspezifische Bedienoberfläche, Wartungspläne und Fehlertexte in allen Sprachen. Aus diesen Daten kann die zur MU gehörende mechanische Hardware aufgebaut und angesteuert werden. Aus dem Vorgehensmodell von Föderal, welches in Kapitel 4.4 beschrieben wurde und dem Vorgehensmodell zur Projektierung von mechatronischen Maschinen und Anlagen aus Kapitel 4.5 lässt sich ableiten, dass zu einer MU ein Verwaltungsteil gehört, welcher ebenfalls im Baukasten abgelegt wird.

Für das Projektierungswerkzeug sind Informationen über Querbeziehungen von MU wichtig, um später zu prüfen, wie sich dies im Konfigurationsprozess für die virtuelle Maschine abbilden lässt, soll im Folgenden zunächst untersucht werden, welche Querbeziehungen zwischen MU existieren und wie diese für den Engineeringprozess bekannt sind.

Die Definition des Verwaltungsteils für solche Querbeziehungen, wie z. B. Abhängigkeiten zwischen und Ausschlüsse von Baugruppen, ist in der Literatur unbekannt, aber für diese Arbeit notwendig. Es bietet sich an, auf der Definition der mechatronischen Schnittstellen nach Wurst (Wurst 1991) aufzusetzen, welche in Kapitel 4.1 beschrieben wurde. Querbeziehungen mechatronischer Baugruppen bezeichnet er als Schnittstellen. Dieses Schnittstellenkonzept bezieht sich jedoch grundsätzlich auf den mechatronischen Entwurf. Im Rahmen dieser Arbeit wird ersichtlich werden, dass dieses Konzept in erweiterter Form die Basis für eine Generierung von Simulationsmodellen darstellt. Vorhandene Entwurfsprozesse sind daher dazu gezwungen über alle Disziplinen hinweg dieses Schnittstellenkonzept zu berücksichtigen. Nur so lässt sich eine einheitliche Sichtweise auf eine Baugruppe realisieren.

### 5.1 Schnittstellen mechatronischer Baugruppen

In Kapitel 4.1 wurde nach (Wurst 1991) beschrieben, dass jede mechatronische Baugruppe die folgenden vier fest definierten Schnittstellentypen besitzt, welche für alle Disziplinen des mechatronischen Engineerings verbindlich sind:

- Die kommunikative Schnittstelle,
- Die funktionale Schnittstelle,
- Die mechanische Schnittstelle,
- Die energetische Schnittstelle.

#### 5.1.1 Kommunikative Schnittstelle

Die kommunikative Schnittstelle beschreibt die Sichtweise der Steuerung auf die mechatronische Baugruppe. Während der ersten Phase des Engineerings wird festgelegt, welche digitalen, analogen oder komplexen Ein- und Ausgangssignale, kurz E/A-Signale, die mechatronische Baugruppe besitzt. Diese E/A-Signale werden zyklisch über den Feldbus zwischen Steuerungssystem und Feldbusgerät ausgetauscht. Sie werden Prozessdatenobjekte (PDO) genannt. Die PDO werden in der nunmehr „P-Schicht der mechatronischen Baugruppe“ genannten Information dokumentiert.

Die PDO werden durch einen, dem Typ des Signals entsprechenden Speicherbereich im zyklischen über ein Feldbussystem übertragenden Feldbustelegram abgebildet und repräsentiert. Hinzu kommt die azyklische Kommunikation, welche primär für das Abfragen oder Schreiben von Parameterwerten komplexer Feldbuskomponenten, wie z. B. Antriebsumrichtern, verwendet wird.

Die Steuerung kommuniziert mit der P-Schicht mit den Maschinenbaugruppen, die durch den mechanischen und elektrischen Aufbau, sowie den Aktoren der Baugruppe vorgegebenes Verhalten als Antwort auf die Führungsgrößen der Steuerungen zeigen. Die P-Schicht der Baugruppe ist die einzige Verbindung zwischen Steuerungssystem und Baugruppe.

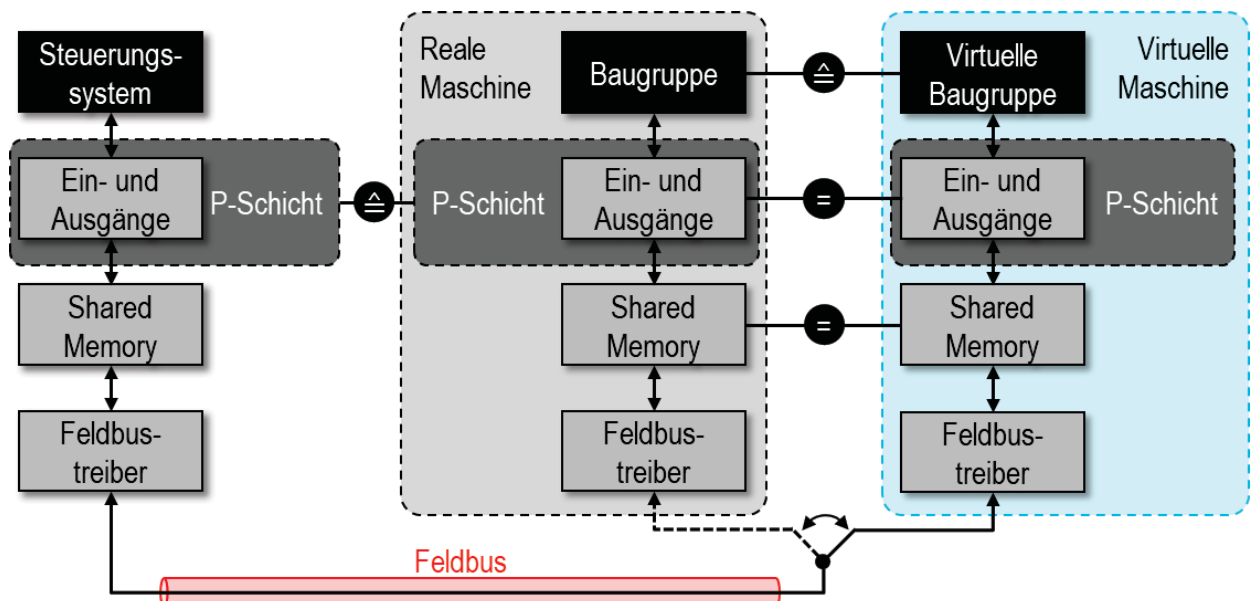


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Steuerungssystem und Baugruppe

Baugruppen leiten sich objektorientiert aus Baugruppenklassen ab. Dort ist die P-Schicht mit klassenspezifischen Betriebsmittelkennzeichen (BMK) modelliert. Die BMK müssen dann bei konkreter Verwendung („Instanziierung der Baugruppenklasse“) auf die maschinenspezifischen Betriebsmittelkennzeichen angepasst werden, welche vom Projektierungstool nach vorgegebenen Regeln vergeben werden. Die BMK sind über alle mechatronischen Disziplinen hinweg bekannt und eindeutig definiert. Die hierfür geltenden Regeln zur Benennung von Betriebsmitteln sind in (DIN EN 81346-2) definiert. Diese Regelungen werden meist ergänzt durch die für SPS-Programme geltende Norm für die Benennung von Eingängen und Ausgängen von Programmorganisationseinheiten (POU) nach (DIN EN 61131-3), Kapitel 6.5.5 „*Direkt dargestellte Variablen (%)*“.

Für die PDO-Benennung soll für diese Arbeit die in Tabelle 2 dargestellte Konvention gelten, welche sich aus (DIN EN 61131-3) und (DIN EN 81346-2) zusammensetzt und die Zuordnung der Variable zu einer Baugruppe enthält.

## 5 Konzeption

VA	VG	–	FK	–	MU	–	GBZ	–	CTR (optional)
Variablenart	Variablengröße		Funktionsklasse (logische Örtlichkeit)		Baugruppennummer		Gerätebezeichnung		Zähler innerhalb der Klasse
I: Input Q: Output M: Intern G: Global	X: Bit B: Byte W: Word D: DWord (32bit) L: LWord (64bit)						nach DIN EN 81346-2:2010-12		
1 Stelle	1 Stelle	1	3 Stellen	1	3 Stellen	1	X Stellen	1	z. B. 2 Stellen

**Tabelle 2:** Namenskonvention für Ein-/Ausgänge

Die Benennung von PDO geschieht immer aus Steuerungssicht. Der Variablenname richtet sich nach der Deklaration der Variable im Steuerungssystem aber auch nach ihren physikalischen Eigenschaften:

- Die Variablenart (VA) definiert, ob die Variable ein Eingang, ein Ausgang, ein steuerungsinterner Speicher oder eine steuerungsprogrammübergreifende globale Variable ist.
- Die Variablengröße (VG) gibt an, mit welcher Speicherbereichsgröße die Variable deklariert ist.
- Die Funktionsklasse (FK) beschreibt die logische Örtlichkeit des E/A. Dies kann z. B. „C“ für den Schaltschrank (engl. „Cabinet“) sein. Weitere Konventionen sind z. B. „FBD“ für Feldbusgerät, also ein E/A, der nicht physikalisch verfügbar ist, sondern intern in einem Feldbusteilnehmer wie einem Antriebsumrichter verarbeitet wird.
- Die Baugruppennummer (MU) gibt an, zu welcher mechatronischen Baugruppe eine Variable gehört.
- Die Gerätebezeichnung (GBZ) entspricht der Betriebsmittelkennzeichnung nach (DIN EN 81346-2).
- Der Zähler (CTR) ist optional. Falls eine Variablenbezeichnung mehrfach vorkommen würde, kann so die Variable eindeutig einem Betriebsmittel zugeordnet werden.

Ein Schalter, welche am Steuerungssystem über das Feldbussystem angeschlossen ist und zur Baugruppe „050“ gehört, würde dann beispielsweise so benannt werden:

- IX\_AN\_050\_S42

Die Namenskonvention ist zwar herstellerspezifisch, das mechatronische Vorgehensmodell verlangt aber, dass diese Namenskonvention für alle Disziplinen gilt und ein Betriebsmittelkennzeichen disziplinübergreifend für ein genau definiertes Betriebsmittel gilt. Es liegt also nahe, dieses Betriebsmittelkennzeichen auch in der virtuellen Maschine zu verwenden.

Mit den Informationen der P-Schicht erzeugt das Projektierungstool das sogenannte Prozessdatenabbild mit allen benötigten Prozessdatenobjekten (PDO) und bildet diese dann über Gruppierungsalgorithmen nach wirtschaftlichen, geometrischen und technischen Gesichtspunkten auf Klemmen, Stromversorgungen, Koppler und Antriebsverstärker ab. Informationstechnisch gesehen, findet damit eine „Instanziierung“ benötigter Automatisierungskomponenten statt. Die Baugruppensicht ist nur noch in den Zeichnungen vorhanden.

### 5.1.2 Funktionale Schnittstelle

Mechatronische Baugruppen benötigen für Ihre Funktion Prozessmittel, wie beispielsweise den Kühlschmierstoff. Ein Roboter braucht für Handhabungsaufgaben vielleicht auch einen Greifer, der die Funktionalität „Außenseitiges Greifen eines zylindrischen Werkstückes“ anbietet. Eine Funktionalität wird angeboten oder benötigt, ist also entweder vom Typ „Quelle“ oder „Senke“.

Die bestehenden Abhängigkeiten und Querbeziehungen zwischen den Baugruppen werden durch das verwendete Projektierungstool des Maschinenherstellers berücksichtigt. Kann eine erforderliche Funktionalität durch eine in der Projektierungsliste vorhandene Baugruppe nicht oder nicht ausreichend zur Verfügung gestellt werden, kann eine geeignete Baugruppe automatisiert der Projektierungsliste hinzugefügt oder eine vorhandene durch eine leistungsstärkere ersetzt werden. Die Beschreibung einer

Funktionalität umfasst somit auch Regeln und Rahmenbedingungen. Über diese können vom Projektierungstool Plausibilitätsprüfungen durchgeführt und so die Projektierung abgesichert werden.

Die in den funktionalen Schnittstellen erfassten Querbeziehungen von Baugruppen erfordern bei der realen Maschine zusätzlich mechanische, elektrische, hydraulische oder pneumatische Verbindungen. In den Bau- und Schaltplänen, als auch in den Stücklisten und Dokumentationen werden diese vom Projektierungstool berücksichtigt.

Funktionale Querbeziehungen finden keine Abbildung im Feldbussystem. Ein direktes Ableiten dieser Querbeziehungen aus Feldbusinformationen ist daher nicht möglich. Im Steuerungssystem werden Sensorsignale und Zustände hierfür logisch miteinander verknüpft. Hierauf ist ebenfalls ohne Manipulation des Steuerungssystems kein Zugriff möglich. Die zugrundeliegenden Informationen müssen damit aus der Baugruppenklasse bekannt sein und sollen im Folgenden als „F-Schicht einer Baugruppe“ bezeichnet werden.

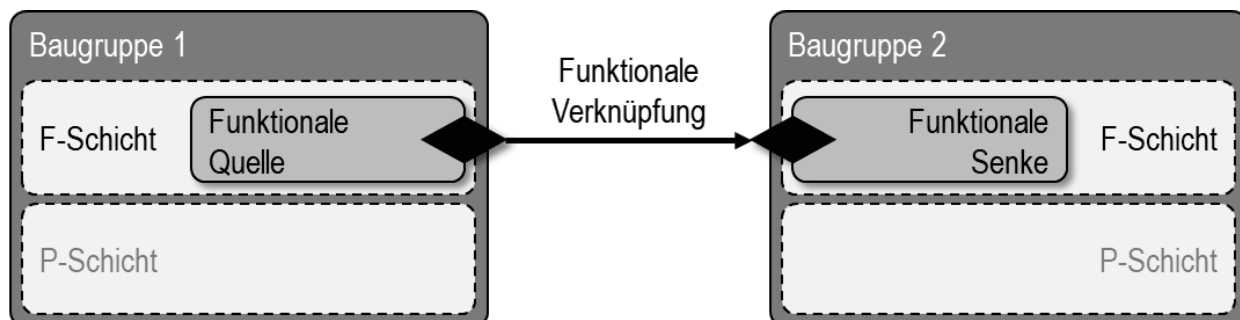


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung von Funktionalitätsbeziehungen zwischen Baugruppen

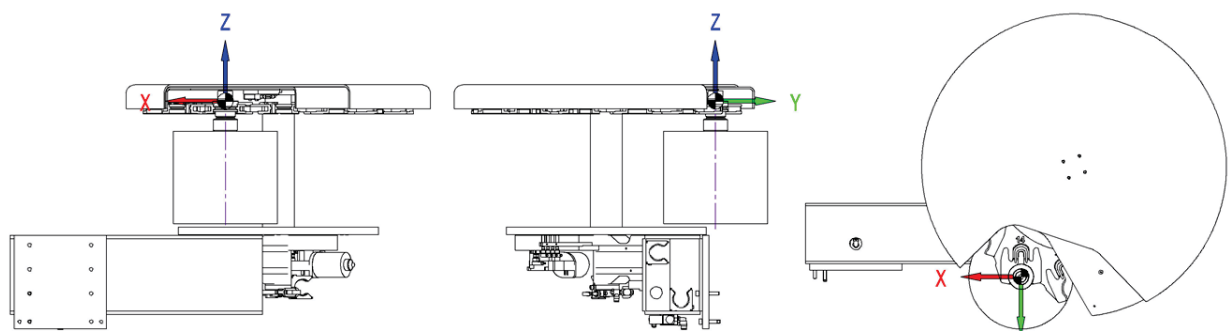
### 5.1.3 Mechanische Schnittstelle

Die mechanische Schnittstelle beschreibt, welche mechanischen Kopplungen die Baugruppe zu Ihrer Umgebung eingehen kann. Im einfachsten Fall ist die mechanische Schnittstelle als Flanschstelle mit definiertem Bohrbild (definierte Anordnung der Bohrungen für die Schraubverbindungen eines Flanschenpaares) ausgeprägt. Die mechanische Schnittstelle kann aber ebenfalls für die Beschreibung temporärer mechanischer Kopplungen genutzt werden, wie z. B. bei Greifsystemen, die eine kraftschlüssige Verbindung eingehen.

Bei der Konstruktion einer mechatronischen Baugruppe wird die mechanische Schnittstelle in einem CAD-System in Form von Verbauungspunkten berücksichtigt. Diese geben an, wo an einer Baugruppe nachfolgende Baugruppen befestigt werden können. Die maximal aufzunehmende Masse, sowie die maximal aufzunehmenden Momente sind bei der Konstruktion der Baugruppe definiert.

In den Daten einer Baugruppenklasse sind diese mechanischen Schnittstellen in der jetzt so genannten „M-Schicht“ beschreiben.

Die Konstruktion einer mechatronischen Baugruppe setzt einen Konstruktionsnullpunkt voraus, welcher im Folgenden als „KN0“ bezeichnet werden soll und der nicht identisch mit den Verbauungspunkten sein muss. Von diesem ausgehend, werden sämtliche Bauteile mit Position und Orientierung referenziert. KN0 ist herstellerspezifisch, wird aber meist so gewählt, dass er der Funktion der Baugruppe am ehesten dienlich ist. Die KN0 folgen also der funktionalen Sicht auf die Konstruktion. In Abbildung 5-3 ist die Konstruktionszeichnung eines Werkzeugwechselsystems dargestellt, welche dies verdeutlichen soll. KN0 befindet sich am Abholplatz des Werkzeugs – dieser Punkt ist für das Steuerungssystem von großer Bedeutung, da das automatisierte Wechseln des Werkzeuges genau diesen Punkt zur Aufnahme bzw. Abgabe des Werkzeugs nutzen wird. Bei Spindeln wäre ein Konstruktionsnullpunkt an der Werkzeugaufnahme, bei Aggregaten am Arbeitspunkt sinnvoll.



Quelle Konstruktionszeichnung: Homag GmbH

**Abbildung 5-3:** Konstruktionszeichnung eines Werkzeugwechselsystems mit hervorgehobenem Konstruktionsnullpunkt KN0

Zur Erstellung eines Maschinenaufnisses einer modularen Maschine oder Anlage müssen nun alle benötigten Baugruppen miteinander kombiniert werden. Um den Vorteil der Austauschbarkeit zu erhalten, werden die Baugruppen allerdings nur als Referenz

## 5 Konzeption

in den Maschinenaufriß integriert. Der Maschinenaufriß enthält dann ein die Struktur der Gesamtmaschine beschreibendes Punkte-, Linien- oder auch Flächengerüst an welchem die einzelnen Baugruppen mit ihrem „KN0“ aufgehängt sind (vgl. Abbildung 5-4). In CAD-Systemen ist diese Art der Modellierung als „Skelett-“ oder „Strukturmodell“ (List 2017), in Fachliteratur auch oft als „Design in context“ (DiC) bekannt. Dabei muss beachtet werden, dass sich die im Bild gezeichneten roten Verschiebungsvektoren nicht unmittelbar an den mechanischen Schnittstellen orientieren und so geometrische Lücken zwischen Komponenten entstehen können.

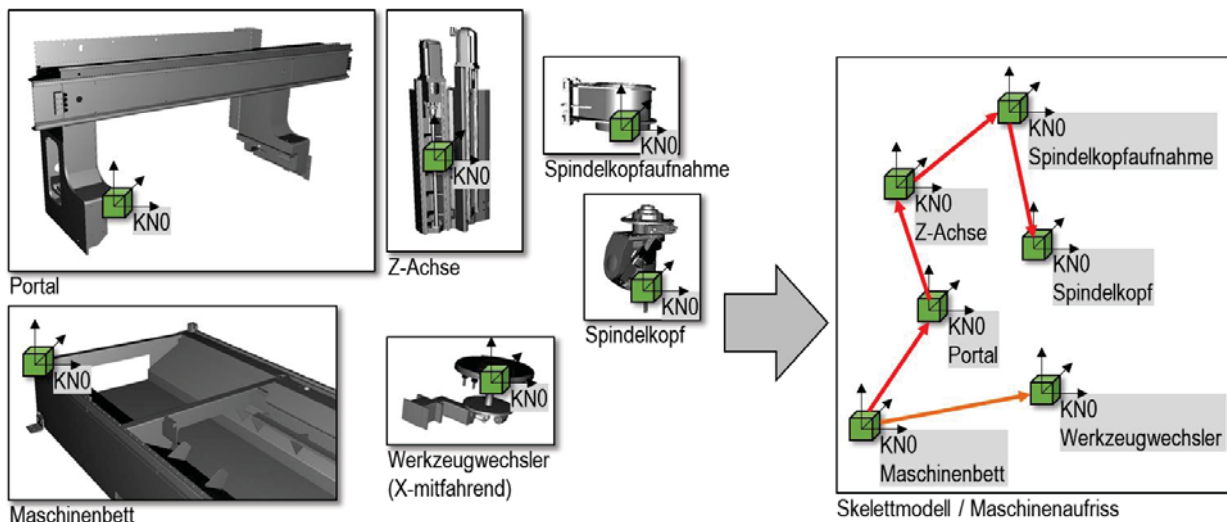


Abbildung 5-4: Skelettmodell eines Maschinenaufrißes

Durch die Möglichkeit Skelettmodelle hierarchisch ineinander zu integrieren (vom Hauptskelett zum Baugruppen-Skelett und von Baugruppen-Skelett zu den Bauteilen), entstehen klar strukturierte, hierarchisch aufgebaute Maschinenaufriße. Vorteil dieser Art der objektorientierten Konstruktion ist, dass für die Funktion der Maschine oder Anlage wichtige Referenzpunkte im Skelettmodell stets fixiert definiert sind. Spätere Änderungen in den einzelnen Baugruppen während der Entwicklungsphase der Gesamtmaschine können so automatisiert aktualisiert werden, ohne dass sich diese Referenzpunkte verschieben. Das Arbeiten mit mehreren Konstrukteuren an unterschiedlichen Baugruppen einer Maschinenkonstruktion, aber auch der Austausch einer Baugruppe gegen eine alternative Baugruppe lässt sich so realisieren.

Das Skelettmodell selbst kennt keine Freiheitsgrade, sondern fixiert die einzelnen Baugruppen mit ihrem KN0 an einem festgelegten Punkt im Raum. Die Freiheitsgrade einer Baugruppe sind damit Bestandteil der Baugruppe selbst. CAD-Systeme kennen

jedoch keine Achsen oder Gelenke, sondern können lediglich Flächen, geometrische Achsen oder Punkte über geometrische Bedingungen (Kongruenzbedingung, Kontaktbedingung, Offsetbedingung, Winkelbedingung) miteinander verknüpfen (Wünsch et al. 2016; List 2017) und die zugehörigen CAD-Geometrien so zueinander positionieren. Eine dieser CAD-Geometrien ist die primäre Geometrie, welche durch volldefinierte Bedingungen (X-, Y-, Z-Richtung gesperrt) zu KN0 fixiert ist.

Durch die Definition der geometrischen Bedingung werden Freiheitsgrade der einzelnen CAD-Geometrien gesperrt. Eine Achse oder ein Gelenk zeichnet sich also dadurch aus, dass die entsprechende Bewegungsrichtung nicht durch eine geometrische Bedingung gesperrt ist. Eine explizite Definition eines kinematischen Freiheitsgrades findet also nicht statt. Dies bedeutet, dass die sogenannte „kinematische Kette“, die sich durch die Definition und Verknüpfung mehrerer Achsen und Gelenke ergibt, nicht explizit definiert ist.

Die genannten „Lücken“ zwischen den Baugruppen und ihren Verbauungspunkten werden im Aufbau der Maschine durch maschinenspezifische „Adapterstücke“ geschlossen, welche leicht in der mechanischen Werkstatt individuell anzufertigen sind. Dies ist von Vorteil, da sich so leicht Fertigungstoleranzen ausgleichen lassen und sich in einer kinematischen Kette die Fertigungsfehler nicht aufaddieren. Der Einsatz solcher Adapterstücke wird jedoch nicht in der Kommissionierungsliste der Maschine vermerkt, sodass die Konstruktionsdaten der Gesamtmaschine bzw. -Anlage unvollständig sind, weil implizites Wissen der Mechaniker genutzt wird. Ein Informationsrückfluss in die Konstruktionsabteilung findet üblicherweise nicht statt.

#### **5.1.4 Energetische Schnittstelle**

Die energetische Schnittstelle beschreibt, wie die Baugruppe mit der benötigten Energie z. B. in elektrischer, pneumatischer, hydraulischer oder mechanischer Form zu versorgen ist.

Abstrakt gesehen benötigen mechatronische Baugruppen Energie genauso wie Prozessmittel zur Funktionserfüllung. Elektrische Energie mit einer Spannung von 24 V setzt die Baugruppe „Netzteil mit 24 V Ausgangsspannung“ und einer passenden Leistungsführung voraus. Es handelt sich bei der energetischen Schnittstelle also auch um

Abhängigkeiten und Querbeziehungen zwischen Baugruppen, die durch das verwendete Projektierungstool des Maschinenherstellers berücksichtigt werden. Durch die Gleichartigkeit mit der Betrachtung der „funktionalen Schnittstellen“ für den Engineeringprozess und aus der Tatsache, dass die zugrundeliegenden Informationen sich auch aus der Baugruppenklasse ableiten lassen müssen, werden die Informationen der „F-Schicht einer Baugruppe“ zugeordnet.

### 5.1.5 Kompatibilität von Baugruppen

Weder Wurst noch Kircher sehen vor, dass sich Baugruppen gegenseitig bedingen oder ausschließen. Eine Untersuchung bei Holzbearbeitungsmaschinen zeigt, dass dies jedoch praxisrelevant ist, da beispielsweise geometrische Einschränkungen den gleichzeitigen Einsatz zweier Baugruppen unmöglich machen, und deshalb vom Projektierungstool berücksichtigt werden müssen. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn über vordefinierte Flanschstellen bei einer Portalmaschine mitfahrende Baugruppen (z. B. ein Werkzeugwechsler) sowie stationäre Baugruppen am Maschinentisch (z. B. ebenfalls ein Werkzeugwechsler) projiziert werden können und durch das Verfahren des Portals der von der mitfahrenden Baugruppe eingenommene Bauraum den der stationären Baugruppe schneidet.

Diese Informationen sind somit auch relevant und beschreiben Querbeziehungen zwischen MU. Für sie wird die „**C-Schicht**“ definiert.

### 5.1.6 Zusammenfassung

Vorhergehend wurden der Bausteinklasse vier Beschreibungsschichten zugeordnet.

- Die **P-Schicht** beschreibt das Bedürfnis von Steuerungs-Ein- und -Ausgängen (PDO) der MU sowie deren Örtlichkeit (Schaltschrank, Komponente, usw.). Außerdem ist der Typ des E/A (24V/400V, Nieder-/Hochstrom) festgelegt.
- Die **F-Schicht** stellt die funktionale Beschreibung der MU dar. Eine MU kann beliebig viele (1..n) Funktionen umfassen, welche entweder vom Typ „Quelle“ oder „Senke“ sind.

- Die **M-Schicht**, die mechanische Flansch- oder Verbauungspunkte der Baugruppe beschreibt.
- Die **C-Schicht**, die Kompatibilitäten zwischen Baugruppen beschreibt.

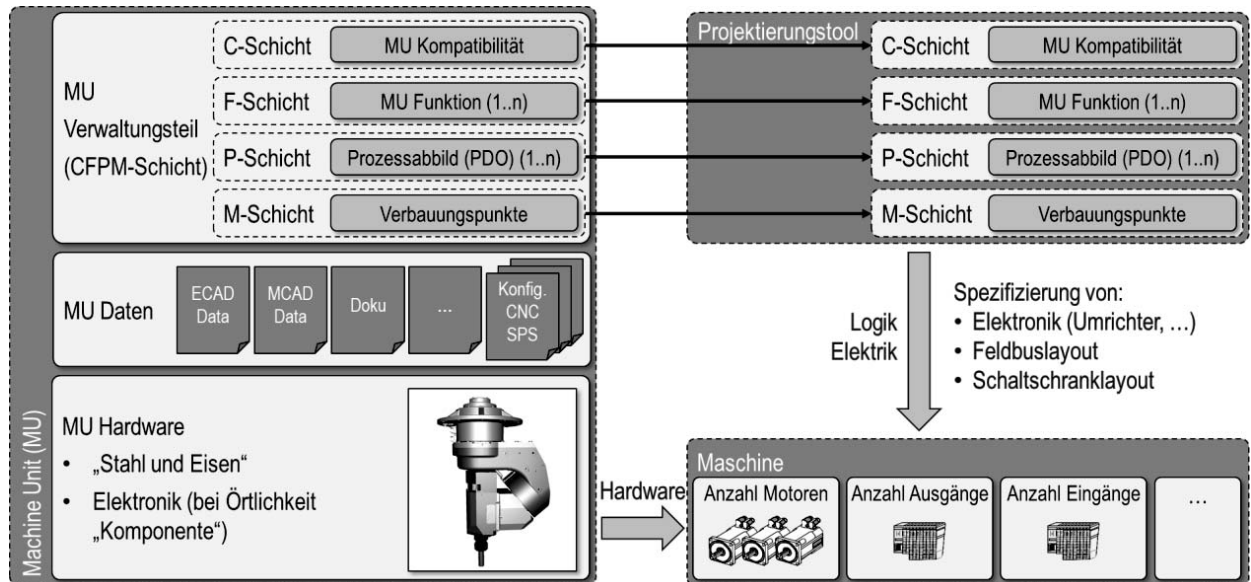


Abbildung 5-5: Projektierungsablauf mit Unterstützung der CFPM-Schicht

Im Folgenden sollen Informationen zur Beschreibung von Querbeziehungen als „CFPM-Schicht“ geführt werden.

## 5.2 Einführung virtueller Baugruppen

Spezifische Informationen für den Aufbau eines Verhaltens- und Geometriemodells einer virtuellen Baugruppe (VU, engl. „Virtual Unit“) entsprechen bei der realen Baugruppe den in Abbildung 5-5 genannten und werden so nach Kapitel 0 und dem Wiederverwendungsansatz von Röck bereits verwendet. Die Modellierung der Querbeziehungen zwischen den Verhaltensbausteinen verlangen jedoch einen hohen maschinenspezifischen Aufwand. Anhand der in Kapitel 5.1.6 eingeführten CFPM-Schicht soll nun eine Untersuchung für die Verwendung zu Verkopplung von VU vorgenommen werden.

### 5.2.1 Bedeutung der P-Schicht für die VU

Für die reale Maschine liest das Projektierungstool die P-Schichten aller in der Maschine vorgemerakter Baugruppen aus und kombiniert diese, unter Berücksichtigung der Örtlichkeit eines PDO, zu einer globalen P-Schicht (vgl. Kapitel 5.1.1). Hierbei wird die Gruppierung der PDO in Baugruppen aufgelöst: Die Maschine wird hinsichtlich der Feldbushardware monolithisch.

Die virtuelle Maschine hingegen behält die Baugruppensicht bei: Alle PDO einer Baugruppe sind in der P-Schicht der Baugruppen-Klasse hinterlegt. Diese ist per Definition identisch mit der P-Schicht der realen Baugruppe. Die Instanziierung einer virtuellen Baugruppe bedingt daher, dass die Zuordnung der PDO zu Speicherbereichen im Prozessdatenabbild des Feldbussystems bekannt ist. Diese Information ist nur in der vom Projektierungstool kommissionsspezifisch erstellten globalen P-Schicht vorhanden. Im selben Schritt wird durch das Projektierungstool die notwendige Feldbushardware (Hardware-Typ, Version der Firmware, ...) definiert. Mit diesen beiden zusätzlichen Informationsquellen lässt sich die virtuelle Baugruppe mit dem Feldbussystem korrekt verbinden.

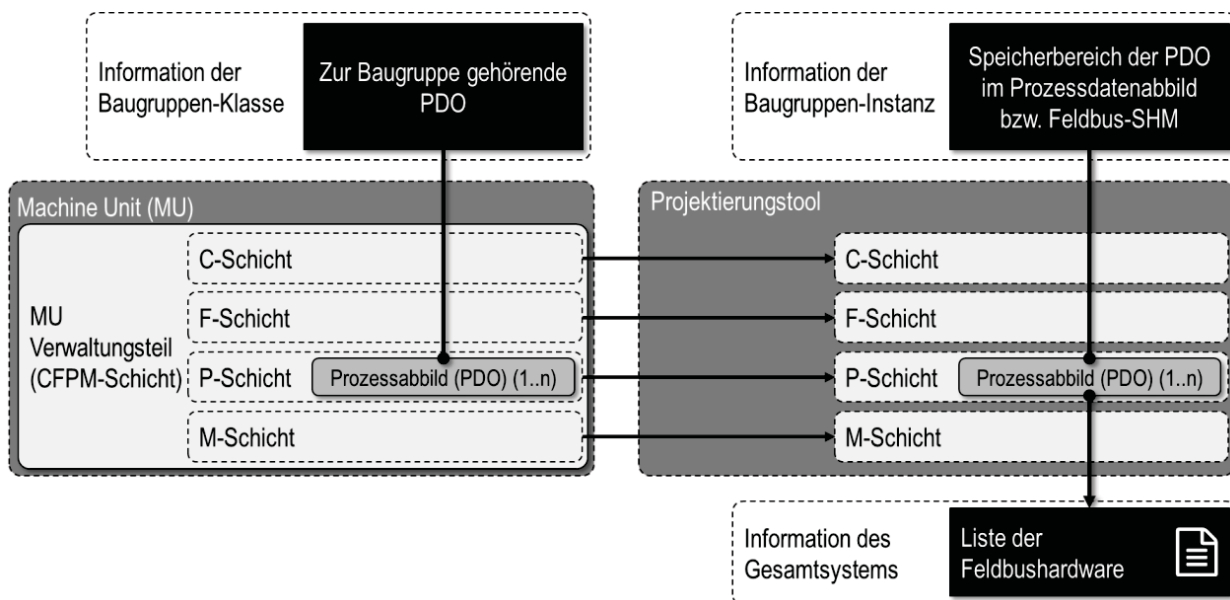


Abbildung 5-6: Notwendige Informationen aus den P-Schichten für die Erstellung der virtuellen Baugruppe

Für die Modellierung des Verhaltensmodells (BU) bedeutet dies, dass sie dem aus der Informatik bekannten „EVA“-Modell (Dausmann et al. 2011) folgt. Die Abkürzung leitet

sich aus den ersten Buchstaben der Begriffe „Eingabe“, „Verarbeitung“ und „Ausgabe“ ab. Wichtig bei dieser Art der Betrachtung ist der Aspekt, dass dem Verhaltensmodell eine klar definierte und damit festgelegte neutrale kommunikative Schnittstelle nach Außen zugewiesen wird. Es wird als „Black-Box“ mit fest definierten PDO gesehen. Bei dieser Sichtweise, ist die innere Struktur unbekannt und nur das äußere Verhalten soll betrachtet werden. Die PDO sind mit klassenspezifischen Namen benannt. Üblicherweise werden hierfür auch Betriebsmittelkennzeichen (BMK) verwendet, welche Platzhalter für die Anpassung der P-Schicht an eine konkrete Maschine beinhalten.

Um die Wiederverwendbarkeit und Instanzierbarkeit einer virtuellen Baugruppe zu ermöglichen, bietet es sich an, die P-Schicht dieser virtuellen Baugruppe als neutrale Trennschicht zwischen dem Verhaltensmodell und der Kommunikation mit dem Steuerungssystem zu konzipieren (vgl. Abbildung 5-7). Diese Trennschicht verbindet die maschinenspezifischen PDO des Feldbus-SHM mit den PDO der virtuellen Baugruppe.

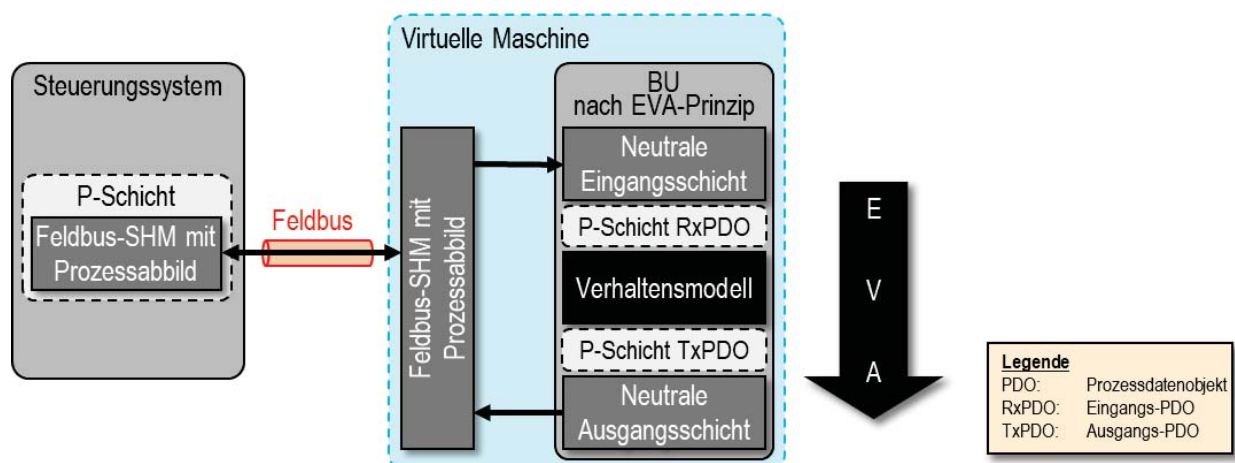


Abbildung 5-7: Modellierung nach dem EVA-Prinzip, nach (Scheifele et al. 2016a), unter Berücksichtigung der P-Schicht

Das Geometriemodell (GU) kommuniziert nicht mit dem Steuerungssystem, sondern erhält seine Soll-Daten, wie z. B. die Achspositionen vom Verhaltensmodell. Die P-Schicht wird daher nicht in der GU modelliert.

### 5.2.2 Bedeutung der Daten der F-Schicht für die VU

Die in der funktionalen Schnittstelle erfassten Querbeziehungen von Baugruppen erfordern bei der realen Maschine zusätzliche mechanische, hydraulische oder pneumatische Verbindungen. Das Projektierungstool für die reale Maschine hat bei der Erstellung der Kommissionierungsliste auf eine ausreichende Dimensionierung der Funktionalitätsquellen geachtet. Darauf vertrauend werden im virtuellen Modell deshalb tiefgehende physikalische Modellierungen aus Aufwandsgründen vermieden: man geht davon aus, dass eine mit einer Senke verbundene Quelle immer ausreichend leistungsfähig ist, die genutzt wird, sobald eine Verbindung hergestellt ist.

Der Unterschied zwischen der F-Schicht der realen Baugruppe und der F-Schicht der virtuellen Baugruppe besteht nun darin, dass im Verhaltensmodell (BU) der virtuellen Baugruppe unter Umständen zusätzliche Querverbindungen benötigt werden, was von der genutzten Modellbibliothek abhängt.

Findet z. B. der Materialfluss einer Maschine über unterschiedliche Förderbänder statt – jedes dieser Förderbänder stellt eine Baugruppe dar – so ist es in der realen Welt ausreichend, diese Förderbänder über ihre mechanische Schnittstelle miteinander zu verbinden. Das Fördergut fließt, bedingt durch physikalische Gesetze, von einem Förderband zum nächsten.

In der virtuellen Welt kann ein solcher Materialfluss durch physikalische oder aber auch durch logische Modellbibliotheken modelliert werden. Die Entscheidung für die eine oder andere Variante hängt auch von der zur Verfügung stehenden Rechenzeit und der notwendigen Genauigkeit der Simulation ab (Hoher 2016).

Wird ein Materialfluss physikalisch abgebildet, so genügt es die mechanische Verbindung der Förderbänder zu modellieren. Durch Berechnung der auf das Fördergut wirkenden physikalischen Effekte „fällt“ das Fördergut am Ende eines Transportabschnittes wie in der Realität auf den folgenden Abschnitt und wird dann über Reibungskräfte dort weitertransportiert. Der Materialfluss über die gesamte Transportstrecke ergibt sich also automatisch. Die F-Schichten der realen und der virtuellen Baugruppe unterscheiden sich damit nicht voneinander und besitzen keine explizite Querverbindung im Modell.

Wird an die Simulation die Anforderung gestellt auch den Materialfluss im Steuerungstakt (oft ca. 1 ms) zu berechnen, so stößt der physikalisch modellierte Materialfluss schnell an die Rechenkapazitätsgrenze. Spielt die physikalisch korrekte Simulation des Materialflusses nur eine untergeordnete Rolle, da beispielsweise durch die Konstruktion der Materialflusselemente das Fördergut geführt und damit z. B. konstruktiv ein Verdrehen und Verkeilen ausgeschlossen ist, wird eine auf Logik basierende Materialfluss-Modellbibliothek eingesetzt. Diese beschreibt ein transportiertes Teil während des Transportes als Teil des Fördersystemabschnittes. Erreicht das Teil das Ende des Abschnittes, wird es aus dem zugehörigen Modellteil „gelöscht“ und neu in den Modellteil des folgenden Transportabschnittes eingetragen. Bei diesen logischen Modellbibliotheken wird also das Fördergut logisch von einem Förderband auf das nächste übergeben. Dadurch werden funktionale Querverbindungen für die Übergabe des Fördergutes zwischen den Förderbändern notwendig. Die virtuelle F-Schicht besteht somit aus den Informationen der realen F-Schicht, zuzüglich der Definition weiterer funktionaler Ein- und Ausgängen, welche modellbibliotheksspezifisch sind. Im Falle des Materialflusses ist also die Information notwendig, auf welches Förderband das Fördergut wechselt. Diese Information könnte der M-Schicht entnommen werden, wenn die Förderbänder mechanisch verbunden sind. Wenn dies nicht der Fall ist, die Verkettung der Bänder also auch nicht im Skelettmodell auftaucht, ist ein Blick in das CAD-Projekt notwendig, um dieses Informationsdefizit zu beheben.

Weitere Beispiele für die Notwendigkeit zusätzlicher Informationen sind das Werkzeughandling - hier wird das Werkzeug vom Werkzeugwechsler an die Spannzange an der Spindel übergeben – oder auch das Anbinden von Sensorik-Baugruppen an Baugruppen. Wird in der realen Maschine eine Näherungsschalter-Baugruppe an einer Achse angebracht, so wird der Sensor bei Näherung des Achsschlittens bedämpft und er wird den Signalpegel ändern.

In der virtuellen Maschine verzichtet man auf die physikalische Modellierung der elektrischen Vorgänge. Es reicht aus zu wissen, ob die Position des Schlittens in der Realität ein positives oder ein negatives Binärsignal zu Folge haben soll und ob die Geberleitung funktioniert oder gestört ist. Im Modell wird dazu die Position des Achsschlittens mit der Position des Näherungsschalters verglichen. Liegen beide Positionen innerhalb einer vorgegebenen Toleranz, so löst der virtuelle Näherungsschalter

aus. Es ist somit eine funktionale Querbeziehung – nämlich die Achsschlittenposition – zwischen den beiden Baugruppen auszutauschen (vgl. Abbildung 5-8).

Da das Verhalten einer Komponente ausschließlich in der BU berechnet wird, besitzt auch nur dieses eine F-Schicht. Über eine modellinterne Kommunikation werden die Komponenten der BU mit ihren Gegenstücken im Geometriemodell (GU) so verknüpft, dass das Verhalten der Komponenten simuliert werden kann. Eine Abbildung der F-Schicht in der GU findet nicht statt.

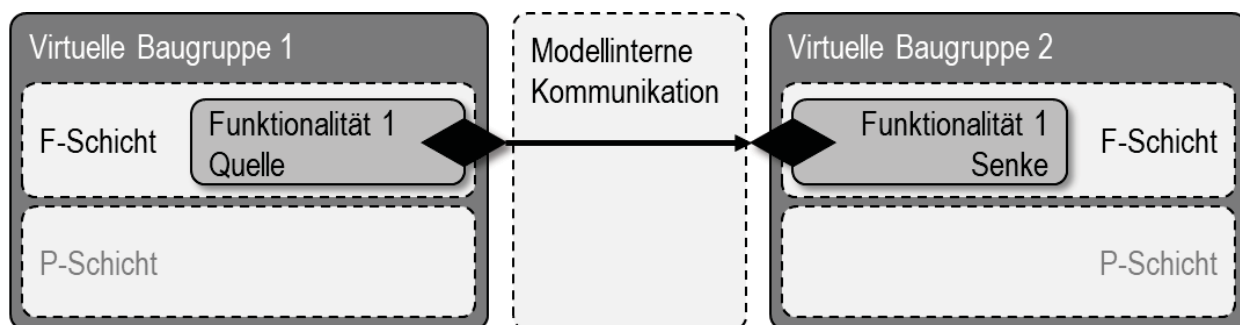


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Abbildung von Funktionalitätsbeziehungen zwischen virtuellen Baugruppen

### 5.2.3 Bedeutung der Daten der M-Schicht für die VU

Das für die mechanische Konstruktion genutzte Skelettmodell, welches in Kapitel 5.1.3 vorgestellt wurde, ist eine statische Definition der Positionierung und Orientierung von Baugruppen im Raum, referenziert auf einen globalen Nullpunkt, der meist zugleich der Maschinennullpunkt ist: Kinematische Achsen und damit auch kinematische Ketten und Freiheitsgrade werden nicht explizit beschrieben. Die reale Maschine benötigt dies auch nicht, beispielsweise ergibt sich die Bewegung des sogenannten Tool-Center-Points (TCP) einer Werkzeugmaschine zwangsläufig durch die physikalischen Gesetze. Weil mit der aktuell verfügbaren Rechenleistung diese physikalischen Grundgesetze im Steuerungstakt nicht abbildbar sind, kommen in den Modellen der virtuellen Maschine vereinfachend die Mathematik der kinematischen Kette zur Anwendung um die Bewegung des genannten TCP abzubilden. Die einzelnen Achsen besitzen dazu eine auf das Weltkoordinatensystem bezogene festgelegte Ausgangsposition und – Orientierung im Raum. Durch die Verknüpfung der Achsen miteinander entsteht die kinematische Kette. Eine sich durch Antreiben der Achse ändernde Positionierung

(translatorische Achse) oder Orientierung (rotatorische Achse) der Achse hat nun unmittelbar eine Auswirkung auf die Position und Orientierung der in der kinematischen Kette nachfolgenden Achsen.

In der Robotik ist diese Form der Darstellung als Denavit-Hartenberg-Notation bekannt, die für die Berechnung der Vorwärts- und Rückwärtstransformation für das Steuerungssystem genutzt wird (Bartenschlager et al. 1998; Roddeck 2016). Sie gilt mittlerweile in der Robotik als Standardverfahren. Abbildung 5-9 stellt beispielhaft zwei kinematische Beschreibungen nach Denavit-Hartenberg dar. Kinematik a) beschreibt einen 6-Achsigen Knickarmroboter, bei welchem alle Achsen hintereinandergeschaltet sind und Kinematik b) beschreibt einen Aufbau aus zwei Bewegungsgruppen mit einer kinematischen Kette aus jeweils 3 Achsen.

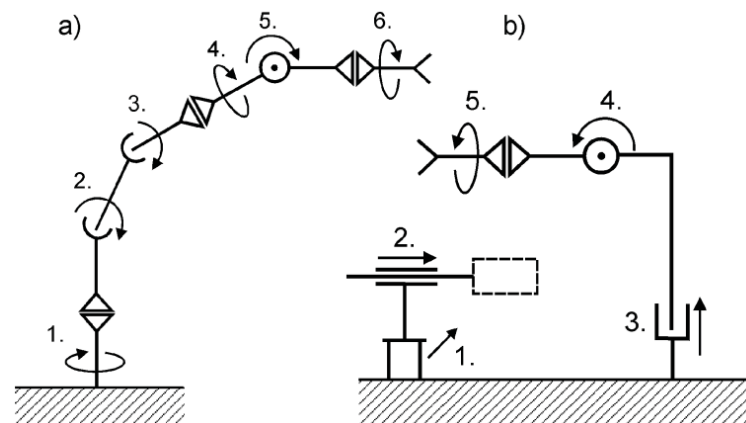


Abbildung 5-9: Beschreibung einer kinematischen Kette in Denavit-Hartenberg-Notation (Roddeck 2016)

Für die virtuelle Maschine sind die Verbauungspunkte der Baugruppen wichtig, um die Gesamtgeometrie der Maschine zu berechnen und die kinematische Kette, um Bewegungen darstellen zu können. Verbauungspunkte sind nicht identisch mit den Konstruktionsnullpunkten KN0 des Skelettmodells, sind aber im Skelettmodell der Baugruppe darauf referenziert. Beim Zusammenbau der Maschine werden die Verbauungspunkte „mit implizitem Wissen“ so verbunden werden, dass die Konstruktionsnullpunkte KN0 der Baugruppen im Sollmaß zu liegen kommen.

Für den Aufbau und Austausch von 3D-Werkzeugmaschinenmodellen auf Grundlage von Merkmalen bieten die Normen DIN 4000-210 und die darauf aufbauende DIN 4003-210 eine geeignete Vorschrift: Baugruppen werden auf der Maschinenbasis über

Andockkoordinatensysteme positioniert. Jede Baugruppe muss hierfür zwei Koordinatensysteme besitzen, wovon eines maschinenseitig (MCS, engl. Mounting Coordinate System) und eines werkstückseitig (CSW, engl. Coordinate System Workpiece Side) ist (vgl. Abbildung 5-10). Der Aufbau einer Maschine bzw. Anlage kann so modular erfolgen.

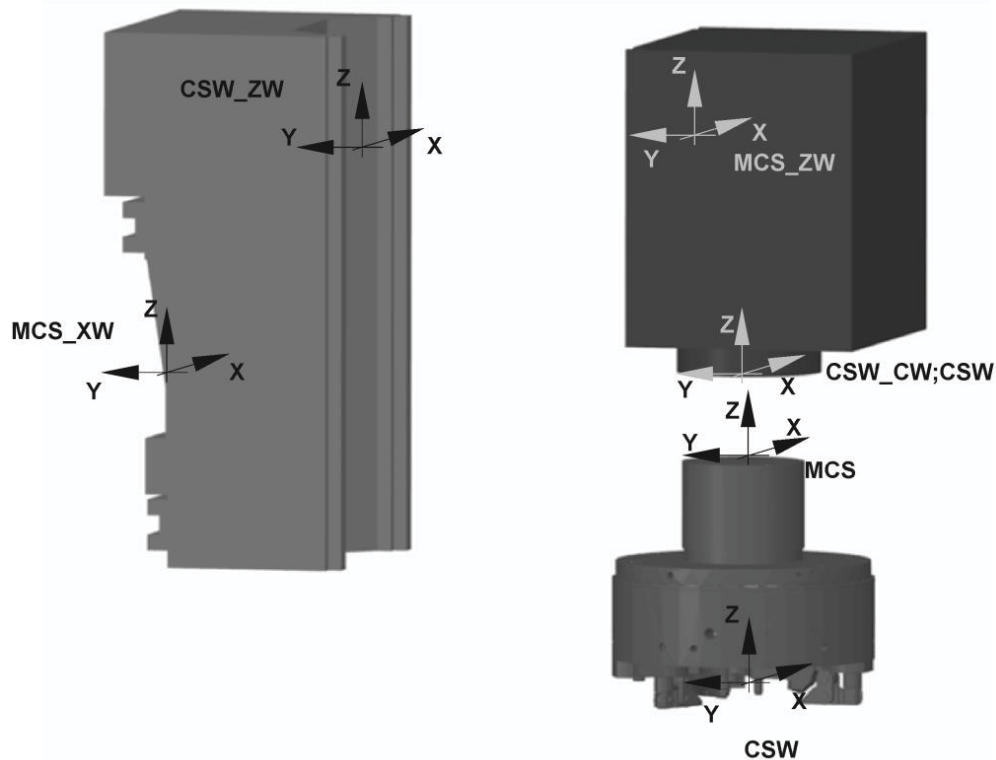


Abbildung 5-10: Montagekoordinatensysteme von drei Maschinenunterbaugruppen, (DIN 4003-210)

Im Verhaltensmodell (BU) und dem Geometriemodell (GU) der virtuellen Maschine werden Verknüpfungspunkte bzw. Andockkoordinatensysteme als „Docking Element“ (DE engl. für „Andockelement“) dargestellt (Scheifele et al. 2016c). Das primäre Docking Element (DE0) stellt den Punkt dar, an welchem die Baugruppe logisch an eine vorhergehende Baugruppe befestigt wird. Von DE0 aus führt ein Verknüpfungsvektor entweder direkt zu einem DE oder zu einem Kinematikelement, von dem ein oder mehrere Verknüpfungsvektoren zu einem oder mehreren DE weiterführen. Alle Verknüpfungsvektoren einer Baugruppe bilden das Skelettmodell der Baugruppe. Die „ausgangsseitigen“ Docking Elemente werden mit „DE1..n“ bzw. zur leichteren Zuordnung und Typisierung mit „DE\_<Text>“ bezeichnet.

Sämtliche Geometrien werden auf die entsprechenden DE referenziert. In Abbildung 5-11 ist das so entstehende Skelettmodell für zwei Baugruppen, sowie deren Verknüpfung dargestellt. Der sechsdimensionale Verknüpfungsvektor „ $v$ “ zwischen Baugruppe1.DE1 und Baugruppe2.DE0 ist typischerweise ein Nullvektor, d. h. die absolute Position und die Orientierung im Raum der beiden DE fallen zusammen. „Geometrien“ sind die referenzierten CAD-Geometriedaten bezeichnet.

In manchen Anwendungsfällen ist es jedoch von Vorteil, wenn ein Verbauungspunkt nicht in allen Achsen definiert ist. Dies könnte z. B. bei einer auf DE1 der Baugruppe 1 montierten Schiene der Fall sein. Diese erlaubt es, die Baugruppe 2 bei der Montage in Schienenrichtung auszurichten. In diesem Fall ist der Verknüpfungsvektor „ $v$ “ zwischen Baugruppe1.DE1 und Baugruppe2.DE0 kein Nullvektor. Gerade bei der Positionierung einer Sensorik-Baugruppe 2 ist dies von Vorteil, da dort DE0 fest bleibt.

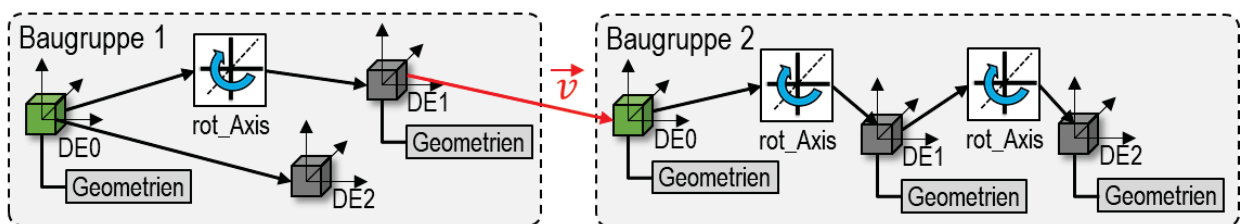


Abbildung 5-11: Skelettmodell beispielhaft auf virtuellen Baugruppen angewandt

Werden sämtliche Baugruppen derart modelliert, so lässt sich aus einer Baugruppenliste, sowie einer Beschreibung der Verknüpfung der Baugruppen untereinander, über die Skelettmethode die Gesamtmaschine generieren (Scheifele et al. 2016c). Auch die kinematische Kette entsteht automatisch. Abbildung 5-12 stellt dies am Beispiel des Werkzeugwechslers dar. Aus der CAD-Zeichnung werden die Verknüpfungspunkte ausgehend vom Konstruktionsnullpunkt KN0 bestimmt. Nach Importieren der Geometrien in das Simulationstool wird die Baugruppe dann in logische Unterbaugruppen aufgeteilt. An den Verknüpfungsstellen der Unterbaugruppen entstehen die DE. Kinematikelemente werden ebenfalls so eingetragen.

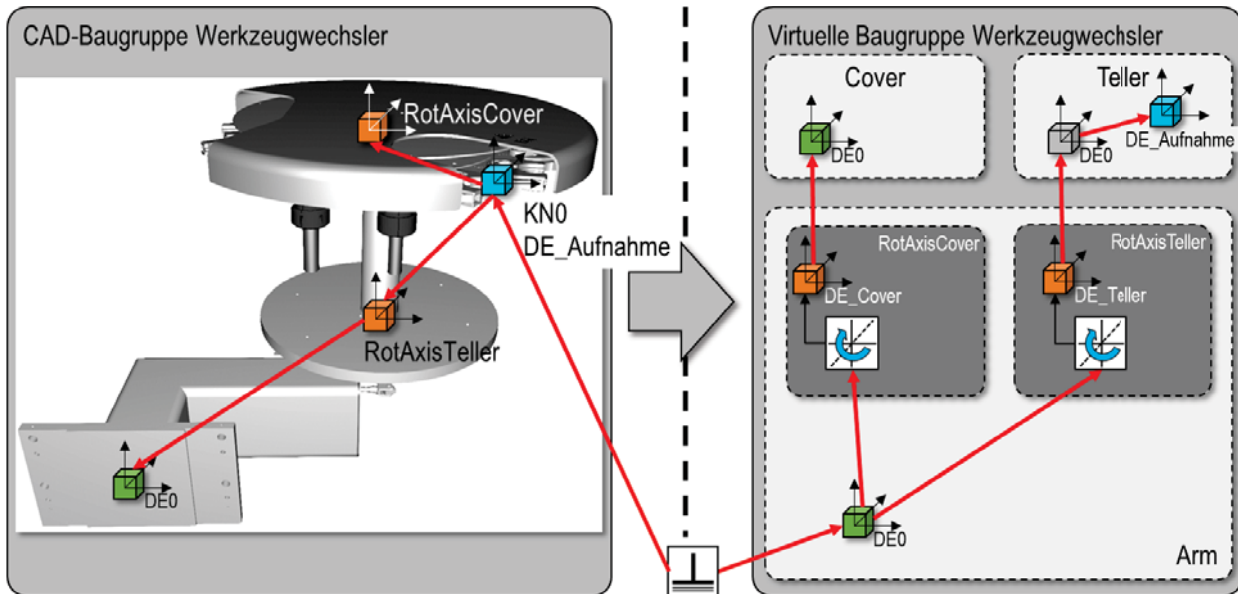


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der Transformation der CAD-Baugruppe in ein Skelettmodell der virtuellen Baugruppe

Werden nun alle Baugruppen der virtuellen Maschine auf diese Weise modelliert, so lässt sich die virtuelle Maschine auf Baugruppenbasis individuell aus wiederverwendbaren virtuellen Baugruppen zusammenstellen. Abbildung 5-13 stellt dies exemplarisch dar.

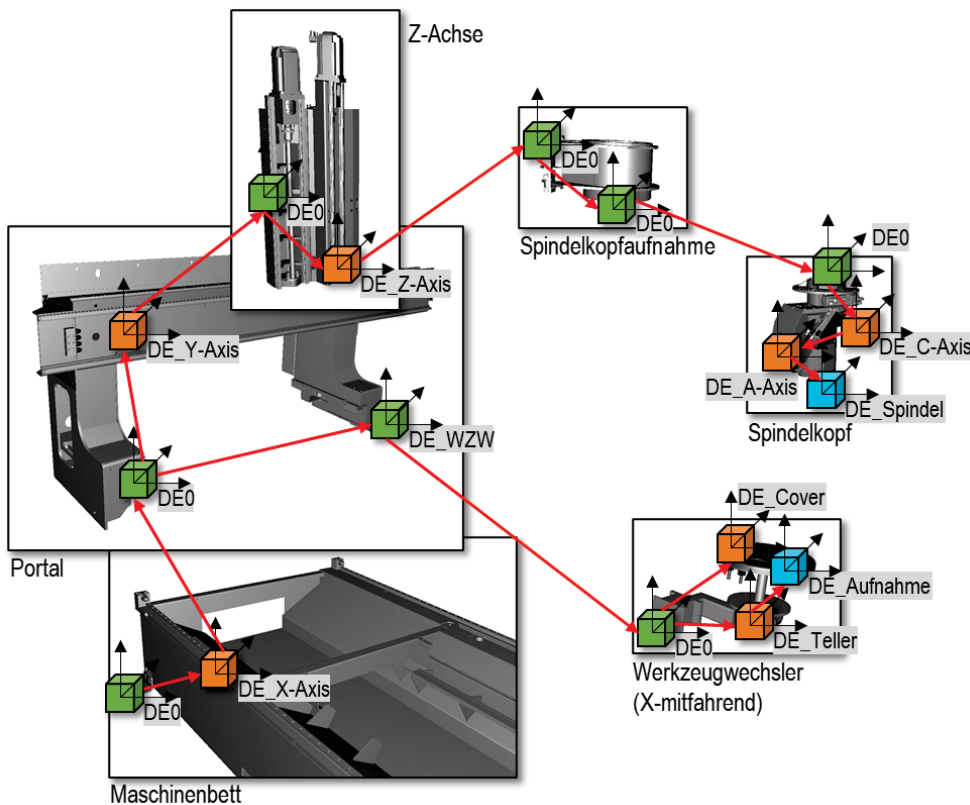


Abbildung 5-13: Aufbau einer virtuellen Maschine mit der Skelettmethode

### 5.2.4 Bedeutung der Daten der C-Schicht für die VU

Die C-Schicht definiert, ob eine Baugruppe eine andere ausschließt oder bedingt (vgl. Kapitel 5.1.5). Diese wird ausschließlich vom Projektierungstool genutzt. Soll die virtuelle Maschine die Projektierung überprüfen, so muss gewährleistet sein, dass auch die C-Schichten der in der virtuellen Maschine genutzten Baugruppen zugreifbar sind. Da die virtuellen Baugruppen per Definition den realen Baugruppen entsprechen, sind die C-Schichten identisch.

### 5.2.5 Zusammenfassung

Eine virtuelle Baugruppe leitet sich aus der entsprechenden Baugruppenklasse mit den vorgegebenen PDO ab. Ihr Instanzname ist in der Kommissionierungsliste ebenso wie die maschinenspezifischen BMK der PDO festgelegt. Die physikalischen Adressen der PDO sind im Prozessdatenabbild festgelegt, welches das Projektierungstool erzeugt. Damit ist die P-Schicht der virtuellen Baugruppe vollständig definiert.

Die Betrachtung der F-Schicht ergab, dass abhängig von der verwendeten Bibliothek zusätzliche funktionale Querbeziehungen zwischen Baugruppen abgebildet werden müssen. Das Regelwerk zur Abbildung der Querbeziehungen leitet sich aus dem Verhaltensmodell der Baugruppe ab und ist abhängig von den verwendeten Bibliotheken. Häufig muss dazu Rücksprache mit den Maschinenkonstruktoren genommen werden, wenn keine Möglichkeit besteht, diese Informationen selbst dem CAD-Projekt der Maschinenkonstruktion zu entnehmen.

Die Informationen der M-Schicht für die Mechanik sind reduziert, weil implizites Wissen vorausgesetzt wird: in der Kommissionierungsliste fehlen Adapterstücke, die kinematische Kette ist unbekannt. Zum Aufbau der virtuellen Maschine müssen die Informationen zusätzlich zur Kommissionierungsliste verfügbar sein.

Aus der C-Schicht einer Baugruppe leiten sich keine weiteren Konsequenzen für die virtuelle Maschine ab.

### 5.3 Definition einer Kommissionierungsliste

Das Ergebnis der Projektierung einer kundenspezifischen Maschine oder Anlage ist die Kommissionierungsliste (vgl. Kapitel 4.5 „*Projektierung mechatronischer Maschinen und Anlagen*“). Die Kommissionierungsliste ist die Basis für alle weiteren Phasen des Entwicklungsprozesses. Als solche muss diese nun auch für die Erstellung einer virtuellen Maschine genutzt werden.

Die Kommissionierungsliste ist hierarchisch organisiert und beschreibt objektorientiert den Aufbau des Gesamtsystems (vgl. Abbildung 5-14). Sie listet in der ersten Hierarchieebene zunächst die Funktionsbaugruppen auf. Funktionsbaugruppen dienen der Erfüllung einer festgelegten Funktionalität und bestehen aus mechatronischen Baugruppen, sodass sich die folgende Struktur der Kommissionierungsliste ergibt:

$$\text{Baugruppe} \xrightarrow{1..n \ 1} \text{Funktionsbaugruppe} \xrightarrow{1..n \ 1} \text{Gesamtsystem}$$

Anders als in der Darstellung aus Kapitel 4.4 dargestellt, kennt die Kommissionierungsliste die Ebene der Baukastenkomponenten nicht. Als kleinste Einheit nutzt sie die „Baugruppe“.

Für das Verständnis eines Baukastens ist es zudem notwendig, die Begriffe Alternative, Variante und Version voneinander abzugrenzen:

- **Alternativen** entstehen im Verlauf der Lösungsfindung und dienen dazu, durch die Gegenüberstellung möglichst vieler Lösungsmöglichkeiten für eine gegebene Aufgabenstellung, eine möglichst optimale Lösung aufzufinden (Scholz 1989).
- **Varianten** von Baugruppen entstehen durch Diversifikation, das heißt durch die Anpassung einer Lösung an verschiedene Anforderungen. Sie bestehen zeitlich nebeneinander (Spur et al. 1997). Alle Varianten einer Alternative haben die identischen mechanischen Schnittstellen und sind damit ohne Änderung der Umgebung gegeneinander austauschbar.
- **Versionen** entstehen durch die Änderung einer Variante. Sie stellen die Entwicklungsstufen der Variante dar und folgen chronologisch aufeinander. Alle Versionen haben die identischen elektrischen und funktionalen Schnittstellen.

Eine neue Version wird beispielsweise dadurch notwendig, dass sich das Verhalten der Variante ändert. Dies geschieht zum Beispiel durch mechanisches Versetzen eines Endschalters einer Achse.

Eine Funktionsbaugruppe gehört zu einer Funktionsklasse, welche herstellerspezifisch definiert ist. Sie ist varianten- und versionsbehaftet. Es kann somit nicht nur die Zusammensetzung der Funktionsbaugruppe aus Baugruppen (Variante) abgebildet werden, sondern auch der Entwicklungsstand (Version). Im Projekt Föderal wurde für die Benennung der Klasse eine dreistellige Nummer vergeben (Litto et al. 2004), sie kann aber völlig beliebig gewählt werden, solange sie eindeutig ist. Im Folgenden soll diese Klassifizierung ebenfalls verwendet werden, da über die nummerierte Benennung auch eine Instanziierung abgebildet werden kann.

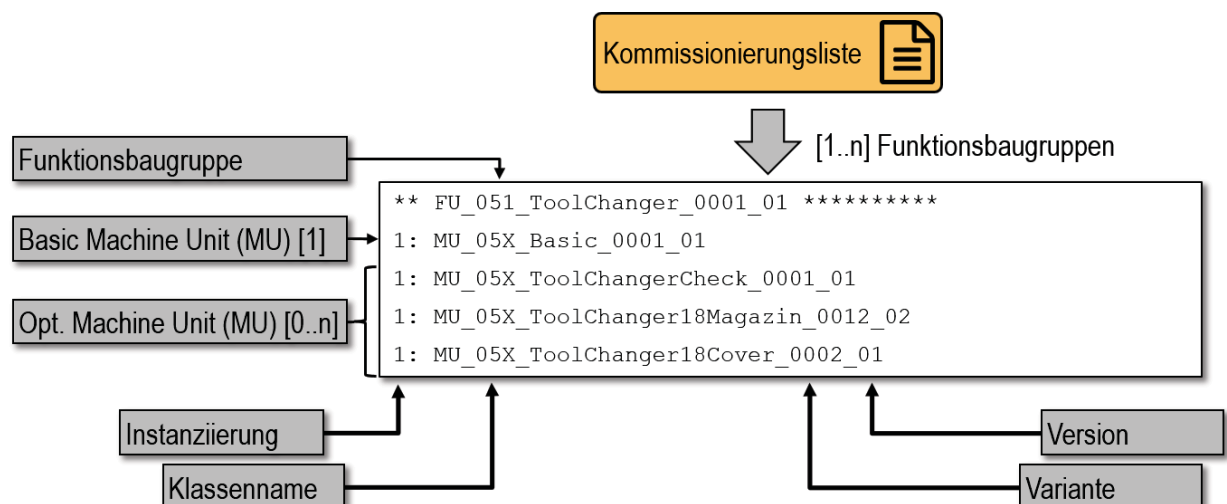


Abbildung 5-14: Aufbau einer Kommissionierungsliste, entwickelt aus (Litto et al. 2004)

Eine Funktionsbaugruppe besteht zunächst immer aus einer Basisbaugruppe, welche die Grundfunktionalität der Funktionsbaugruppenklasse bereitstellt. Ergänzt wird die Funktionsbaugruppe um Optionsbaugruppen, welche die spezifische Ausprägung der Funktionsbaugruppenklasse, sowie optionale Funktionalität hinzufügen. Aus Steuerungssicht kann so standardisiert auf die Grundfunktionalität zugegriffen werden.

Wie die Funktionsbaugruppen sind die Baugruppen auch varianten- und versionsbehaftet. Die Variante definiert den mechanischen und elektrischen Aufbau der Baugruppen aus Einzelkomponenten. Je nach Anwendungsfall kann sich dieser unterscheiden. Über die Versionsnummer wird der Entwicklungsstand festgelegt.

Abhängig vom Maschinen- bzw. Anlagentyp kann eine Funktionsbaugruppenklasse mehrfach verwendet werden. Funktionsbaugruppenklassen, welche für eine Mehrfachverwendung vorgesehen sind, werden daher durch ihre Benennung gekennzeichnet: In Abbildung 5-15 wird die Funktionsbaugruppe „ToolChanger“ nicht als Klasse „050“ benannt, sondern als „05X“. Das „X“ markiert hier die Instanzierbarkeit der Klasse. In der Kommissionierungsliste wird anschließend ein Instanzname vergeben, welcher die Instanznummer enthält. Aus „05X“ wird somit in einer konkreten Maschine bzw. Anlage eine „051“.

Wird die Zusammensetzung der Funktionsbaugruppenklasse durch Änderung der Optionsbaugruppen an einen speziellen Anwendungsfall angepasst, so entsteht eine neue Variante der Funktionsbaugruppenklasse „05X“.

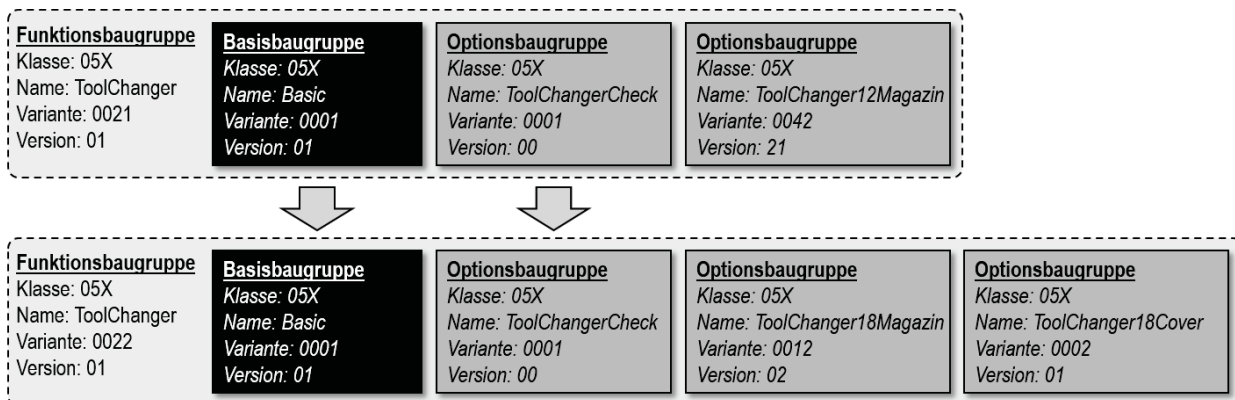


Abbildung 5-15: Aufbau einer Funktionsbaugruppe, entwickelt aus (Litto et al. 2004)

Aus der Kommissionierungsliste ist also der genaue Aufbau der Maschine bzw. Anlage aus Baugruppen, incl. Variante und Version, ableitbar.

Die virtuelle Maschine muss nun aus denselben Baugruppen bestehen.

### 5.4 Aufbau einer virtuellen Anlage aus VU

Die Untersuchung von Querbeziehungen von VU in den vorherigen Kapiteln hat gezeigt, dass diese mit den sogenannten Schichten weitgehend beschrieben sind. Es fehlt jedoch der Verbauungsplan, der beschreibt, wie Baugruppen über ihre Verbauungspunkte für eine Maschine verkettet sind und es fehlt die Referenzierung von Kinematikelementen. Aus den Daten der CAD-Modelle der Anlage wird nämlich heute üblicherweise lediglich das Skelettmodell zum Aufbau der realen Maschine abgeleitet.

Damit kann die Montageabteilung im Maschinenbau die Baugruppen mit implizitem Wissen zueinander richtig ausrichten.

Beim Aufbau des Modelles für eine virtuelle Maschine wird daher zunächst das Maschinengesamtmodell aus dem CAD-System in das Simulationswerkzeug importiert. Anschließend muss das Geometriegesamtmodell manuell in Gruppen von zwischen zwei Kinematikelementen liegenden Geometrien aufgeteilt wird. Jeweils dazwischen wird im Rahmen der „Kinematisierung“ das Kinematikelement eingefügt.

Fehlende Adapterstücke führen zu Lücken, welche ignoriert werden können, da die Baugruppen mit Ihren Konstruktionsnullpunkten geometrisch korrekt liegen. Lediglich die Visualisierung der Maschine leidet unter dieser Lücke, da die mechanische Verbindung optisch fehlt.

Während also das Verhaltensmodell BU der VU direkt der Baugruppensicht folgt, ist dies beim geometrischen Modell durch das Fehlen des Verbauungsplanes heute nicht möglich.

Konzeptionell ist dieser Verbauungsplan künftig notwendig. Dann könnten auch die Geometriemodelle der Baugruppensicht folgen. Die einer Baugruppe zugeordneten Geometrieelemente würden dann lediglich einmal aus dem CAD-Modell übernommen und kinematisiert und dann als GU der Baugruppe direkt wiederverwendbar zugeordnet.

Für die Verknüpfung der F-Schicht z. B. für die logische Materialflusssimulation nach Kapitel 5.2.2, sind weitere Informationen gefordert, die künftig im Verbauungsplan angegeben werden müssen. Behelfsmäßig werden heute oft die E/A der F-Schichten von Quelle und Senke mit demselben BMK bezeichnet.

### 5.5 Integration in den mechatronischen Engineeringprozess

Der Engineeringprozess nach Förderal sieht vor, dass sämtliche Baugruppen, welche in einer Maschine oder Anlage verwendet werden können, unabhängig voneinander konstruiert werden. Sind alle benötigten Daten der Baugruppe (MCAD, ECAD, Dokumentation, Steuerungsprogram, ...) vorhanden, wird diese im mechatronischen Baukasten des Herstellers abgelegt. Nur hieraus kann eine neue Maschine oder Anlage projiziert werden (vgl. Abbildung 4-10).

Nach der Angebots- und Konzeptphase folgt die Konstruktionsphase der Maschine oder Anlage. In diese Phase werden einer Basismaschine Baukastenbaugruppen hinzugefügt, um die Kundenanforderungen optimal zu erfüllen.

Die Konstruktionsphase wird nach Förderal auch „Projektierung“ genannt, da die eigentliche Konstruktion der Baugruppen bereits abgeschlossen ist. Während der Projektierung werden also keine neuen Baugruppen erzeugt, sondern nur vorhandene genutzt. Konstruiert wird lediglich deren mechanische, elektrische, pneumatische oder hydraulische Verbindung. Dies geschieht meist automatisiert durch das verwendete Projektierungstool und kann anschließend manuell angepasst werden.

Das Ergebnis der Projektierung ist die Kommissionierungsliste, in welcher alle vorgesehenen mechatronischen Baugruppen vermerkt sind, sowie Dokumente der einzelnen Disziplinen, welche für den Aufbau der Maschine notwendig sind. In Kapitel 5.3 „*Definition einer Kommissionierungsliste*“ wurde festgestellt, dass auf Basis dieser Kommissionierungsliste nun auch die virtuelle Maschine erstellt werden muss, um ein durchgängiges Gesamtkonzept zu erreichen.

Liegen die einzelnen Baugruppen als virtuelle Baugruppen vor, so bietet es sich an, die virtuelle Maschine auf dieselbe Weise zu erstellen, wie auch die reale Maschine. Etablierte Abläufe und Softwaretools ließen sich so ohne Anpassung direkt weiter nutzen. Zudem wäre nur so eine einheitliche, interdisziplinäre Betrachtungsweise zwischen den unterschiedlichen Kompetenzen im Maschinenbauunternehmen zu gewährleisten (vgl. Abbildung 5-16).

Das Forschungsprojekt AQUIMO setzte auf Förderal auf und kümmerte sich um eine Strategie zur Entwicklung von Baukastenkomponenten (vgl. Kapitel 4.4). Nach

AQUIMO durchlaufen Baukastenkomponenten einen festgelegten Entwicklungsprozess welcher alle notwendigen Disziplinen abdeckt und integriert (vgl. Abbildung 4-11). Es ist somit vorab planbar welche Entwicklungszeit und welcher Entwicklungsaufwand zur Erstellung einer neuen Baukastenkomponente einzuplanen ist. Auf ähnliche Weise kann die benötigte Entwicklungszeit für eine virtuelle Baugruppe erhoben werden. Der Gesamtentwicklungsaufwand für eine neue Baukastenkomponente erhöht sich zwar damit, im späteren Engineeringprozess lässt sich so aber die virtuelle Maschine automatisiert erzeugen, was eine deutliche Reduktion der Entwicklungszeit der virtuellen Gesamtmaschine zur Folge hat.

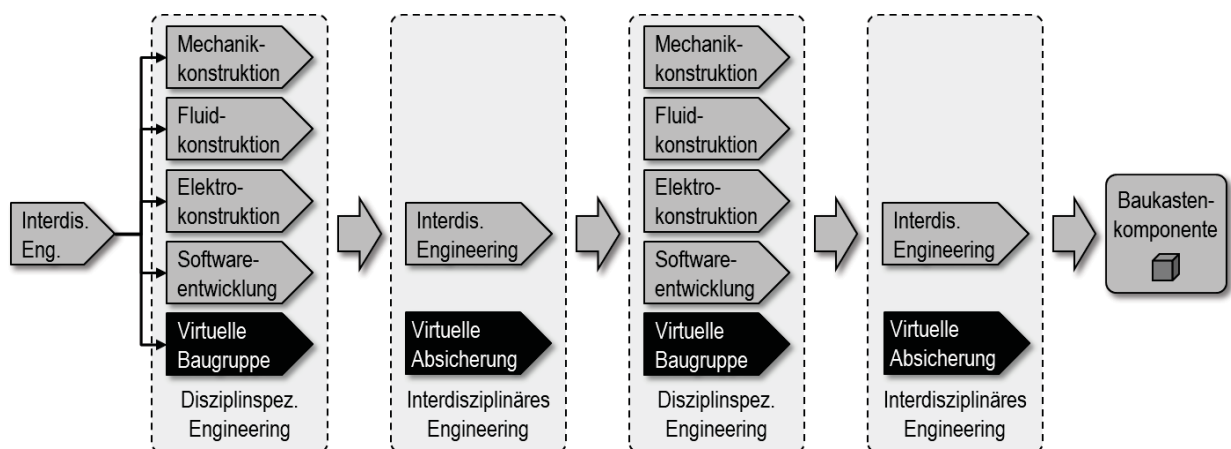


Abbildung 5-16: Ergänzung der Entwicklungsphasen um die virtuellen Baugruppen und der virtuellen Absicherung der Konstruktion

Erweitert man, diesem Gedanken folgend das Referenzbild Abbildung 4-13 um die virtuelle Maschine, so entsteht Abbildung 5-17: Das Projektierungstool erzeugt aus der Anforderungsliste des Kunden eine Kommissionierungsliste, welche für den Aufbau der realen, als auch für die virtuelle Maschine genutzt wird. Aus einem Baukasten heraus – bei der virtuellen Maschine aus einer Datenbank heraus – werden für die Anforderungen passende Baugruppen ausgewählt und zusammengestellt. Während ein Baukastenelement aus sämtlichen Engineeringdaten besteht, besteht eine virtuelle Baugruppe aus dem Verhaltensmodell (BU) und dem Geometriemodell (GU).

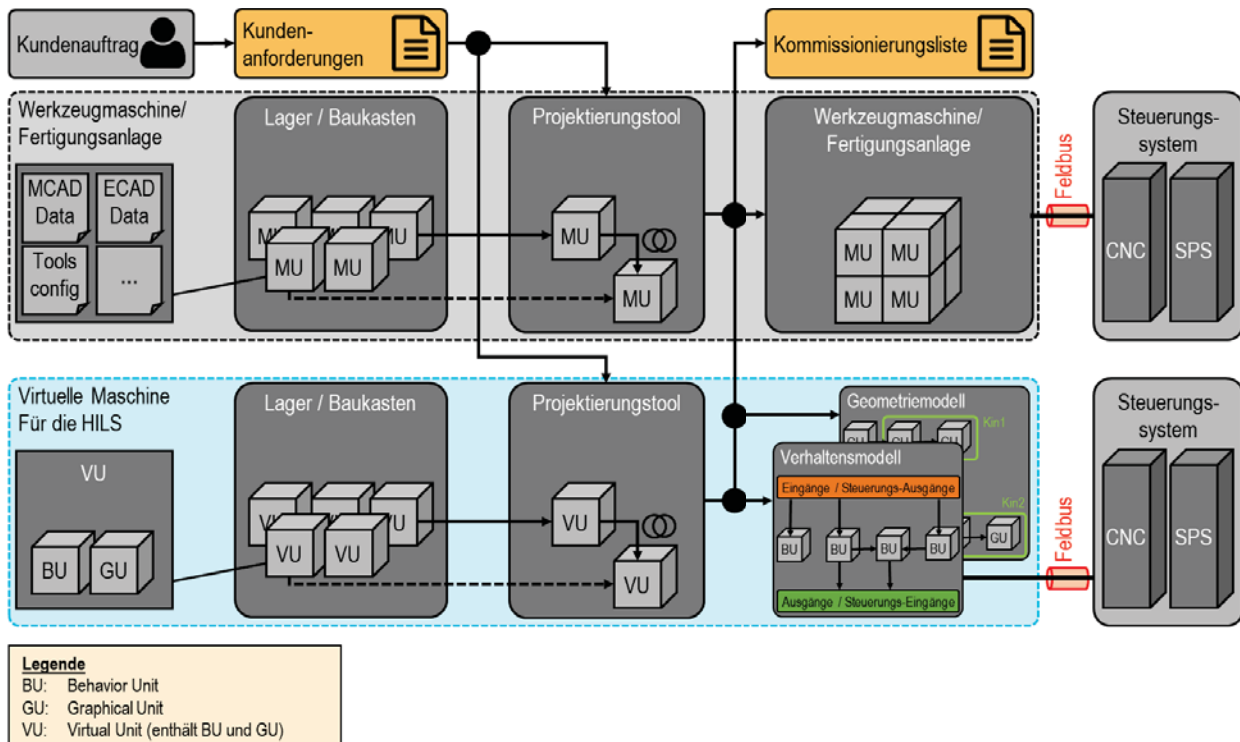


Abbildung 5-17: Homogenisierung des Engineerings realer und virtueller Maschinen (Scheifele et al. 2016b)

### 5.5.1 Einführung einer einheitlichen Baugruppensicht

Durch die getrennte Modellierung und Verwaltung der mechatronischen Baugruppe (MU) und der virtuellen Baugruppe (VU) ist es nicht auszuschließen, dass sich MU und VU getrennt voneinander entwickeln. Es ist sogar wahrscheinlich, dass MU wie seither entwickelt und die VU aus Zeitmangel oder weil deren Relevanz nicht hoch genug eingeschätzt wird nicht mitentwickelt werden. Der mechatronische Baukasten mit seinen MU und die VU-Datenbank werden damit inkonsistent. Eine automatisierte Erstellung der virtuellen Maschine ist dann nicht mehr möglich. Es ist also eine Lösung zu finden, welche die Entwickler zwingt VU und MU zusammen zu entwickeln und somit die virtuelle Baugruppe als Teil des mechatronischen Engineerings zu sehen.

Der objektorientierten Ansatz nach Föderal und AQUIMO liegt es nahe die separate Datenbank für virtuelle Baugruppen aufzulösen und die VU in die MU des mechatronischen Baukastens zu integrieren (vgl. Abbildung 5-18). Sie werden damit zusammen verwaltet und als Einheit gesehen. Eine solche Komponente wird im Weiteren, angelehnt an die internationale Begriffsdefinition (Lee 2008), als cyber-phisches System (CPS) bezeichnet.

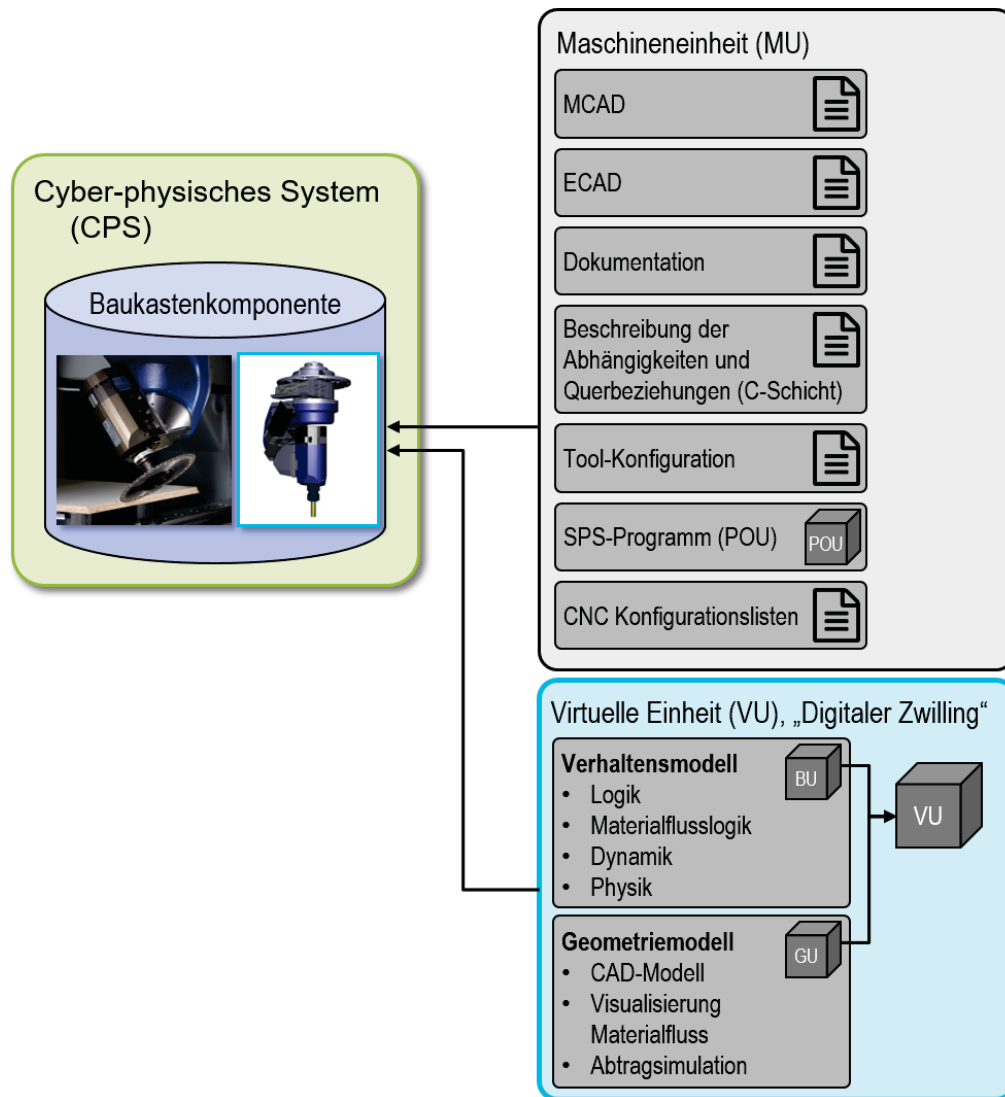


Abbildung 5-18: Zusammenführung der Modelle im mechatronischen Baukasten zum cyber-physischen System (CPS)

Im CPS-Baukasten liegen nun alle über das CPS bekannten Informationen vor. Das Projektierungstool, sowie die Generatoren aus Föederal können auf diese Informationen zugreifen und sie für die Generierung einer neuen Maschinenkonfiguration nutzen. Sämtliche benötigten Informationen sind aus der Baukastenkomponente ableitbar (Scheifele et al. 2016b). Abbildung 5-19 stellt dies in Form eines Sichtenkonzeptes dar: Je nach benötigter Information stellt sich ein und dasselbe CPS anders dar. Es sind jedoch immer alle Informationen vorhanden.

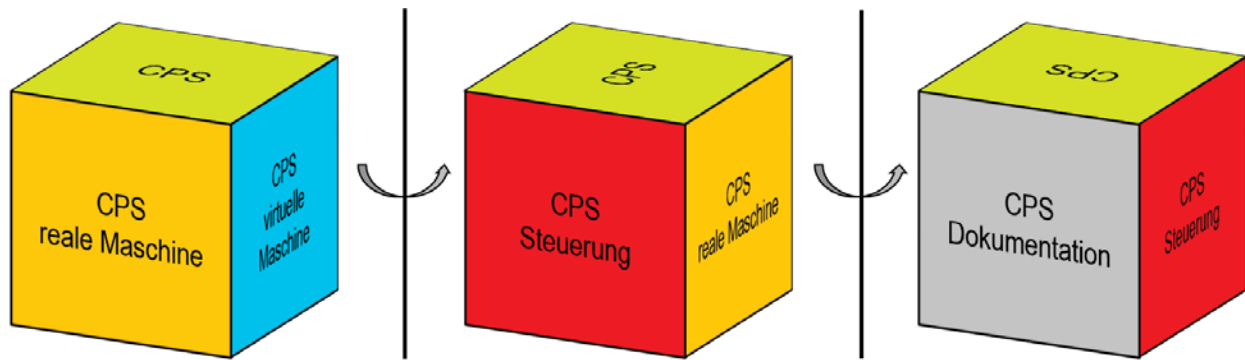


Abbildung 5-19: Verschiedene Sichtweisen auf dasselbe CPS

Stellt man nun eine Maschine aus CPS-Komponenten des Baukastens zusammen, so entsteht ein cyber-physisches Produktionssystem (CPPS). Beim Erstellen werden die verwendeten CPS und deren Verbauungsort in einem Objektbaum des CPPS festgelegt. Abbildung 5-20 stellt dies schematisch dar. Je nach benötigter Informationssicht ändert sich der Objektbaum, der das CPPS beschreibt, vom vollständigen CPS-Modell hin zu einer abgeleiteten Form. Beispielsweise kann die kinematische Kette, welche für das Steuerungssystem benötigt wird mitsamt allen benötigten Parametern und Programmen abgerufen werden. Da diese Darstellung der Informationen über das CPPS sehr umfangreich werden kann, sollen im Folgenden nur die Sichten auf die CFPM-Schichten sowie die VU berücksichtigt werden.

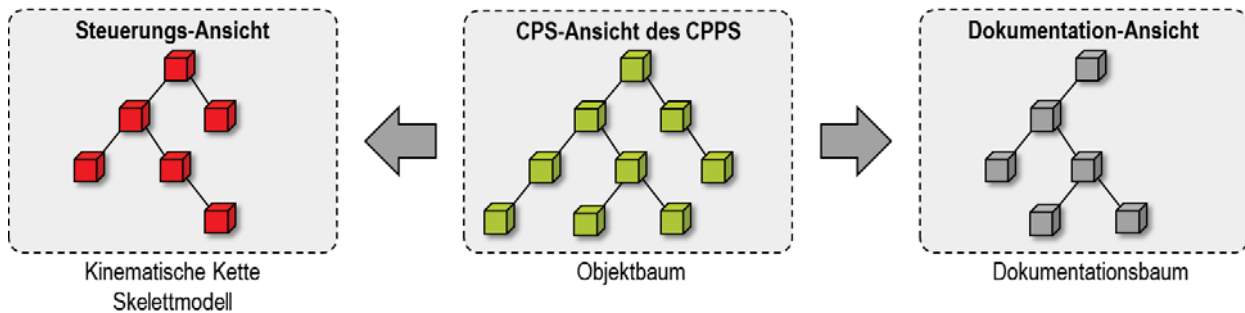


Abbildung 5-20: Sichtenkonzept auf ein CPPS

Es genügt somit zu wissen, welche CPS in einem CPPS vorhanden sind. Aus dieser Auflistung lässt sich dann aus geeigneten Datenspeichern jede Information ableiten, die für einen Anwendungsfall benötigt wird.

Da die hier genutzte CPS-Sichtweise die mechatronische Baugruppe zur Basis hat, lassen sich dieselben Regeln und Tools zur Projektierung eines CPPS nutzen, wie sie

für eine mechatronische Maschine oder Anlage genutzt werden. Diese Betrachtungsweise führt zu einem Referenzbild für die Projektierung von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) (vgl. Abbildung 5-21), abgeleitet aus dem Referenzbild für die Projektierung nach Föderal (Abbildung 4-13).

Das Projektierungstool nutzt einen CPS-Baukasten für die Zusammenstellung einer kundenspezifischen Maschine bzw. Anlage. Als Ergebnis gibt es eine Kommissionierungsliste aus, welche sämtliche genutzten CPS enthält. Die für jede Disziplin benötigten Informationen lassen sich dann aus dem CPPS ableiten.

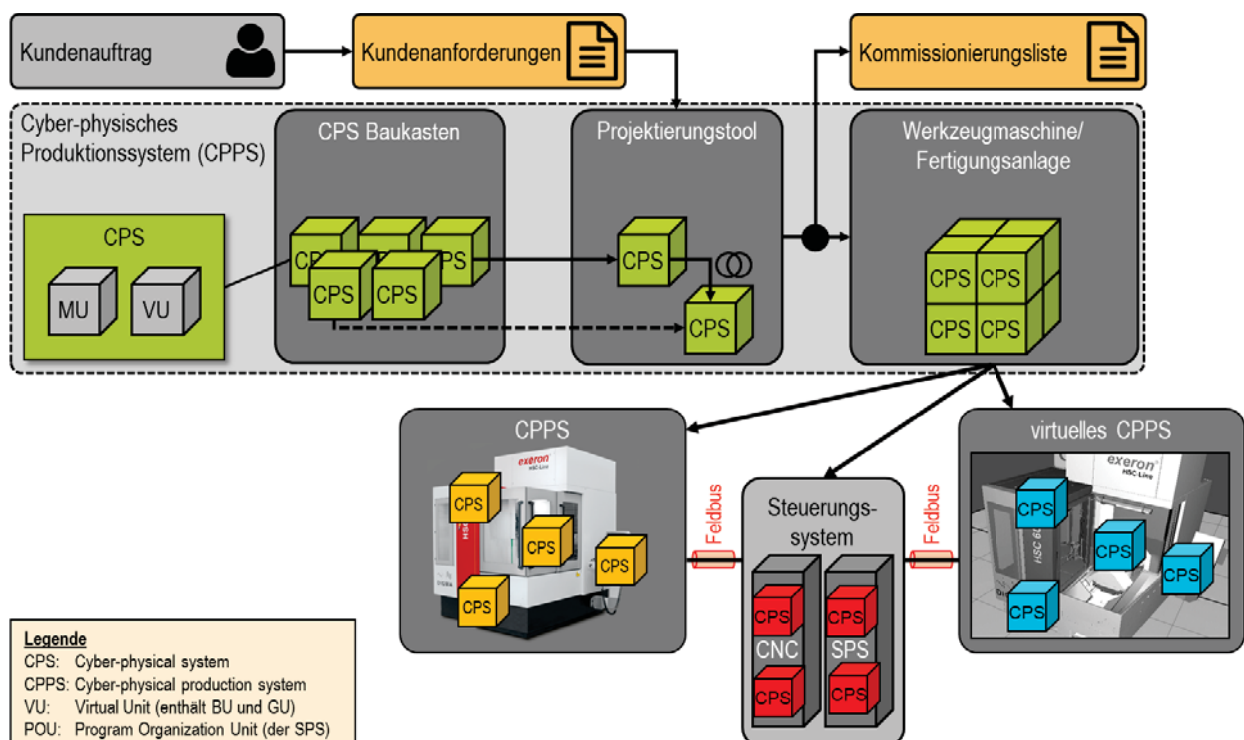


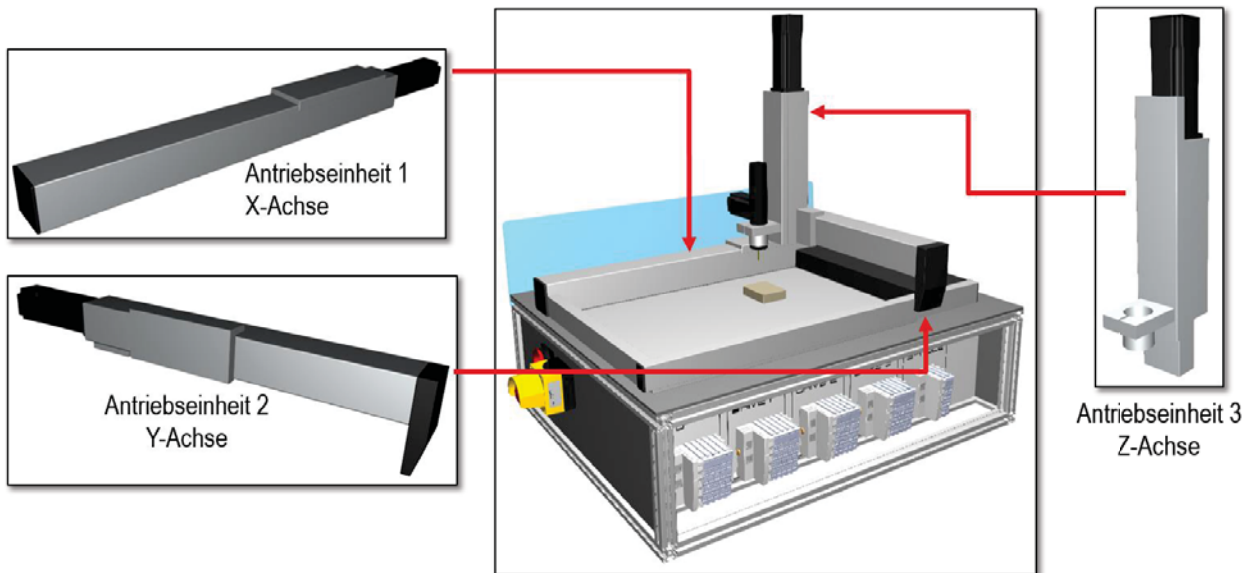
Abbildung 5-21: Referenzbild „Projektierung von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS)“

### 5.5.2 Nachweis der Ableitbarkeit der für die virtuelle Maschine notwendigen Sichten auf eine CPS-Modellierung

Ziel dieser Überprüfung ist der experimentelle Nachweis, dass Maschinen und Anlagen aus mechatronischen autarken Baugruppen, welche der Definition eines CPS entsprechen, implizit alle Sichten auf CPS erlauben. Ausgehend von der Sicht „reale Maschine“ wären das dann die Sichten „virtuelle Maschine“ und „Steuerungskonfiguration“.

## 5 Konzeption

Als Beispielmachine soll eine kleine 3-achsige Fräsmaschine dienen (vgl. Abbildung 5-22). Diese besteht aus drei identischen Antriebseinheiten. Eine Antriebseinheit verfügt über einen Motor mit Resolver, einen kompakten Antriebsumrichter, eine vierkanalige Digital-Eingangs- und eine vierkanalige Digital-Ausgangsklemme.



*Abbildung 5-22: 3-achsige Fräsmaschine zur Überprüfung der Konzeption*

Als CPS haben wir damit vorliegen: drei Antriebseinheiten, einen Werkzeugwechsler und eine Spindeleinheit mit automatischer Spannzange. Sie sind jeweils über ein Feldbussystem, wofür z. B. EtherCAT (EtherCAT Technology Group) oder POWERLINK (Ethernet POWERLINK Standardization Group) geeignet wären, informationsfähig mit einem Rechner verbunden, der sowohl als Steuerungssystem als auch als Träger der virtuellen Maschine dienen soll.

Im konkreten Fall wurde jede CPS über einen eigenständigen Buskoppler an ein EtherCAT-Feldbussystem angebunden. Der Versuchsaufbau einer Achseinheit ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

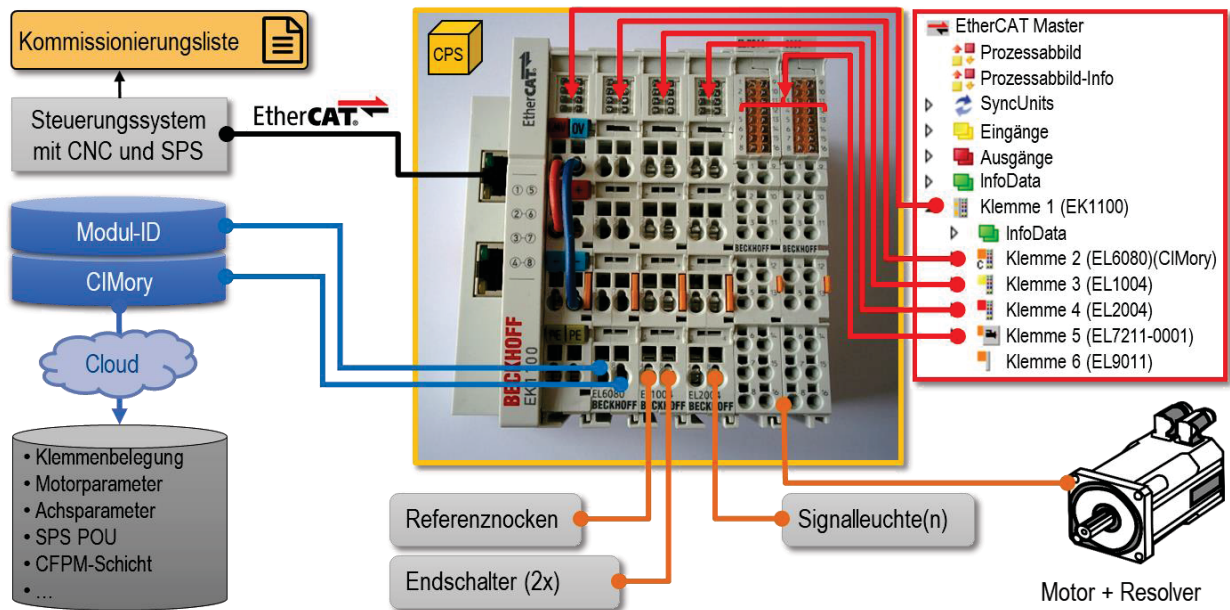


Abbildung 5-23: Experiment zur ersten Überprüfung des Ansatzes nach (Scheifele et al. 2016b)

Aus Sicht des Steuerungssystems stellt sich die Achseinheit selbst zunächst nur als eine Aufreihung von Feldbusklemmen dar (vgl. Abbildung 5-23, roter Kasten rechts). Lediglich der Klemmentyp ist bekannt. Informationen wie z. B. die Kanalbelegung der Ein- und Ausgangsklemme, die Motorparameter oder Parametrierung des Antriebsumrichters sind so nicht verfügbar. Ebenso wenig ist damit bekannt, welche Baugruppe sich hinter dem Klemmsatz befindet. Für diese zusätzlichen Informationen, die aus der Baugruppe erst ein CPS machen, wurde zusätzlich eine Feldbusklemme gesetzt, welche Informationen über das Feldbussystem lesbar speichern kann.

Auf der Speicherklemme wurde der im EU-Projekt „CassaMobile“ entwickelte CIMory (Configuration and Information Memory, (Scheifele et al. 2016b)) realisiert. Der CIMory speichert nicht nur die Baugruppen-ID, welche eine eindeutige Identifikation der Baugruppe mit Variante und Version zulässt, sondern auch alle zur automatisierten Konfiguration und automatisierten Programmierung des Steuerungssystems benötigten Informationen. Diese können entweder direkt auf der Speicherklemme hinterlegt sein („by value“), oder es ist lediglich eine Speicherreferenz hinterlegt („by reference“). Im zweiten Fall können die Informationen entweder aus einer zentralen Datenbasis, oder von Servern im Internet, der Cloud, kommen.

Nach Auslesen aller CIMory im Rahmen eines Feldbussscans sind folgende Informationen bekannt:

- Vorhandene Maschinenmodule,
- Verbauungsplan,
- Die aus Kapitel 5.1.5 bekannte CFPM-Schicht, welche die Abhängigkeiten, die Querbeziehungen, die Funktionalität und das Ein- und Ausgangsabbild der Baugruppe beschreibt:
  - Konstruktionsnullpunkte und Verbauungspunkte,
  - Kinematische Freiheitsgrade und Örtlichkeit in der Baugruppe,
  - Kanalbelegung der Ein- und Ausgangsklemmen,
- Parametrierung von Motor und Antriebsumrichter,
- Benötigte SPS-Programmbausteine (POU),
- Parameterlisten der CNC-Achse,
- Benötigte Lizenzen für Software wie z. B. die Transformation der CNC, da diese durch die CIMory der CPS als Anforderung gestellt werden.
- Verfügbare Lizenzen, da diese durch dafür vorgesehene CIMory, ähnlich einem Lizenz-Dongle bereitgestellt werden.

Mit diesen Informationen ist die Kommissionierungsliste der Maschine bekannt, womit die virtuelle Maschine nach dem Konzept aus Kapitel 5.2 aufgebaut wurde, die dann als Ebenbild der realen Maschine vorliegt. Anschließend wurden aus der virtuellen Maschine Informationen abgeleitet, die implizit aus der Gesamtmaschine entstehen. Hierzu gehört beispielsweise die Parametrierung der CNC-Kanäle mit den Parameterwerten der kinematischen Kette (Scheifele et al. 2016b).

Die Eignung der Konzeption wurde nachgewiesen.

## 5.6 Zusammenfassung

Die durch die mechatronische Sichtweise vorgegebene Modularität einer Produktionsmaschine oder Produktionsanlage wurde auf die virtuelle Maschine übertragen. Vorgegebenen mechatronischen Schnittstellen sind auch Schnittstellen der virtuellen Maschine.

Um die getrennte Entwicklung von virtueller und realer Baugruppe und die damit einhergehende Gefahr der Inkompatibilität zu verhindern, bot es sich an, die CPS-Sichtweise einzuführen. Sie erlaubt es die Baugruppe als Ganzes zu betrachten. Hieraus entsteht eine 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe.

Das Experiment in Kapitel 0 hat gezeigt, dass ein vollständiges Modell einer virtuellen Maschine aus der Kommissionierungsliste und dem Verbauungsplan erzeugt werden kann, wenn die CPS alle benötigten Informationen inklusive Kinematisierung enthalten. Diese sind die Verhaltens- und Geometriemodelle, die vollständige P-, F- und M-Schicht und die auf die Konstruktionsnullpunkte referenzierten Verbauungspunkte und Freiheitsgrade.

Voraussetzung für diese Sichtweise ist damit die Ableitung eines Verbauungsplanes durch das Projektierungstool, parallel zum Skelettmodell.

## 5.7 Konzeption des Modellgenerators zum automatisierten Aufbau einer virtuellen Maschine bzw. Anlage

Nach Abschluss der Projektierung einer neuen Maschine bzw. Anlage ist eine Kommissionierungsliste verfügbar. Auf Basis dieser erfolgt der Aufbau der realen Maschine bzw. Anlage (vgl. Kapitel 5.3). Auch die virtuelle Maschine bzw. Anlage soll auf dieser basierend aufgebaut werden. Hierfür wurden die Schnittstellen der realen Baugruppen (MU) auf die virtuellen Baugruppen (VU) übertragen (vgl. Kapitel 5.2). Die VU ist somit die 1:1-Abbildung der MU. Um die virtuelle Maschine für die virtuelle Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen wirtschaftlich in den Engineeringprozess integrieren zu können, muss nun der Aufbau weitgehend automatisiert erfolgen. Für den automatisierten Aufbau einer virtuellen Maschine wird daher ein Generator konzipiert. Dabei

wird vorausgesetzt, dass der Generator auf einen CPS-Baukasten gemäß Kapitel 5.5.1 zugreifen kann. Die Ergebnisse der Maschinenprojektierung liegen in Form der Kommissionierungsliste, Feldbusbeschreibung und dem Verbauungsplan vor.

Der automatisierte Aufbau des Verhaltensmodells der virtuellen Maschine gliedert sich dann prinzipiell in diese Schritte:

1. Auslesen der Kommissionierungsliste und Identifikation der CPS mit Variante, Version und maschinenspezifischem Instanzname.
2. Instanziierung des Verhaltensteils (der BU) im Verhaltensmodell und Vergabe des durch die Kommissionierungsliste vorgegebenen maschinenspezifischen Instanznamens.
3. Anpassung der kommunikativen (P-Schicht) und funktionalen (F-Schicht) Schnittstelle von einer abstrakt klassenspezifischen zu einer instanzspezifischen Benennung der PDO. Die P- und die F-Schicht der virtuellen Baugruppe sind anschließend mit den korrekten maschinenspezifischen Betriebsmittelkennzeichen versehen.
4. Ankopplung der P-Schicht an das Feldbussystem über die Feldbusbeschreibung und Herstellung der Verbindung zum Steuerungssystem.
5. Korrektes Verbinden der Quellen und Senken der F-Schichten der einzelnen virtuellen Baugruppen mit den Informationen aus dem Verbauungsplan oder aus der Regel gleichlautender BMK von Quelle und Senke.

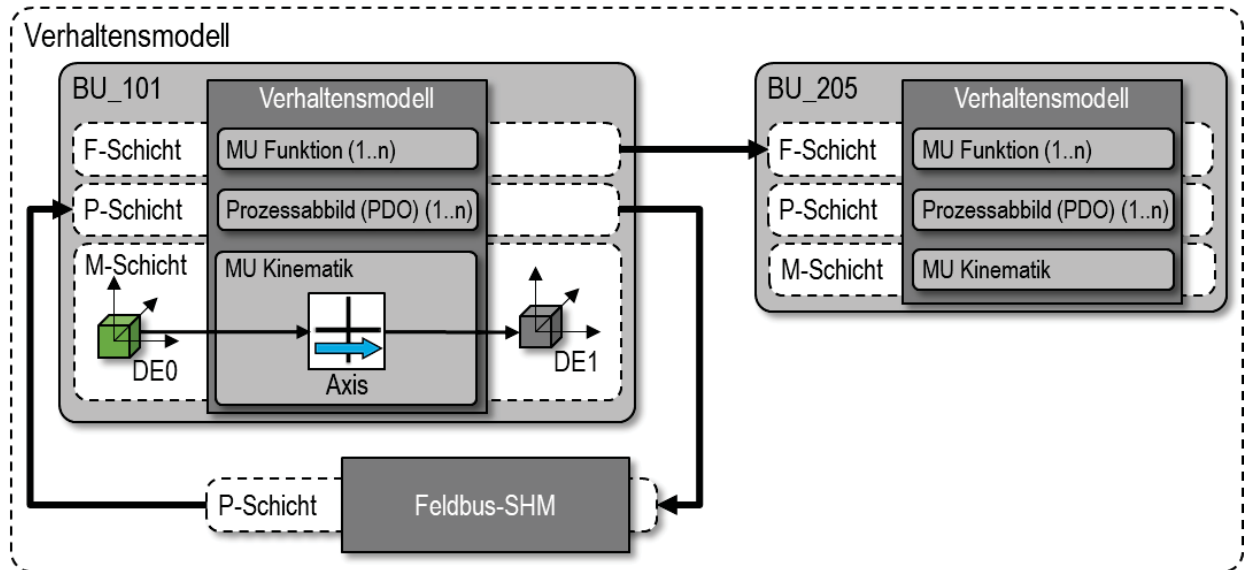


Abbildung 5-24: Stand der Generierung des Verhaltensmodells durch den Modellgenerator nach Schritt 5 (schematische Darstellung)

6. Modellierung der kinematischen Verkettung der Baugruppen (M-Schicht) aus dem Verbauungsplan.
7. Initialisierung der Kinematikelemente mit Grundposition und Grundorientierung.
8. Start des Verhaltensmodells.

Nach diesen 8 Schritten ist das Verhaltensmodell bereit und verhält sich am Feldbus-system für das Steuerungssystem wie die reale Maschine.

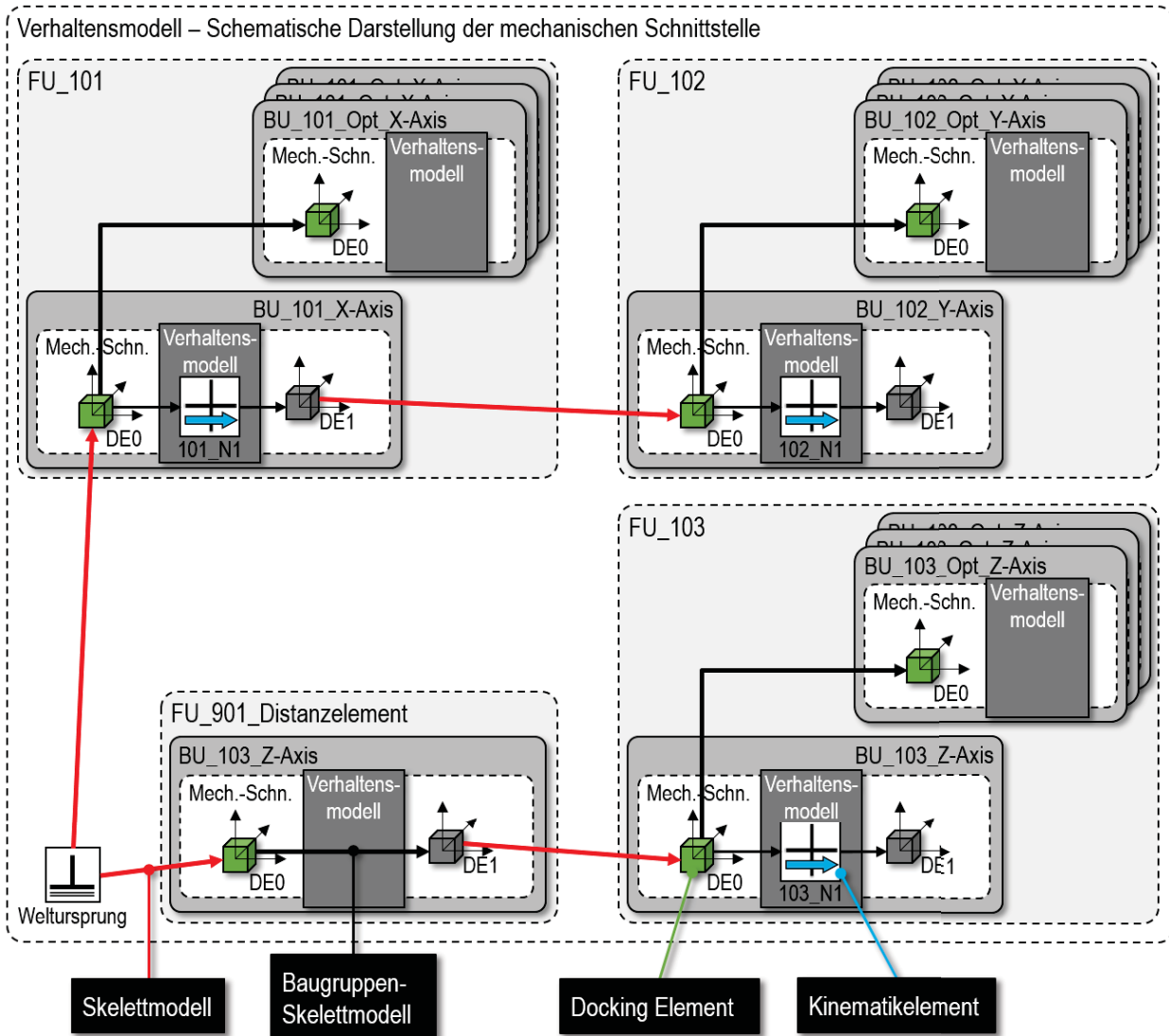


Abbildung 5-25: Stand der Generierung des Verhaltensmodells durch den Modellgenerator nach Schritt 8 (schematische Darstellung der mechanischen Verkettung)

Anschließend wird das Geometriemodell der virtuellen Maschine zur Visualisierung der Maschine mit folgenden Schritten aufgebaut.

9. Instanziierung des Geometrieteils der CPS im Geometriemodell und Vergabe des maschinenspezifischen Instanznamens.
10. Anpassung der Benennung der Kinematikelemente an die maschinenspezifischen Betriebsmittelkennzeichen, um Punkt 8 zu ermöglichen.
11. Einrichtung der zyklischen Übertragung der Istpositionen der Kinematikelement im Verhaltensmodell.
12. Start des Geometriemodells.

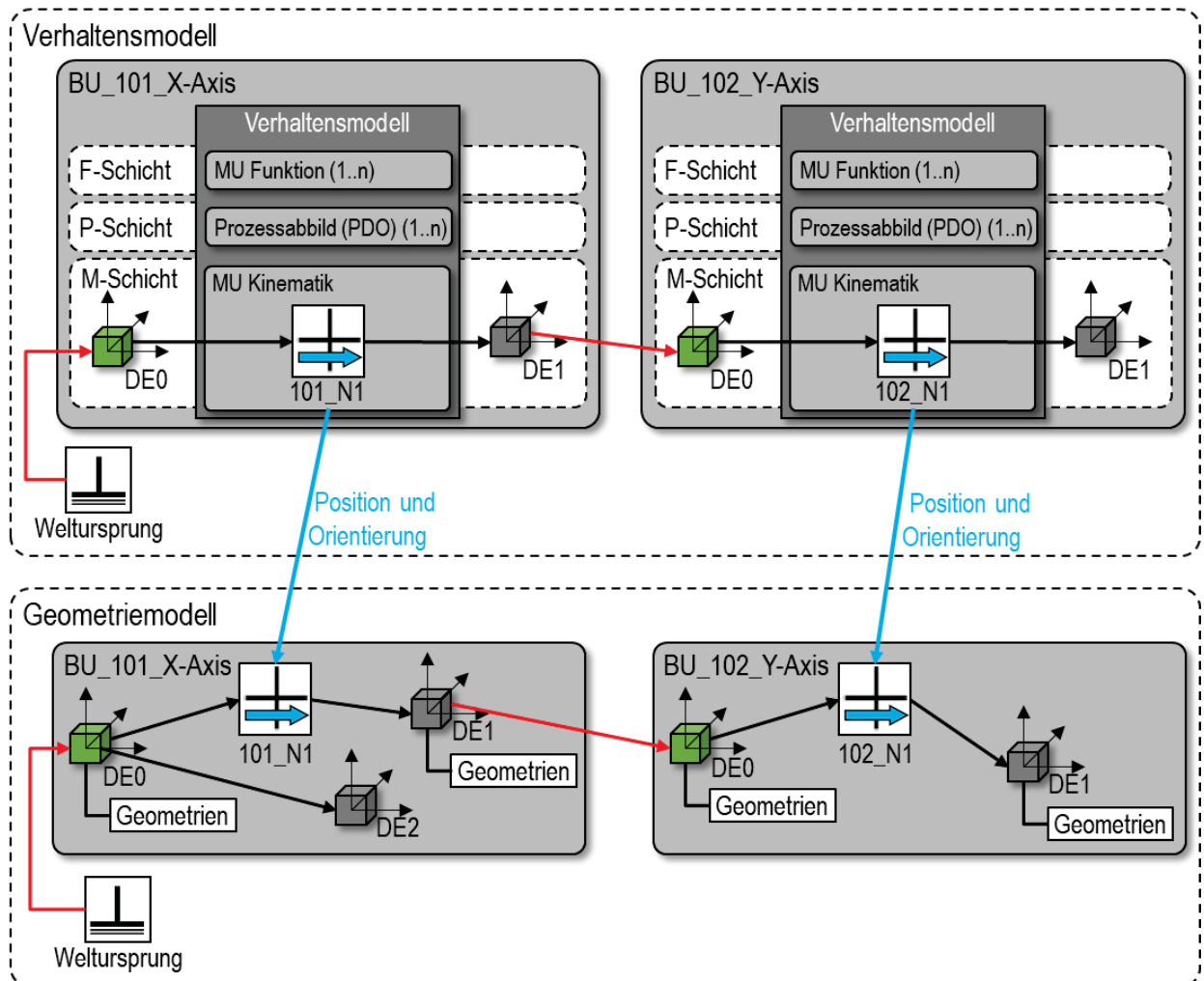


Abbildung 5-26: Ergebnis der automatischen Erstellung des Geometriemodells (schematische Darstellung)

Nach Ablauf dieser 12 Schritte ist ein virtuelles Modell der Maschine oder Anlage verfügbar, das sich aus Steuerungssicht am Feldbus verhält wie die reale Maschine oder Anlage. Hierfür wurden die P-Schichten der einzelnen Baugruppen mit dem Feldbusystem verbunden. Für die korrekte Bewegung der Baugruppen im Geometriemodell wurde die kinematische Kette über das Skelettmodell aufgebaut. Die modellinterne Kommunikation der funktionalen Schnittstelle (F-Schicht) wurde automatisiert verbunden. Die virtuelle Maschine ist nun einsatzfähig.

## 5.8 Wandel des mechatronischen Engineeringprozesses hin zum Engineering auf Basis von CPS

Im Rahmen der Arbeit wurden mechatronische und virtuelle Baugruppen zu einer cyber-physischen Baugruppe, nach internationaler Definition „cyber-physisches System (CPS)“ genannt, zusammengefasst (vgl. Kapitel 0). Hierdurch ergab sich die Möglichkeit die reale und die virtuelle Baugruppe als eine einzige Baugruppe zu betrachten und handzuhaben. Durch die daraus entstehende 1:1-Beziehung zwischen real verbauter Baugruppe in der Maschine bzw. Anlage, mechatronischer Baugruppe im Baukasten und virtueller Baugruppe in der virtuelle-Maschine-Datenbank ergeben sich nun neue Möglichkeiten im Entwicklungsprozess einer Maschine bzw. Anlage.

So kann eine neue Maschine im direkten Zusammenwirken mit dem Kunden konzipiert und virtuelle erprobt werden. Dafür wird ein Projektierungstool genutzt, das grafisch, skriptbasiert oder durch Auswahlmöglichkeiten sowohl den Hersteller wie den Kunden unterstützt, der durch das entstehende Modell einen ersten Eindruck der Umsetzung seiner Anforderung erhält. Dies kann z. B. grafisch anhand eines 3D-Modelles geschehen. Wird eine virtuelle Maschine erstellt, kann abstrahiert gegen die Basisanforderungen wie z. B. Arbeitsraum, Interaktion mit dem Umfeld, usw. getestet werden. Hierfür genügt eine einfache Steuerung, die z. B. zustandsbasiert oder durch Benutzereingaben die Maschine bewegt. Der Kunde sieht bereits in diesem Stadium, wie der Maschinenhersteller die Maschine plant und bekommt auch schon in dieser Phase eine Mitwirkungsmöglichkeit. (vgl. Abbildung 5-27)

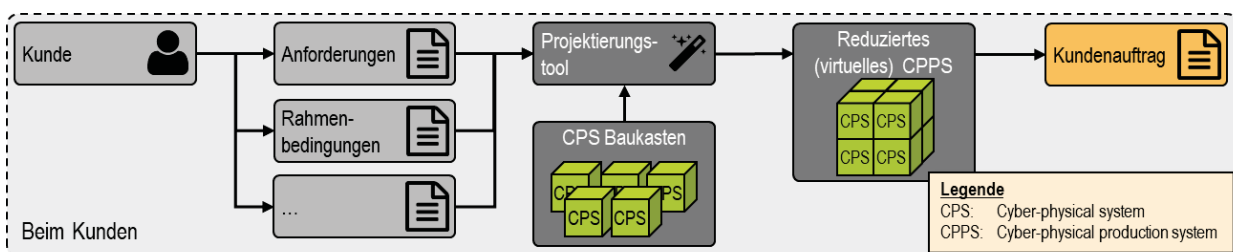


Abbildung 5-27: Aufbau eines reduzierten (virtuellen) CPPS beim Kunden, nach Scheifele et al. 2017

Ist der Kunde von seiner spezifisch für ihn angepassten Maschine überzeugt, beginnt die eigentliche Projektierung der Maschine. Die zuvor ausgewählten CPS werden aus einem Baukasten heraus um Informationen ergänzt und der Detaillierungsgrad des

reduzierten Modells durch Spezifizierung der Hardware, der Software, usw. erhöht. (vgl. Abbildung 5-28) Das Projektierungstool kennt zudem durch die zu jedem CPS gehörenden Informationen, welche Abhängigkeiten und Querbeziehungen zwischen den CPS bestehen und kann notwendige CPS der Projektierung hinzufügen und bereits projektierte durch besser passende austauschen – beispielsweise erfordert eine Spindel mit pneumatischer Wechseleinrichtung ein CPS das das Prozessmittel „Pressluft“ mit ausreichendem Druck und Menge zur Verfügung stellt. Aus dieser Anforderung, sowie der Anforderung anderer CPS, die ebenfalls dieses Prozessmittel benötigen, kann das Projektierungstool ein entsprechend dimensioniertes CPS auswählen.

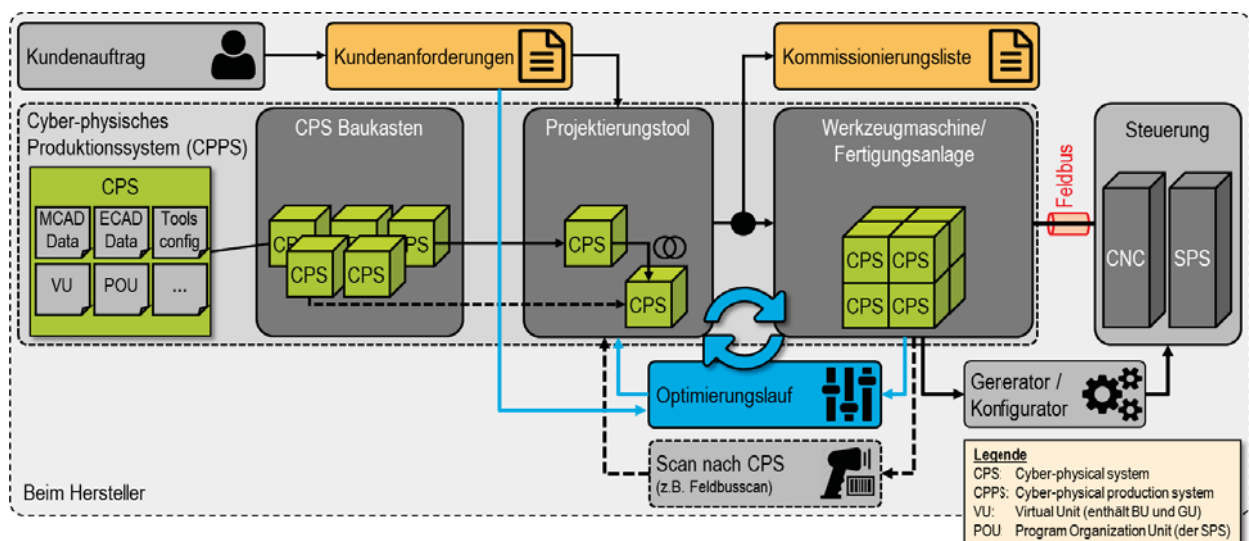


Abbildung 5-28: Projektierungsprozess eines CPPS aus einem CPS-Baukasten heraus, nach Scheifele et al. 2017

Ist die Projektierung abgeschlossen, steht eine Kommissionierungsliste zur Verfügung, welche alle zur Maschine gehörenden CPS umfasst. Die virtuelle Maschine kann nun automatisiert generiert, die Steuerung konfiguriert und parametrieren werden (Scheifele et al. 2015; Scheifele et al. 2016b; Scheifele et al. 2016a; Scheifele et al. 2016c). Anschließend steht eine ausreichend detaillierte HILS zur Verfügung, an der die Steuerung virtuell in Betrieb genommen werden kann. Sämtliche Verhaltensmodelle der virtuellen Maschine sind so parametrieren, dass das Verhalten der Maschine idealisiert nachgebildet wird. Ein erster vollumfänglicher Test gegen die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Kunden sind mit der HILS möglich. Es können verschiedene Realisierungsmöglichkeiten getestet werden. Ein Optimierungsverfahren passt die Inbetriebnahme für einen nächsten Optimierungsschritt durch den Austausch von besser

passenden CPS an. Die Realisierung, die den Kundenanforderungen am besten entspricht, wird ausgewählt.

Ebenso kann die Steuerung durch geeignete Testfälle vollumfänglich getestet werden. Auch können Tests absolviert werden, welche bei Nichterkennung die Zerstörung der Maschine zur Folge hätten.

Beim anschließenden an der HILS durchgeführten Factory Acceptance Test (FAT) bestätigt der Kunde die Einhaltung seiner Anforderungen und Rahmenbedingungen. Da das Verhaltensmodell der virtuellen Maschine dem der realen Maschine gleicht – in jedem Steuerungstakt wird exakt das logische Maschinenverhalten berechnet – können die FAT-Ergebnisse anerkannt werden. Die Maschine wird zur Fertigung freigegeben. Es werden automatisiert Stromlaufpläne (ECAD), Fertigungszeichnungen (MCAD) sowie die Dokumentation erstellt und die Maschine wird gefertigt.

Sobald die reale Maschine zur Verfügung steht, wird zunächst der Feldbus gescannt. Da alle CPS mit der Steuerung kommunizieren und sich dabei identifizieren können, kann eine Bestandsliste aufgebaut und mit der Kommissionierungsliste abgeglichen werden. Ebenso kann das Feldbuslayout und die Verkabelung mit der der virtuellen Maschine, welche die Referenz darstellt, verglichen werden. Ist der Aufbau korrekt, stimmen der reale und der virtuelle Feldbus überein. Anschließend werden die einzelnen CPS separat mit Hilfe der HILS in Betrieb genommen. Die HILS simuliert hierbei das Verhalten der restlichen Maschine. Somit kann gefahrlos jedes CPS einzeln in Betrieb genommen werden.

Auch im Bereich der Mitarbeiter lässt sich die virtuelle Maschine nun einsetzen: Maschinenbediener können anhand der virtuellen Maschine schneller und gezielter auf die Maschine bzw. Anlage angelernt werden. Fehlerfälle müssen nicht mehr künstlich und riskant an der realen Maschine bzw. Anlage herbeigeführt werden – wenn dies überhaupt möglich ist – sondern können gezielt an der virtuellen Maschine eingeleitet werden. Hierdurch wird die Qualifikation der Mitarbeiter deutlich verbessert und Maschinenstillstandszeiten durch Fehlerfälle signifikant reduziert.

### **5.8.1 Rekonfiguration und Modernisierung vorhandener Maschinen und Anlagen**

Soll die Produktionsmaschine oder Produktionsanlage später durch neue Module modernisiert oder erweitert werden soll, war dies bisher nur mit großem Aufwand möglich: Zum einen waren die Informationen darüber, wie die Maschine konstruiert wurde und welche Module installiert wurden, nicht verfügbar. Zum anderen konnte das Steuerungssystem ohne die Information aus dem Modulbaukasten des Herstellers nicht automatisch konfiguriert und parametrieren werden - eine manuelle Einstellung der Steuerung durch einen Fachmann war notwendig. Auch eine Software-Aktualisierung war bisher nur mit hohem Risiko möglich. Durch das Wissen, welche CPSs in welcher Variante verfügbar sind und welche Version, könnte zukünftig der vorherige Zustand im Falle eines Ausfalls des Upgrades wiederhergestellt werden.

Da nun alle Daten über das CPPS in den jeweiligen CIMory (vgl. Kapitel 5.5.2) verfügbar sind, können alle vorhandenen CPS z. B. durch einen Feldbusscan erkannt und den Generatoren zur Generierung, Konfiguration und Parametrierung des Steuerungssystems zur Verfügung gestellt werden (Scheifele et al. 2016d; Scheifele et al. 2016e). Neu hinzugefügte CPS werden erkannt und automatisch im CPPS registriert, entfernte CPS werden aus der Konfiguration gelöscht. Eine wirtschaftliche und automatisierte Lösung für die Umrüstung und Modernisierung bestehender Produktionsmaschinen ist damit realisierbar.

Darüber hinaus ist es möglich, die Maschine aktiv nach Daten wie der Dokumentation, den CAD-Daten, der virtuellen Maschine oder der Steuerungskonfiguration zu "fragen". Da die Daten über jedes in der Produktionsmaschine installierte CPS zugänglich ist, z. B. über den Feldbus der Maschine, können hierfür konzipierte Programme wie Konfiguratoren und Generatoren jederzeit die benötigten Informationen erfassen (siehe Abbildung 5-29). Alle Kenntnisse über die Maschine sind unmittelbar verfügbar.

## 5 Konzeption

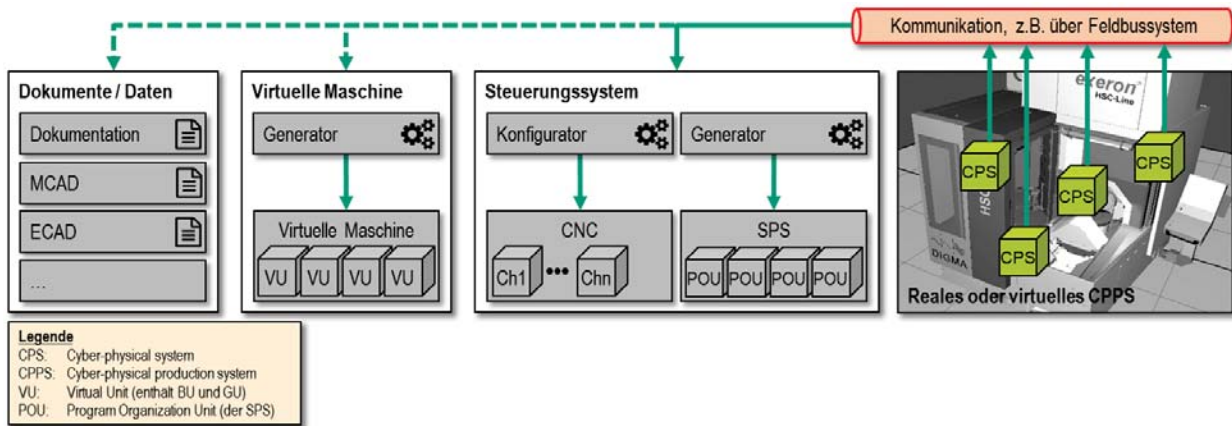


Abbildung 5-29: Bereitstellung der CPS-Daten über ein Kommunikationssystem, nach Scheifele et al. 2017

## 6 Realisierung

Das in Kapitel 0 vorgestellte Konzept soll an drei ausgewählten Beispielen, welche oft im Maschinen- und Anlagenbau vorkommen, realisiert werden. Das erste Beispiel stellt eine typische mechatronische Baugruppe mit Achsen, Tastern und Aktoren dar. Das zweite Beispiel stammt aus dem Bereich des Materialflusses zur Verkettung von Maschinen. Das dritte Beispiel betrachtet das Werkzeughandling. Abgeschlossen wird das Kapitel mit dem Aufbau einer komplexen Produktionsanlage aus virtuellen Modulen, welche nach Kapitel 0 modelliert wurden.

### 6.1 Ergänzung einer CPS „Spindelkopf“ durch ein Verhaltens- und ein Geometriemodell

Im Maschinen- und Anlagenbau werden Funktionsbaugruppen oft sehr komplex. Sie bestehen meist aus mehreren Baugruppen mit Antrieben, Sensoren und Aktoren. Zur beispielhaften Realisierung des Konzeptes soll daher ein Spindelkopf beispielhaft modelliert werden. Bei erster Betrachtung fällt auf, dass dieser aus drei Achsen (A-, C- und Spindel-Achse) besteht, sowie Sensorik für die Überprüfung der Spannzange der Werkzeugaufnahme, Endschaltern und weiteren Sensoren, wie z. B. für die Schwingungsüberwachung des Werkzeugs. Abbildung 6-1 stellt den Spindelkopf aufgeteilt in die Bereiche „Hardware“, „Elektronik des Schaltschranks“ und „Elektronik im Spindelkopf“ dar.

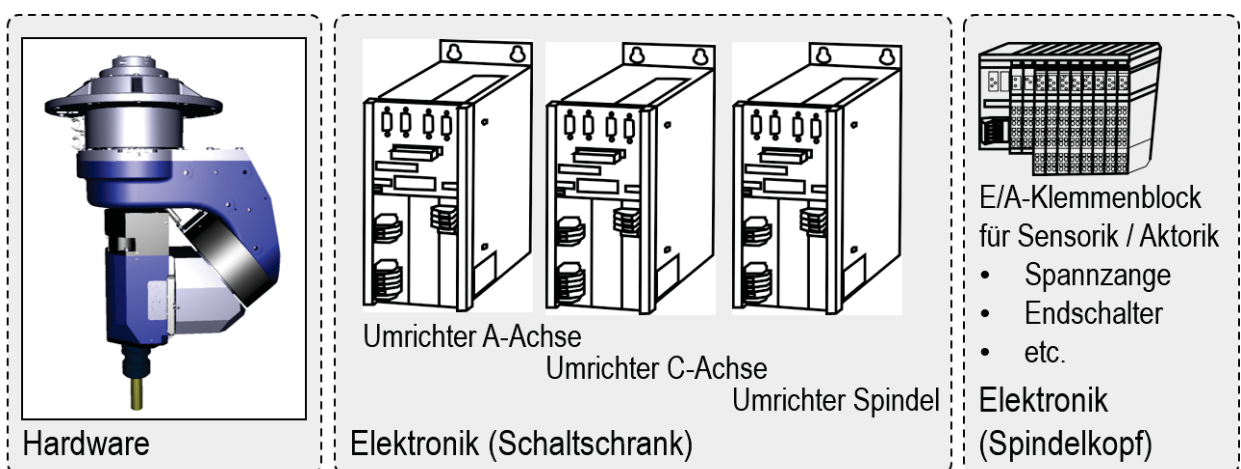


Abbildung 6-1: Umsetzungsbeispiel Funktionsbaugruppe „Spindelkopf“

Im mechatronischen Baukasten ist die Funktionsbaugruppe als „FU\_111“ gelistet (vgl. Abbildung 6-2). In Variante 21, Version 02 besteht die Funktionsbaugruppe aus der Basis-Baugruppe, einem Spindelschwingungssensor (MU\_11X\_OptSpindleOscillation), einer Werkzeug-Spannzangensteuerung (MU\_11X\_OptClampingController) und einer pneumatischen Spannzangenansteuerung (MU\_11X\_OptClampingPneum). Es gilt nun diese Baugruppen in der virtuellen Maschine abzubilden.

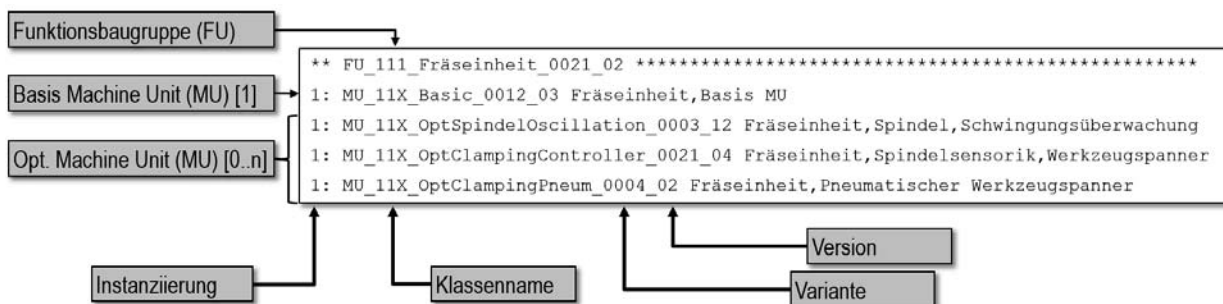


Abbildung 6-2: Kommissionierungsliste des Spindelkopfes

Die Baugruppen werden als autarke Einheiten betrachtet. Die im Kapitel 5.2 beschriebenen mechatronischen Schnittstellen dürfen dabei die einzigen sein, die die virtuelle Baugruppe besitzt. Verbindungen, welche zwischen den Baugruppen erstellt werden müssen, werden entsprechend ihrem Schnittstellentyp realisiert.

### 6.1.1 Modellierung des Verhaltensmodells

Das generelle Vorgehen (vgl. Abbildung 6-3) beim Modellieren eines Verhaltensmodells beginnt mit der Identifikation der Elemente der P-Schicht. Hierin sind alle E/A beschrieben, welche vom Steuerungssystem für die vorliegende Baugruppe erwartet wird. Diese sind Baugruppenklassenspezifisch und mit entsprechenden Betriebsmittelkennzeichen benannt. Diese E/A werden im Verhaltensmodell angelegt, um später die Kommunikation mit dem Steuerungssystem herzustellen.

Im nächsten Schritt wird die F-Schicht der Baugruppe identifiziert. Hierin ist die Funktionalität der Baugruppe beschrieben. Entsprechend werden Funktionsmodelle angelegt, welche von den E/A der P-Schicht gesteuert werden.

Die C-Schicht liefert Querbeziehungen und Abhängigkeiten, welche innerhalb des Modells der virtuellen Maschine zu realisieren sind.

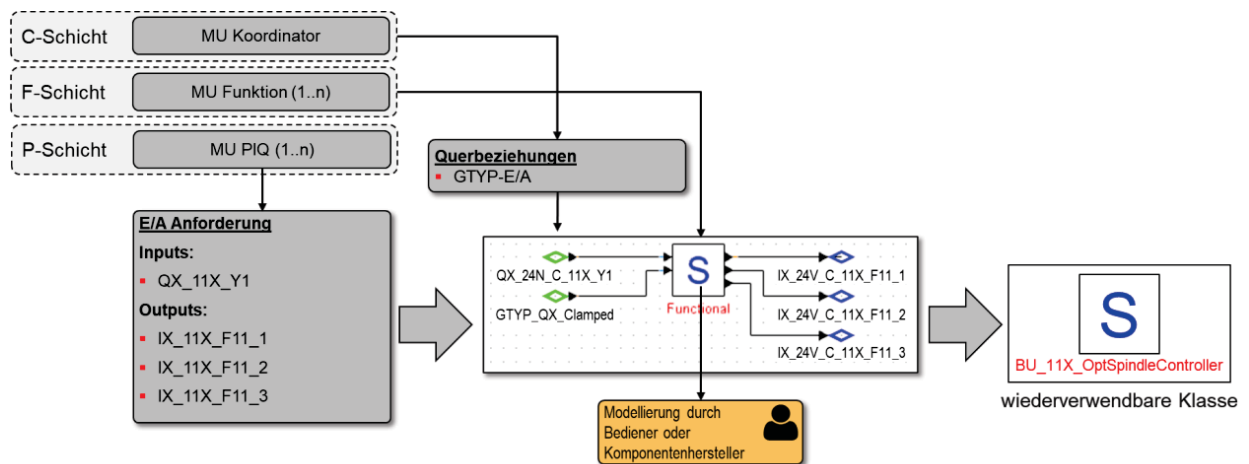


Abbildung 6-3: Vorgehen bei der Modellierung eines Verhaltensmodells

Zunächst soll nach diesem Vorgehensmodell die Baugruppe MU\_11X\_Basic modelliert werden. Die Basic-Baugruppe der Funktionsbaugruppe FU\_111 stellt die Basisfunktionalität der Funktionsbaugruppe dar. Für die Modellierung bedeutet dies, dass sie die Antriebsumrichter für die A- und die C-Achse des Spindelkopfes enthält. Hinzu kommen Taster, Sensoren und Aktoren, welche weitere Basisfunktionalitäten anbieten.

Im Beispiel kommt für die A- und die C-Achse je ein Antriebsumrichter zum Einsatz. Beispielhaft ist dieser in Abbildung 6-4 modelliert. Aus Steuerungssicht wird dem Antriebsumrichter ein Soll-Wert vorgegeben, auf welchen der Antrieb vom Antriebsumrichter gebracht werden muss. Dies kann die Vorgabe eines Drehmomentes, einer Geschwindigkeit oder einer Position sein. Für den Spindelkopf soll die Vorgabe einer Soll-Position genutzt werden. Als Rückgabewerte liefert ein Antriebsumrichter den aktuellen Ist-Wert des Antriebes (Drehmoment, Geschwindigkeit oder Position). Hinzu kommt der „Schleppabstand“ genannte Wert, der die Differenz zwischen dem vorgegebenen Soll-Wert und dem aktuellen Ist-Wert darstellt.

Die virtuelle Baugruppe berechnet zwischen dem Soll- und dem Ist-Wert das Verhalten des Antriebsumrichters bzw. dem Antrieb. Dieses ist abhängig vom ausgewählten Messsystem (Absolutwert- oder Relativwertgeber, direkt oder indirekt), dem eingesetzten Getriebe, der Maschinendynamik und dem mechanischen Verfahrensweg.

Beim Einsatz eines Absolutwertgebers muss berücksichtigt werden, dass diese nicht immer den Versatz zwischen logischem Null-Punkt und Mess-Nullpunkt berücksichtigen. Dies wird dann meist im Antriebsumrichter selbst korrigiert. Dieser Versatz wird als Parameterwert im Antriebsumrichter hinterlegt und vor Verarbeitung des Soll-Wertes auf den vom Steuerungssystem vorgegebenen Soll-Wert aufaddiert. Diese Funktionalität des Antriebsumrichters ist im Modellblock „AbsPosOffset“ modelliert.

Im Modell-Block „Gears“ wird das Getriebe modelliert. Je nach Modellierungstiefe genügt das reine Übersetzungsverhältnis zwischen Gebtriebean- und Getriebeabtrieb unter Vernachlässigung des Gebtriebeumkehrspiels oder anderer Ungenauigkeiten.

Die Maschinendynamik wird bei der virtuellen Inbetriebnahme oft vernachlässigt, da hierfür meist eine idealisierte Antriebseinheit genügt. Es kann aber für eine Betrachtung eines Sonderfalls durchaus interessant sein, die Dynamik der Antriebseinheit unter Berücksichtigung der angetriebenen Masse zu berechnen. Diese Modellierung wird in den Modell-Block „Dynamics“ integriert.

Der Modell-Block „EndStop“ stellt den mechanischen Anschlag der Achseinheit dar. Endschalter und Referenznocken werden im Modell-Block „Switches“ modelliert.

Das Kinematikelement der Achseinheit über eine Einheitenumrechnung („UnitConversion“) an den Wert der Ist-Position verbunden. Die Einheitenumrechnung ist notwendig, da Steuerungssysteme oft Soll-Werte mit Einheit [0.1  $\mu\text{m}$ ] ausgeben, Simulationstools aber oft mit der Einheit [mm] oder [m] arbeiten. Als kinematischen Eingangswert erhält das Kinematikelement den Positions- und Orientierungswert des vorausgegangenen Elementes (DE0). Als Ausgabewert liefert es den Positions- und Orientierungswert des kinematischen Abtriebes des Kinematikelements (DE1).

Da zu Beginn spezifiziert wurde, dass die Antriebseinheit von einem Antriebsumrichter mit Sercos-Profil versorgt wird, muss das Steuerwort des Steuerungssystems entsprechend interpretiert werden. Hierfür bietet ISG-virtuos bereits ein entsprechendes Element an. Ein dem Steuerwort entsprechendes Statuswort wird generiert und ausgegeben.

Die so modellierte Achseinheit kann nun als Referenz-Achseinheit verstanden werden und überall dort verwendet werden, wo eine Achseinheit zum Einsatz kommen soll.

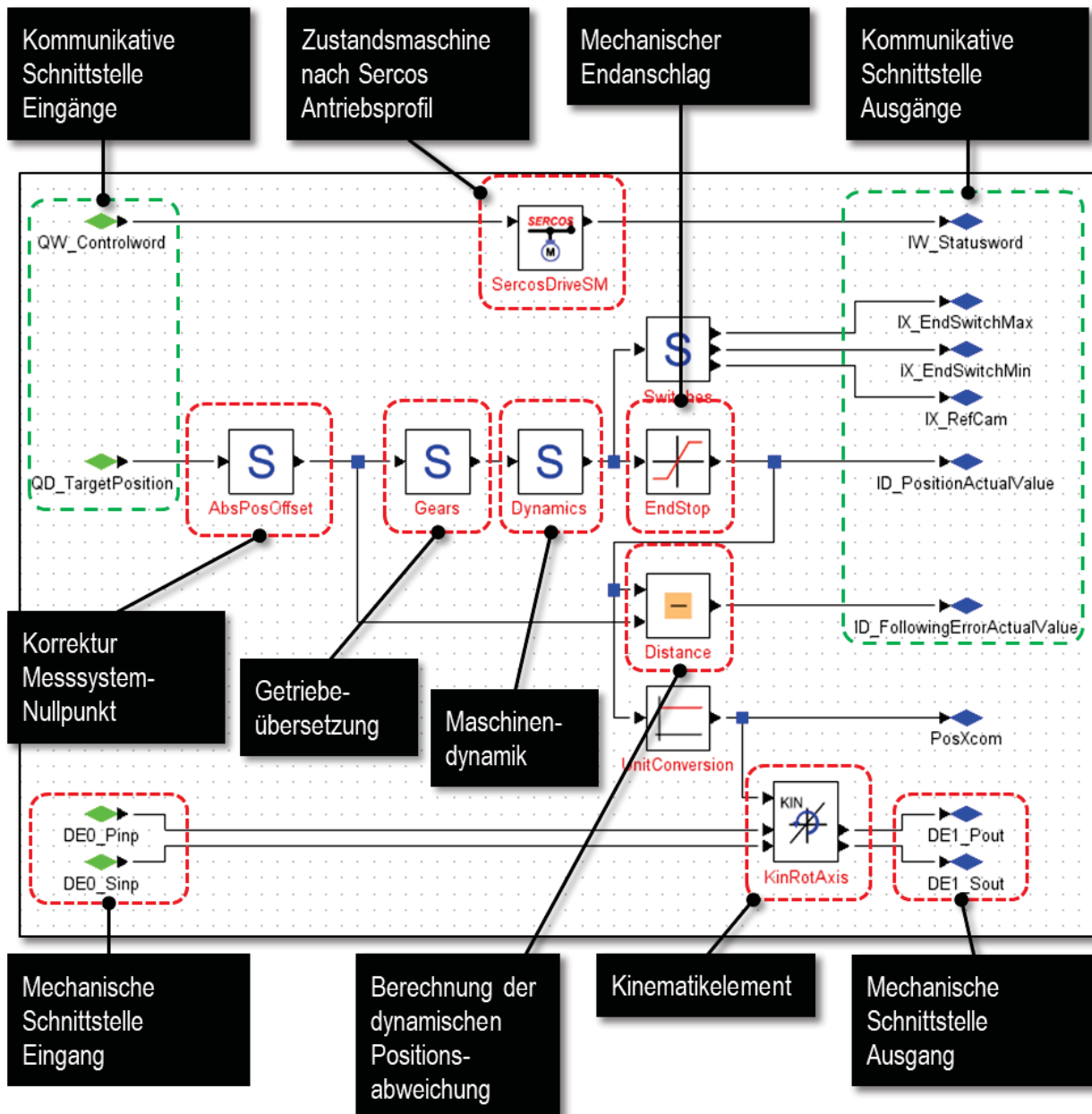


Abbildung 6-4: Modellierung einer Rotationsachse mit Sercos-Antriebsumrichter

Die Modellierung einer Baugruppe muss nun so erfolgen, dass diese wiederverwendbar als Klassenmodell abgelegt werden kann. Dies bedeutet, dass die Baugruppe über eine klassenspezifische neutrale kommunikative, funktionale, mechanische und energetische Schnittstelle verfügen muss.

Das Klassenmodell der „MU\_11X\_Basic“ setzt sich nun aus den Verhaltensmodellen der beiden Achseinheiten, sowie einer neutralen kommunikativen und mechanischen Schnittstelle zusammen. Eine funktionale und energetische Schnittstelle soll bei der angestrebten Modellierungstiefe nicht abgebildet werden.

## 6 Realisierung

Die kommunikative Schnittstelle setzt sich zusammen aus der P-Schicht der Baugruppenklasse (Feldbus-E/A) und den für das virtuosM-Modell benötigten Kommunikations-E/A.

Die mechanische Schnittstelle besteht aus dem Flanschkoordinatensystem „11X\_DE0“, an welchem der Spindelkopf befestigt ist und dem Aufnahmepunkt einer Spindel an der Spannzange „11X\_DE\_Spindelaufnahme“.

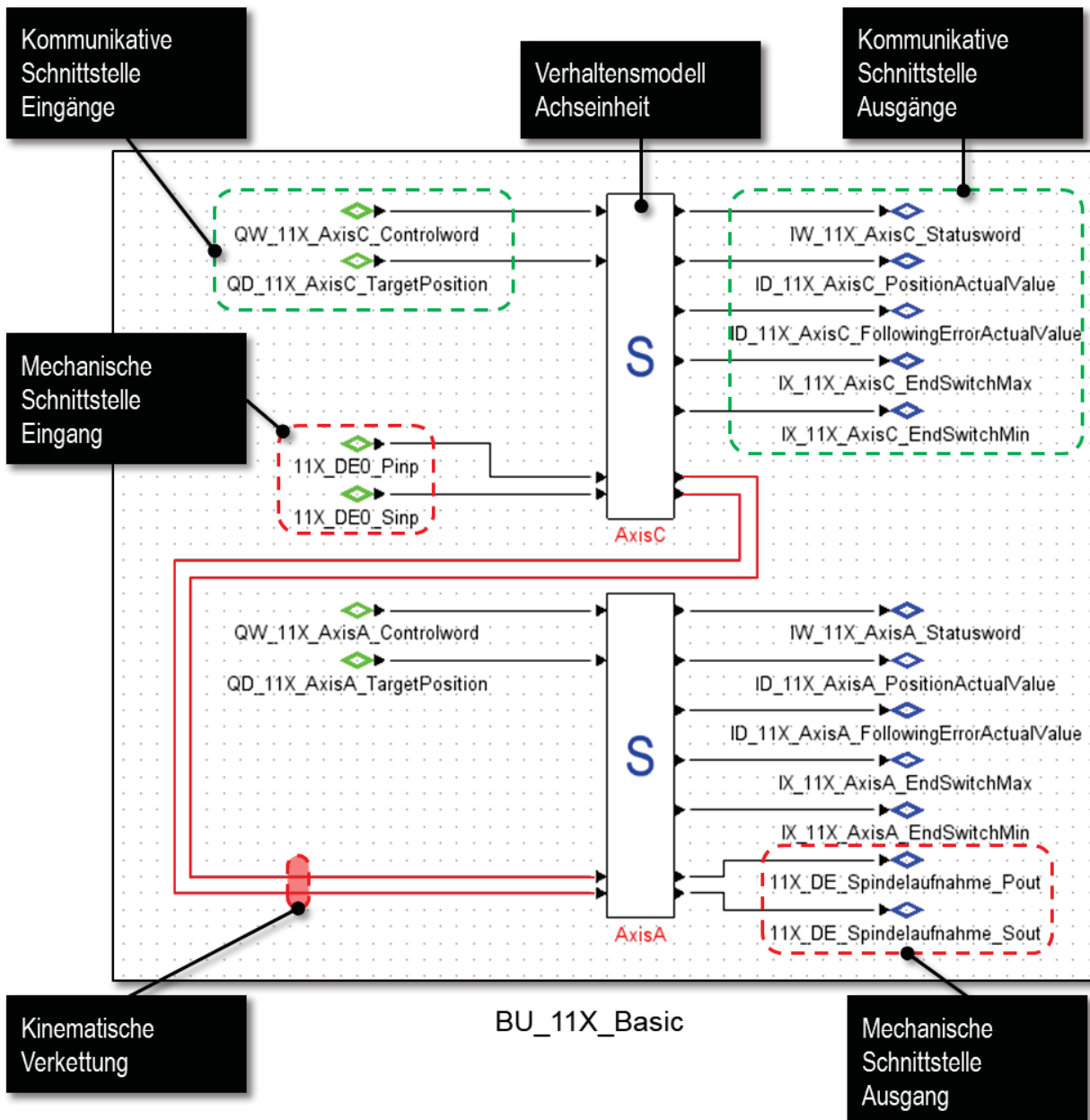


Abbildung 6-5: Beispielhafte Modellierung der MU\_11X\_Basic

Auf dieselbe Weise werden die Baugruppen Spindelschwingungssensor (MU\_11X\_OptSpindleOscillation), Werkzeug-Spannzangensteuerung (MU\_11X\_Opt-



## 6.2 Ergänzung einer CPS „Materialflusselement“ durch ein Verhaltens- und ein Geometriemodell

Ein weiterer häufig vorkommender Fall ist die Simulation von Materialflüssen. Die Konstruktion von Materialflüssen unterscheidet sich deutlich von der Konstruktion von Maschinen: Die Konstruktion von Maschinen basiert auf der mechanischen Sicht auf das Gesamtsystem. Anhand funktional wichtiger Punkte wird ein Skelettmodell aufgebaut. Anhand der Skelettpunkte und der Definition von Verbauungsräumen können so schnell und effizient (Funktions-)Baugruppen konzipiert werden.

Bei der Materialflusskonstruktion liegt der Fokus auf dem Materialfluss selbst. Oft wird dieser sogar ausschließlich in 2D konzipiert. Die mechanische Konstruktion folgt anschließend und passt sich den Umgebungsbedingungen an. Deutlich sichtbar ist dies an der Konstruktion von Förderbändern. Diese besitzen eine Lauffläche, die den Materialfluss ermöglicht. Die Mechanik darunter dient der Nivellierung und Ausrichtung der Lauffläche. Die mechanische Schnittstelle lässt sich somit nicht über die Flanschstellen abdecken, da diese sich individuell verschieben. Das bedeutet also, dass die funktionale Schnittstelle (der Materialfluss selbst) und die mechanische Schnittstelle (mechanische Verkettung der Materialflusselemente) zusammenfallen müssen.

Abbildung 6-7 stellt das Geometriemodell des betrachteten Materialflusselementes dar. Der funktionale Nullpunkt des Materialflusses DE0 befindet sich am Beginn des Förderelements auf der in Flussrichtung rechten Seite. Entsprechend sitzt der funktionale Übergabepunkt DE1 am Ende des Förderbands. Hierbei ist zu beachten, dass die Koordinatensysteme passend zur Materialflussrichtung gewählt werden. Es hat sich etabliert, dass die Flussrichtung stets in X-Richtung verläuft. Gemäß der Definition eines rechtsseitigen Koordinatensystems ist so die Y-Richtung quer zur Materialflussrichtung, die Z-Richtung verläuft vertikal nach oben.

Am Förderelement sind Schienen zur Führung des Materialflusses, aber auch zur Montage von weiteren Baugruppen, wie Sensorik vorgesehen. Diese besitzen ebenfalls ein Docking Element am Beginn der Schiene („DE\_Schiene\_rechts“ bzw. „DE\_Schiene\_links“). Bei der Definition des Docking Elements wurde zusätzlich zur Position auch der lineare Freiheitsgrad in Schienenrichtung definiert. Dieser Freiheits-

grad beschreibt die minimale und maximale Offset-Position eines nachfolgenden Elements, sowie eine mögliche Rasterung der Offset-Positionen (bspw. Montagemöglichkeit alle 10 mm ausgehend vom Docking Element). Bei einem Freiheitsgrad, der eine Rotation des nachfolgenden Elements ermöglicht, kann ein minimaler und ein maximaler Rotationswinkel oder aber eine Rasterung (bspw.  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) vorgegeben werden. Bei Flanschstellen ist dies oft der Fall.

Das selbe Konzept findet bei Kurven- oder Weichenelementen Anwendung. Abbildung 6-8 stellt dies für ein Kurven-Element dar. Durch die  $180^\circ$ -Wendung des Materialflusses um die Z-Achse sind „DE1“ und „DE\_Schiene\_links“ um  $180^\circ$  um Z gedreht.

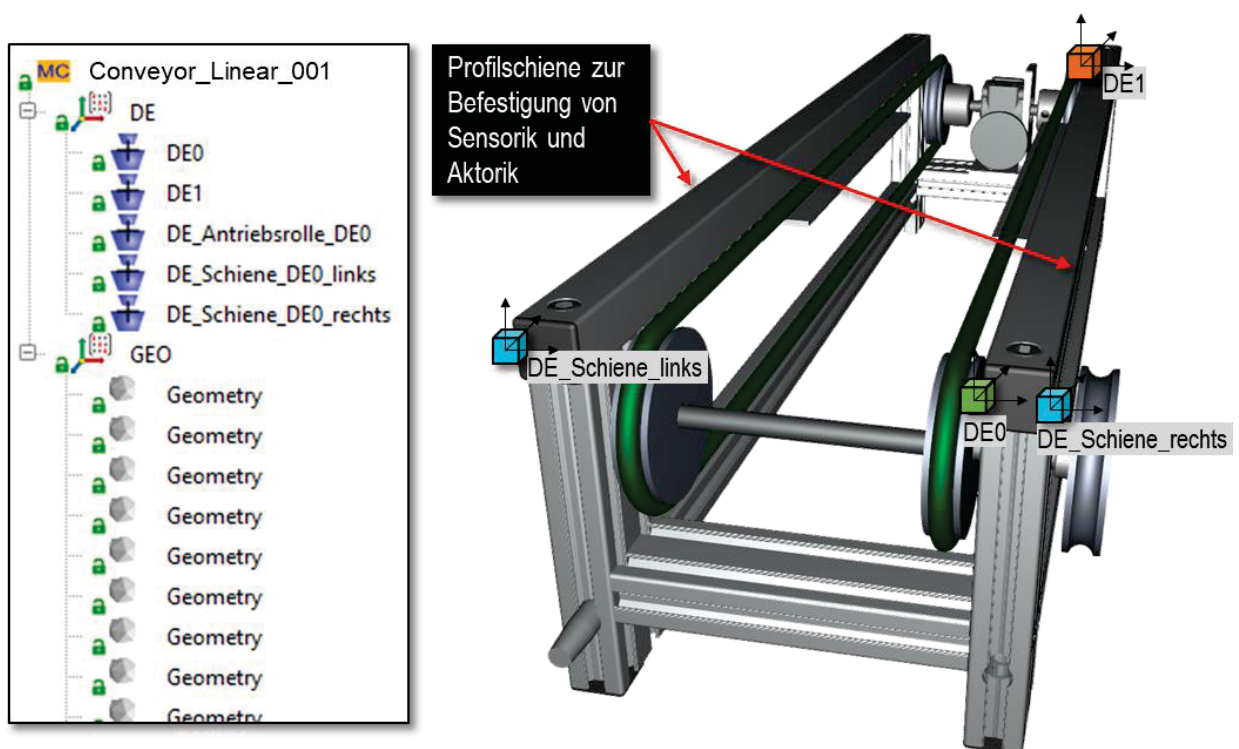


Abbildung 6-7: Geometriemodell des Linear-Elements

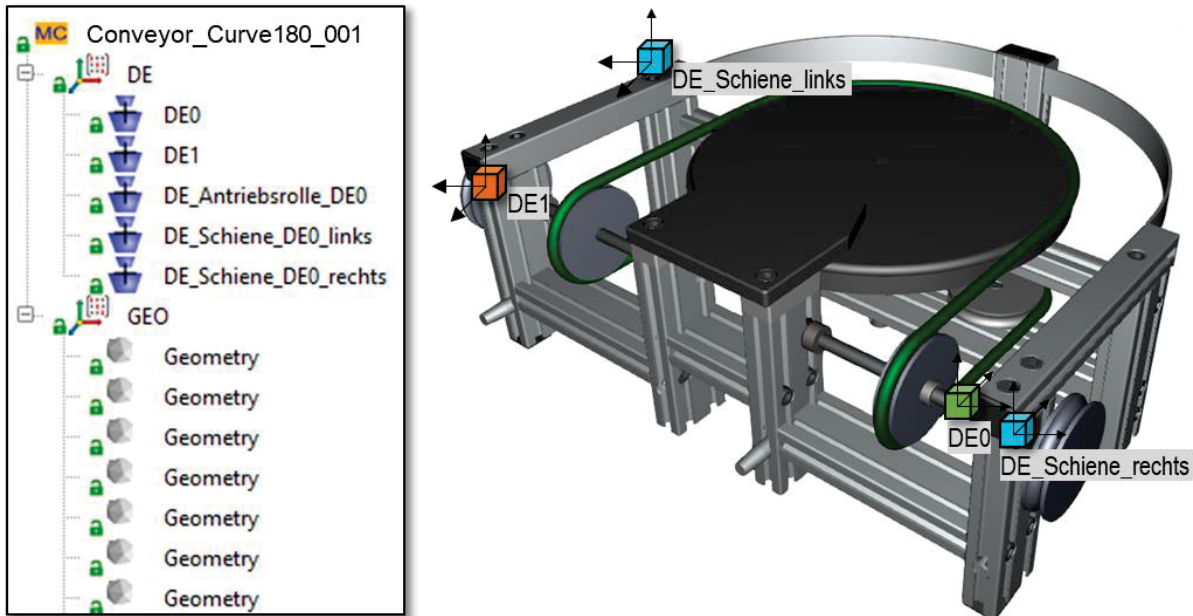


Abbildung 6-8: Geometriemodell des Kurven-Elements

Das Verhaltensmodell richtet sich nun nach der Modellierung des Geometriemodells. Abbildung 6-9 stellt dies schematisch dar. Die einzelnen Materialflusselemente sind als Baugruppen modelliert. Diese besitzen ausschließlich mechatronischen Schnittstellen nach Kapitel 5.1. Die Verkettung der Geometriemodelle spiegelt sich in der Verkettung der Verhaltensmodelle über die mechanische Schnittstelle wieder. Hinzu kommt eine funktionale Schnittstelle, welche den Materialfluss, als funktionale Eigenschaft des Elements realisiert.

Auf dieselbe Weise werden auch weitere Elemente wie Sensorik modelliert. In Abbildung 6-9 wird der Sensor „Conveyor\_Sensor\_0001\_02“ an das Verhaltensmodell der Linear-Einheit an „DE\_Schiene\_rechts“ verbunden. Über einen Positionierungsoffset erhält der Sensor seine Position auf der Montageschiene.

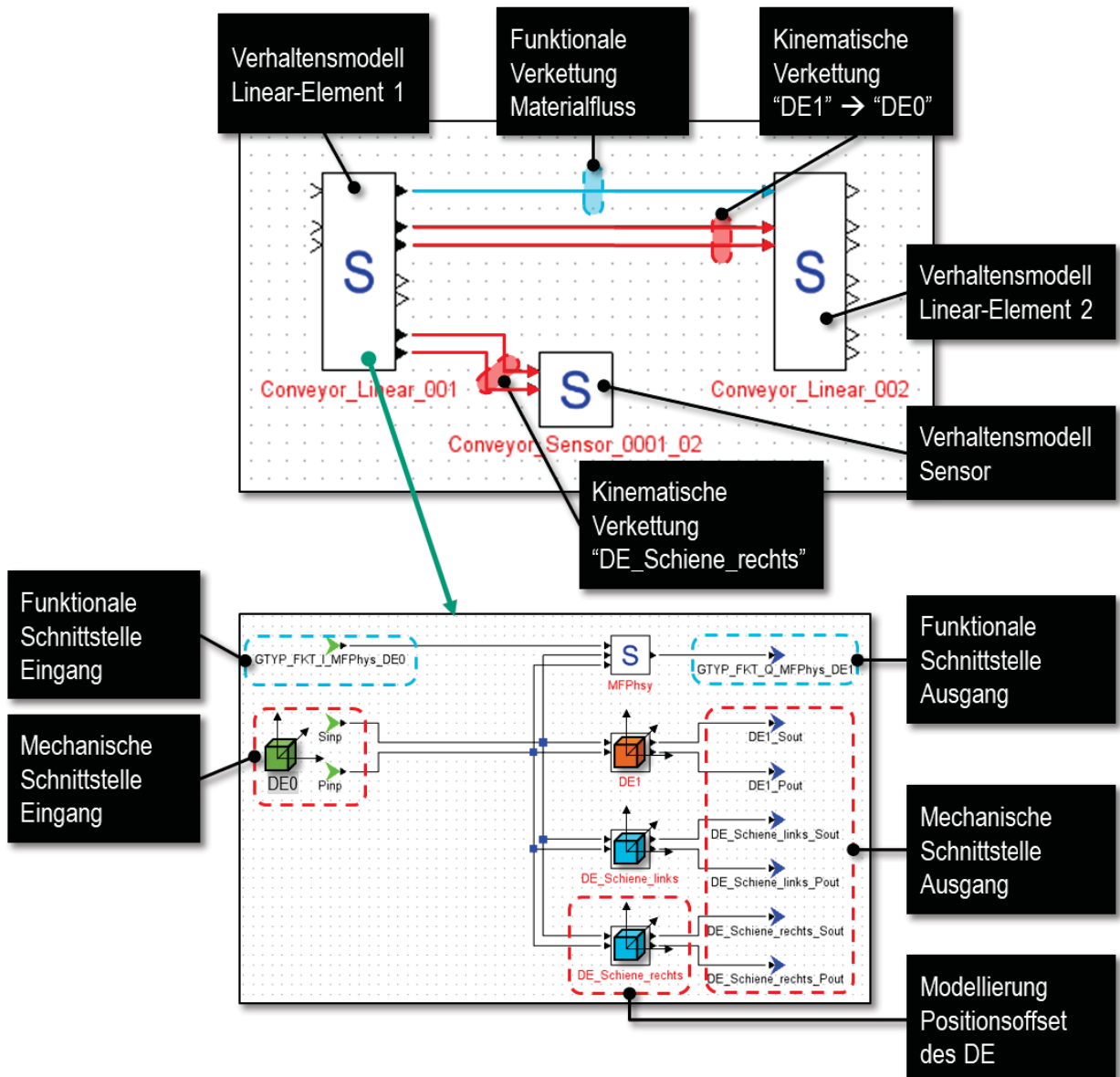


Abbildung 6-9: Modellierung des Verhaltensmodells von Materialflussanwendungen

So modellierte Materialflusselemente können nun miteinander kombiniert werden. Abbildung 6-10 stellt eine Förderanlage für den Rundtransport von Werkstücken dar. Zwei Lasersensoren zur Werkstückerkennung sind am ersten Linear-Element befestigt. Zur Wahrung Übersichtlichkeit wurden keine weiteren Elemente verbaut.

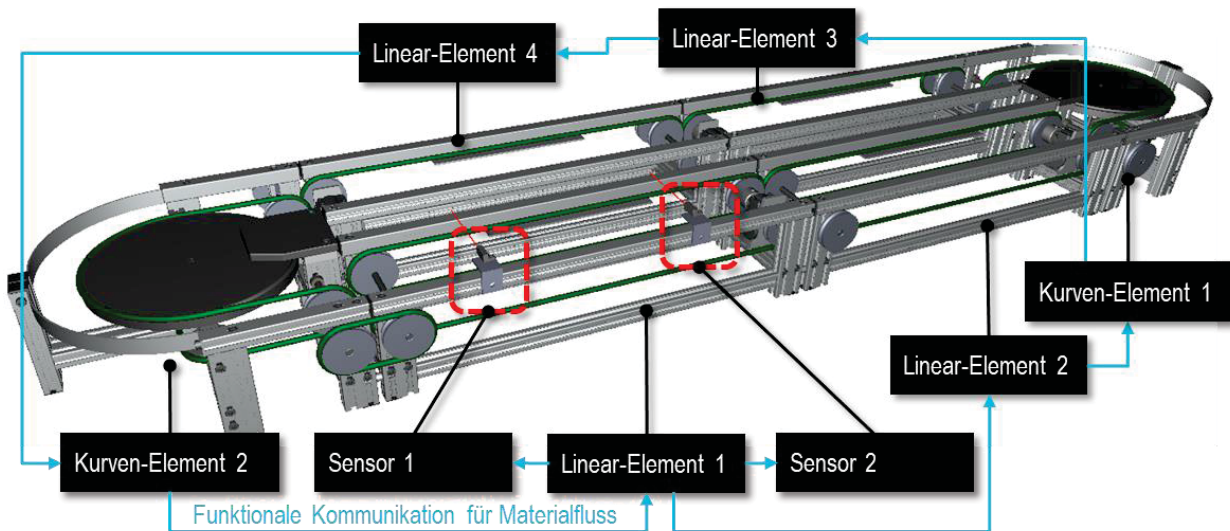


Abbildung 6-10: Gesamtaufbau der Förderanlage aus 4 Linear-Elementen, zwei Kurven-Elementen und zwei Werkstücksensoren

### 6.3 Ergänzung von CPS für Werkzeuge und Werkzeugaufnahmen

Werkzeugspannsysteme für das automatisierte Wechseln und Handhaben von Werkzeugen sind in unterschiedlichen Normen genormt. Die DIN 69871 (DIN 69871-1) als traditionelle Schnittstelle für Frässpindeln zeichnet sich durch ihre äußerst robuste Konstruktion aus und wird daher oft verwendet. Die DIN 69871 wurde im Juli 2014 durch die nun geltende (DIN ISO 7388-1) ersetzt. In Abbildung 6-11 ist ein solch normierter Werkzeugschaft dargestellt. Die gesamte Konstruktion bezieht sich auf die mit „Bezugsebene“ markierte Ebene. In der Aufnahmeebene befindet sich eine Einfräsung, über welche der Werkzeugschaft an Werkzeugablageplätzen aufgenommen werden kann.

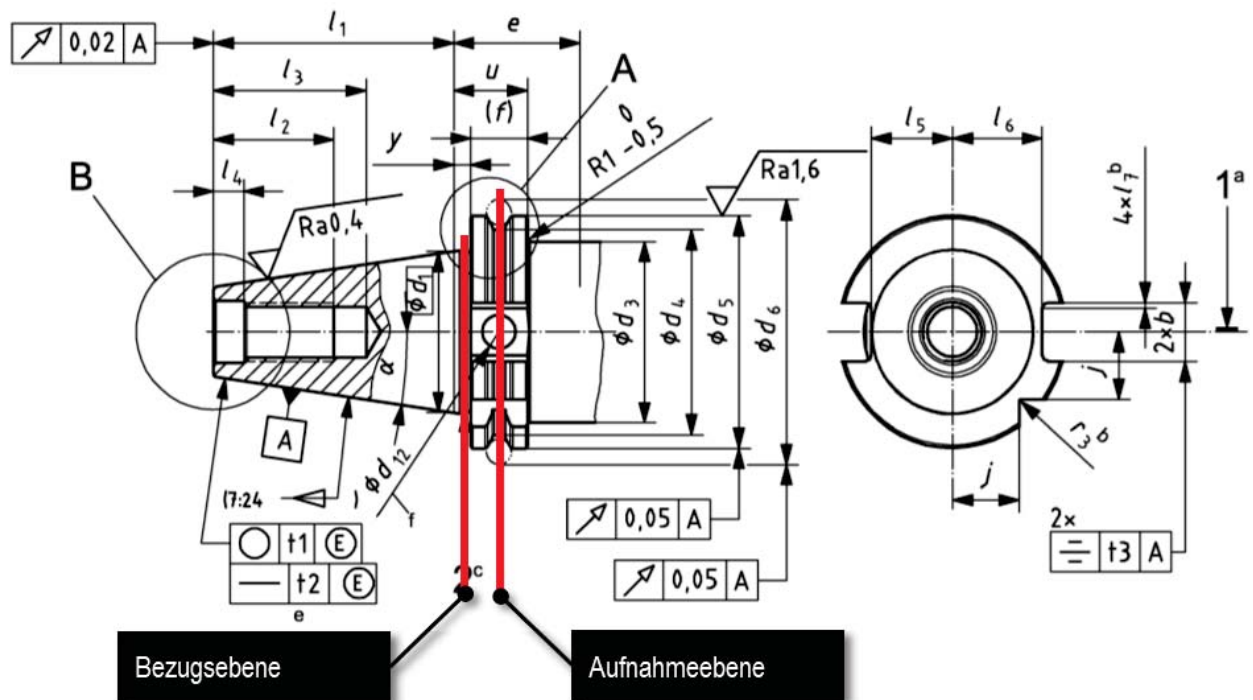


Abbildung 6-11: Konstruktionszeichnung eines Werkzeugschaftes mit Kegel 7/24 nach (DIN ISO 7388-1)

Auf Seite der Werkzeugaufnahme wurde in der (DIN 4003-172) festgelegt, wie diese zu konstruieren sind. Die Lage des PCS-Koordinatensystems (Bauteilnullpunkt, Primäres Koordinatensystem, engl. „primary coordinate system“) im 3D-Modell eines Werkzeugs muss eindeutig definiert sein. Nach ISO/TS 13399-50:2007 ist die Nulllage für Aufnahmen und Schäfte festgelegt. Abbildung 6-11 stellt dies für eine gerade Werkzeuginheit nach (DIN 4000-172) mit der Definition der Koordinatensysteme nach (DIN 4003-172) dar. Die Bezugsebene für die Werkzeugaufnahme fällt mit der Bezugsebene des Werkzeugschaftes aus Abbildung 6-11 zusammen. Das Werkstück-Bezugskoordinatensystem, in DIN 4003-172 „CSW“ (engl. „coordinate system workpiece side“) genannt, liegt in dieser Ebene und der rotationssymmetrischen Mitte des Werkstücks.

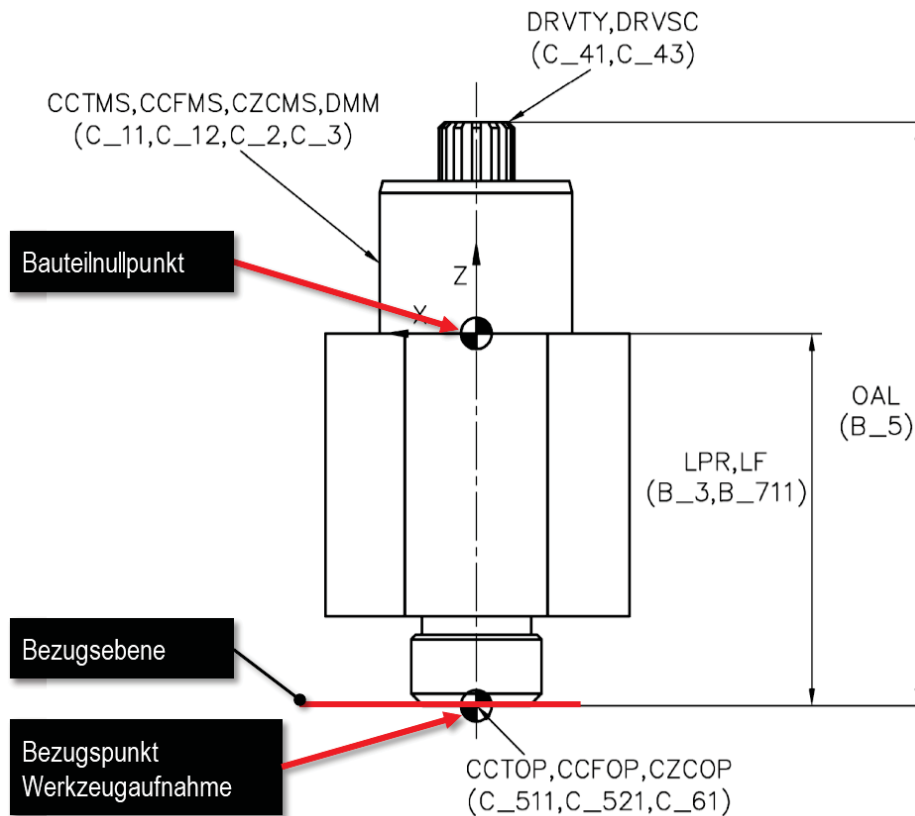


Abbildung 6-12: Koordinatensysteme an einer Werkzeuginheit nach DIN 4003-172 (DIN 4003-172)

Übertragen auf das Schnittstellenkonzept aus Kapitel 5.1 bedeutet dies, dass die DIN-Normen für die Konstruktion von Werkzeugaufnahmen und Werkzeugschäften die funktionale Sicht berücksichtigt. Funktionale und mechanische Schnittstelle fallen also im CSW zusammen. Für die virtuelle Maschine stellt das Werkzeughandling ebenfalls eine funktionale Schnittstelle dar. Querverbindungen zwischen den Werkzeug-Elementen werden daher funktional ausgeprägt und so das Werkzeug von einem Werkzeug-Element auf das andere übergeben.

Abbildung 6-13 stellt die Realisierung des Werkzeughandlings an einem Werkzeugteller eines Werkzeugwechslers dar. Die Ablageplätze der Werkzeuge besitzen jeweils eine Aufnahmeebene und eine Bezugsebene. In der Mitte der Aufnahmeplätze liegt auf jeder dieser beiden Ebenen ein Referenzpunkt. Der Referenzpunkt der Bezugsebene stellt die funktionale Schnittstelle dar. Bezugs- und Aufnahmeebene entsprechen denen des Werkzeugs nach (DIN ISO 7388-1) in Abbildung 6-11.

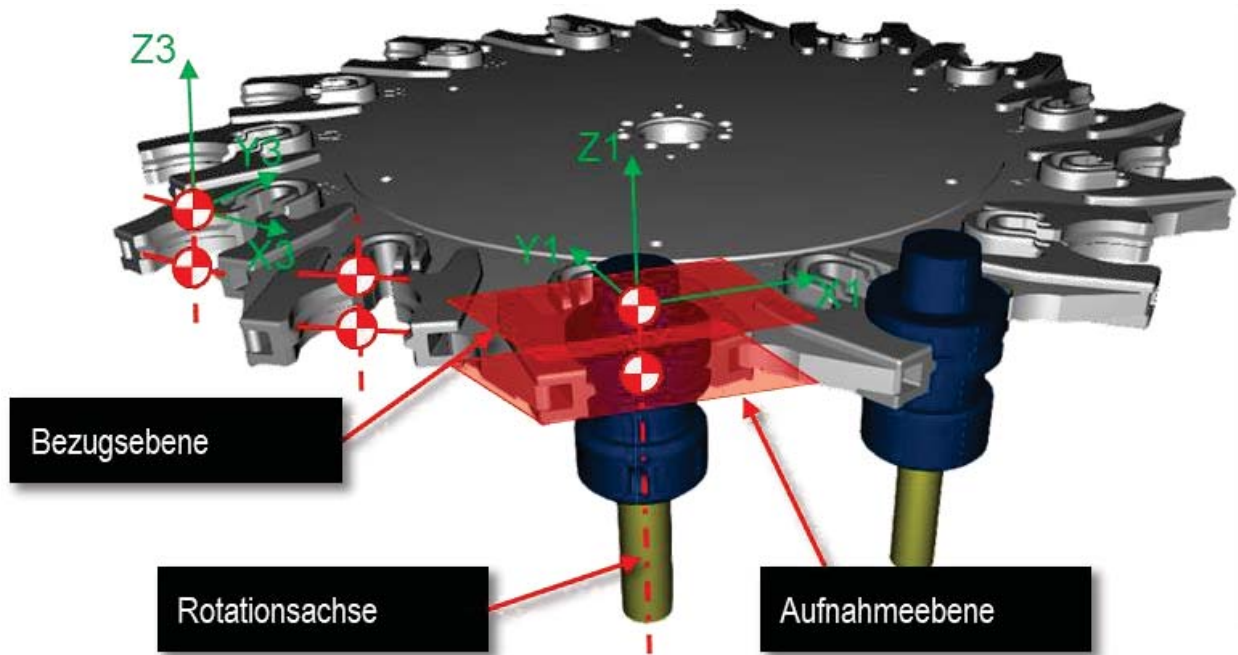


Abbildung 6-13: Übertragen der DIN-Normen auf den Teller eines Werkzeugwechslers. Die funktionalen Schnittstellen des Werkzeugwechslers liegt auf der Bezugsebene

## 6.4 Realisierung des Modellgenerators

Um die Erstellung einer virtuellen Maschine zu automatisieren, wurde ein Modellgenerator in Kapitel 5.7 konzipiert. Wichtig hierbei war, dass der Modellgenerator toolunabhängig realisiert wird. Durch geeignete Plug-Ins soll er an die unterschiedlichen Tools zur virtuellen Inbetriebnahme und auch an Steuerungssysteme angekoppelt werden können. Viele Tools und auch Steuerungssysteme bieten hierfür eine Programmierschnittstelle, kurz API genannt (engl. „Application Programming Interface“).

Für die Umsetzung wurden die folgenden Rahmenbedingungen festgelegt:

- Für die Simulation der virtuellen Maschine wird ISG-virtuos genutzt. Der Generator für die virtuelle Maschine verwendet daher die von ISG-virtuos angebotenen Schnittstellen zur Automatisierung der Modellerstellung. Dies sind eine Modellbeschreibung im XML-Format, sowie eine Remote-Schnittstelle in Form einer API.

- Die Anbindung an das Feldbussystem erfolgt durch die Windows-Echtzeiterweiterung Beckhoff TwinCAT 3.1 (Beckhoff 2012). Die Konfiguration des TwinCAT-Systems wird im Folgenden „TwinCAT-Slave“ genannt.
- Das Steuerungssystem basiert ebenfalls auf Beckhoff TwinCAT 3.1 und ist auf einem dedizierten PC-System ausgelagert.
- Als Feldbussystem kommt EtherCAT (ETG 2017-09) zum Einsatz. Das Ethernet-basierte Feldbussystem wird über eine Feldbusbeschreibungsdatei im XML-Format, der sog. EtherCAT Network Information, kurz „ENI“, definiert.
- Zur automatisierten Konfiguration und Parametrierung der TwinCAT-Systeme bietet Beckhoff das TwinCAT Automation Interface (AI) an (Beckhoff 2015). Dieses soll genutzt werden, um automatisch die TwinCAT-Slave-Konfiguration und die TwinCAT-Steuerungskonfiguration zu erstellen.
- Die zur Konfiguration und Parametrierung des Steuerungssystems, sowie die zur Erstellung der virtuellen Maschine benötigten Daten und Modelle werden aus einer zentralen Datenbasis entnommen. Hier sind sie als CPS abgelegt.
- Die Auswahl der CPS wurde von einem Projektierungstool vorgenommen und wird dem Modellgenerator als Kommissionierungsliste präsentiert.

Abbildung 6-14 stellt den geplanten Ablauf des Modellgenerators dar, wie er in der Konzeption in Kapitel 5.7 beschrieben wurde. Umgesetzt wurde der Modellgenerator in der Programmiersprache C#, welche im Maschinen- und Anlagenbau häufig für die Realisierung von Automatisierungsaufgaben an Steuerungssystemen eingesetzt wird. Eine entsprechende API wird häufig von Steuerungssystemen zur Konfiguration und Parametrierung zur Verfügung gestellt. Ebenso bietet ISG-virtuos eine API, sowie die Möglichkeit eine Modellbeschreibung im XML-Format zu interpretieren.

In einem ersten Schritt liest der Generator die Kommissionierungsliste der zu erstellenden Maschine ein. Aus der herstellerepezifischen Beschreibung der Maschinenzusammenstellung generiert er zunächst ein Metamodell, welches die in der Maschine vorhandenen Baugruppen enthält. Hieraus leitet er die benötigten Verhaltens- und Geometriemodelle ab, welche er aus einer Datenbasis bezieht. Er erzeugt eine Modellbeschreibung für das Geometriemodell und eine für das Verhaltensmodell im XML-

Format. Über die ISG-virtuos-API wird die Erstellung des Geometriemodells und des Verhaltensmodells aus der jeweiligen Modellbeschreibung beauftragt.

Über die Feldbusbeschreibungsdatei (ENI) wird der maschinenspezifische Aufbau des Feldbussystems beschrieben. Dieser ist durch die Anforderungen der P-Schicht der Gesamtmaschine vorgegeben, welche das Projektierungstool erstellt. Hieraus lässt sich der benötigte Feldbusaufbau ableiten.

Die ENI dient dem Generator zur automatisierten Ankopplung des Verhaltensmodells an das Steuerungssystem. Über die TwinCAT Automation Interface API kann die TwinCAT Slave Konfiguration erstellt werden.

Das zur Steuerung der (virtuellen Maschine) benötigte Steuerungssystem kann bei Bedarf ebenfalls vom Generator automatisiert konfiguriert und parametrierbar werden. Die benötigten POU der SPS sind über die Baugruppendefinitionen bekannt. Die Feldbusbeschreibung dient hier ebenfalls zum Aufbau des Feldbussystems. Die Konfiguration der CNC kann ebenfalls aus den Baugruppendefinitionen abgeleitet werden.

## 6 Realisierung

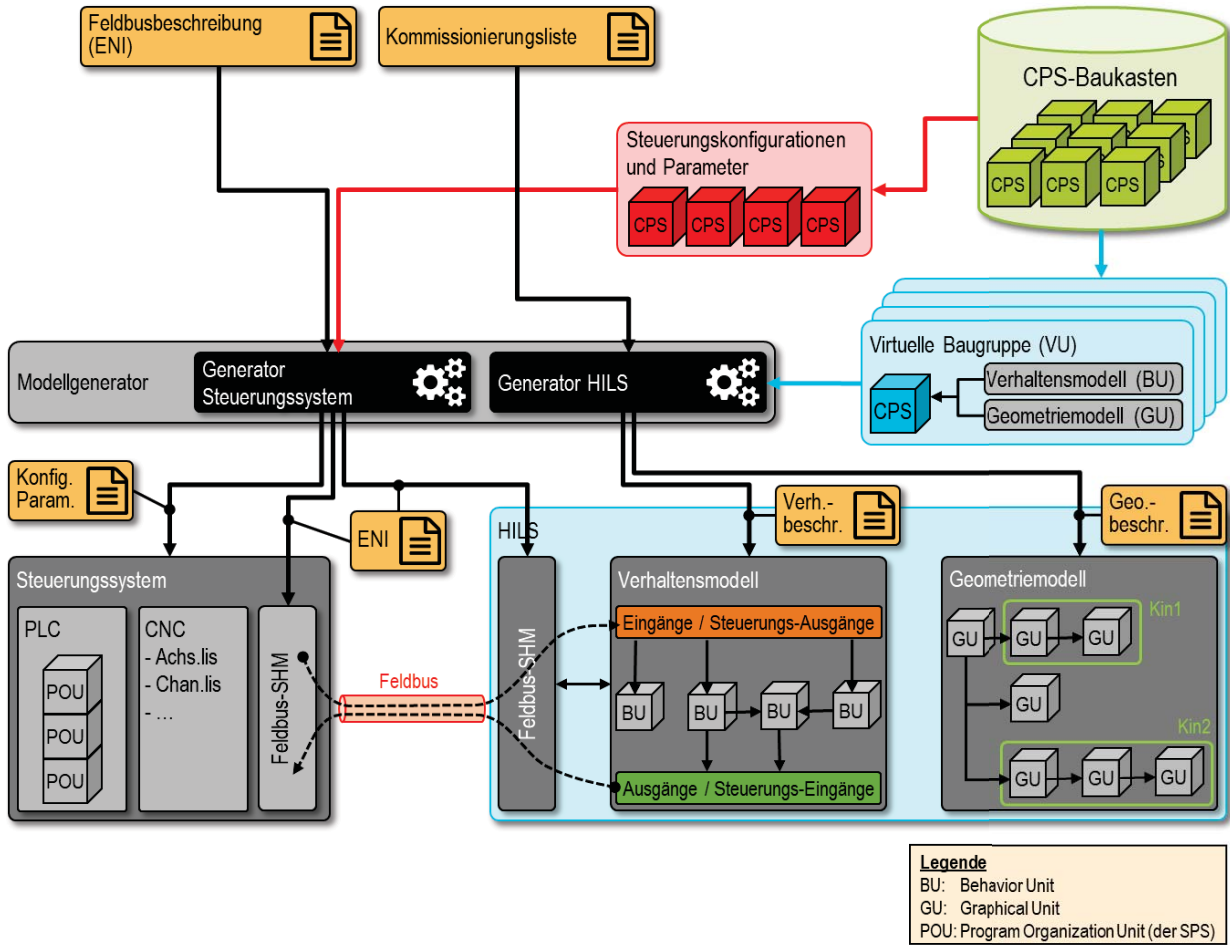


Abbildung 6-14: Ablaufplan des Modellgenerators ausgehend von einer Kommissionierungsliste



Im Folgenden soll an zwei komplexen Maschinen dieser Ablauf und damit die Konzeption und Realisierung verifiziert werden.

Bei der ersten Maschine handelt es sich um ein mechatronisches, modulares Bearbeitungszentrum (BAZ) mittlerer Bauform. Für die virtuelle Maschine interessant und daher für die Verifikation des Konzeptes relevant ist der mechanisch und kommunikativ komplexe Aufbau des BAZ. Hinzu kommt das Werkzeughandling, das nicht nur die Spindel, sondern auch mehrere Werkzeugwechsler bedienen muss.

Der Maschinenständer wird kundenspezifisch in der Länge und den Anbaumöglichkeiten entwickelt. Hinzu kommen diverse Optionen wie z. B. Aggregate und Werkzeugwechsler. Abbildung 7-2 stellt die Auswahl an Funktionsbaugruppen für diese konkrete Maschine dar, Abbildung 7-3 das fertige Geometriemodell.

Die konkrete Maschine besitzt die folgenden Kennzahlen:

- 49 Funktionsbaugruppen mit insgesamt 173 Baugruppen und 120 E/A
- 8 CNC-Achsen
- 2 x 4 Automatisierte Konsolentische mit jeweils 10 SPS-Achsen
- Werkstück-Anschlagreihe mit 5 SPS-Achsen
- Werkzeugwechsler mitfahrend am Portal, 14 Plätze, 2 SPS-Achsen
- Werkzeugwechsler mitfahrend an der Y-Achse, 10 Plätze, 3 SPS-Achsen
- Werkzeugwechsler stationär, 10 Plätze, 1 SPS-Achse
- Bohraggregat mit 27 Einzelachsen



Abbildung 7-2: Funktionsbaugruppen (CPS) der Kommissionierungsliste von Maschine 1

Der manuelle Aufbau der virtuellen Maschine wurde in 5 MW realisiert. Anschließend wurden die einzelnen Baugruppen nach dem Konzept dieser Arbeit modelliert und in eine Bibliothek wiederverwendbar abgelegt. Die manuelle Modellierung aus dieser Bibliothek heraus betrug anschließend 1 MW. Durch den Einsatz des für diese Arbeit realisierten Generators konnte die Erstellung der virtuellen Maschine incl. Ankopplung an das Steuerungssystem, unter Zuhilfenahme der Bibliothek, auf unter 3 Minuten reduziert werden.

Aufbau der virtuellen Maschine	Dauer
Manuell	5 MW
Manuell, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	1 MW
Automatisiert mit dem Generator, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	<b>3 Minuten</b>

Tabelle 3: Vergleich der benötigten Aufbauzeiten der virtuellen Maschine für Maschine 1

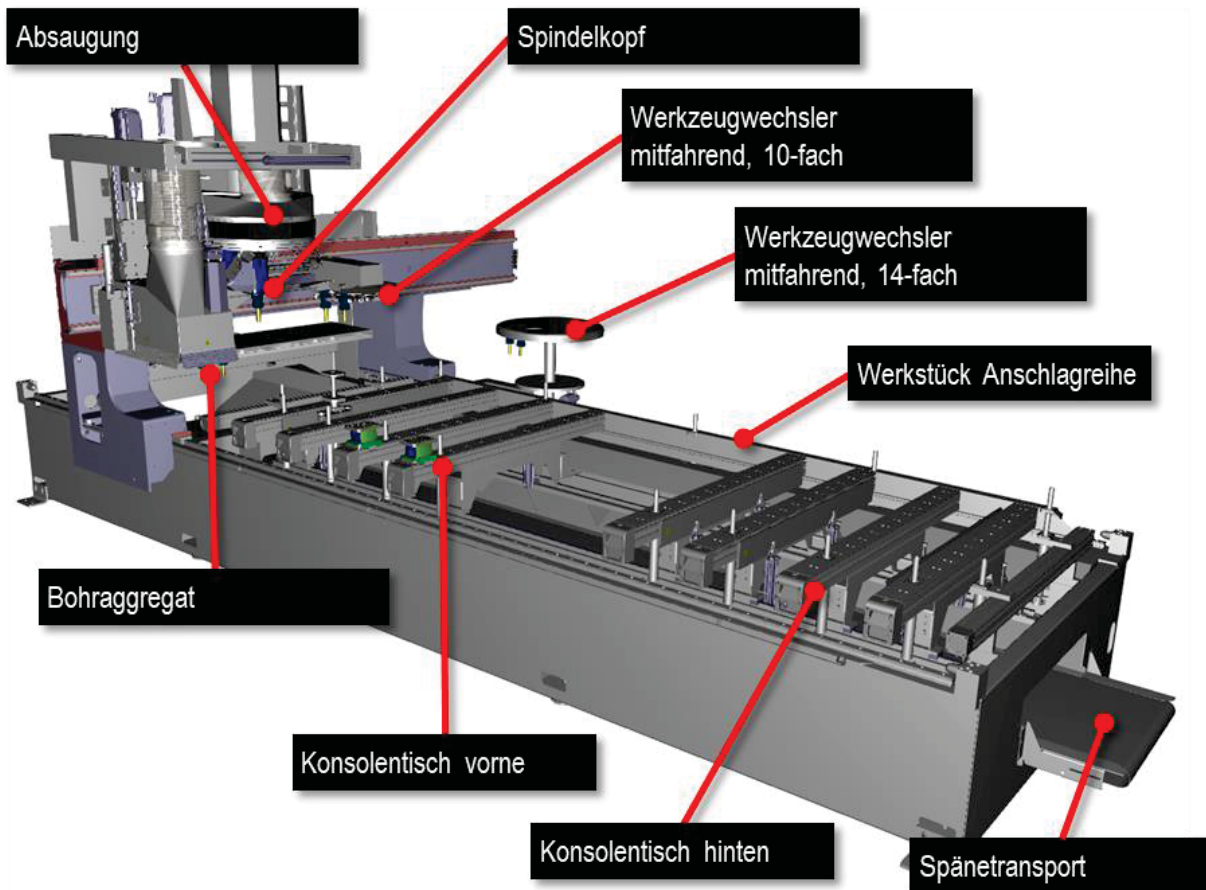


Abbildung 7-3: Automatisiert erstelltes Geometriemodell der Maschine 1 aus den virtuellen Funktionsbaugruppen von Abbildung 7-2

Bei der zweiten Maschine handelt es sich um ein mechatronisches, modulares Bearbeitungszentrum (BAZ) großer Bauform (vgl. Abbildung 7-4). Aktuell stellt sie den für eine Einzelmaschine höchsten Automatisierungsgrad dar. Für die virtuelle Maschine interessant und daher für die Verifikation des Konzeptes relevant ist der mechanisch und kommunikativ komplexe Aufbau des BAZ aber auch der integrierte Materialfluss und die Werkstückerkennung. Im Zulauf (engl. „Infeed“) wird das zu bearbeitende Roh-Werkstück zur Verfügung gestellt. Das BAZ gleicht anschließend die Eigenschaften des Roh-Werkstücks mit den hinterlegten Eigenschaften aus dem Bearbeitungsauftrag ab. Ist der Abgleich erfolgreich wird das Roh-Werkstück eingefördert und über ein Handlingsystem an den Bearbeitungsplatz gebracht. Anschließend erfolgt die Bearbeitung und die Ausförderung in den Auslauf (engl. „Outfeed“), wo das bearbeitete Werkstück abgegeben wird.

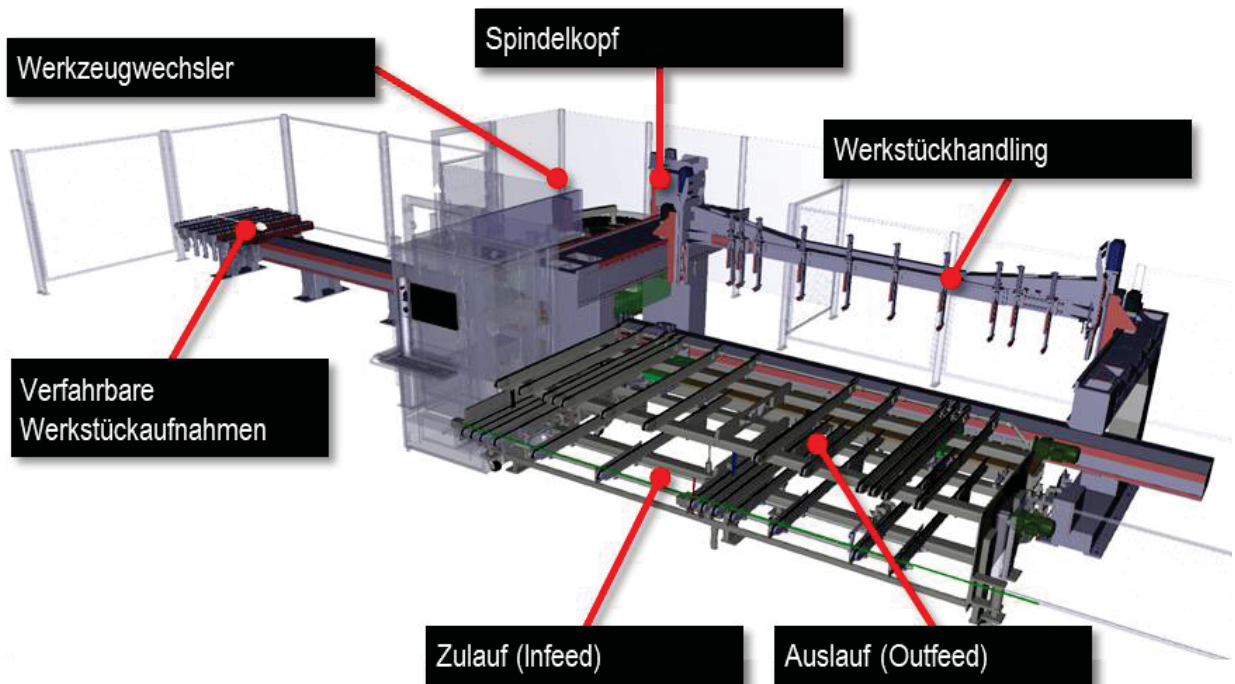


Abbildung 7-4: *Beispielmaschine aus virtuellen Baugruppen, Werkzeugverwaltung und Materialflusselemente*

Das BAZ besitzt die folgenden Kennzahlen:

- 29 Funktionsbaugruppen mit insgesamt 58 Baugruppen und 873 E/A, 42 funktionale Querbeziehungen
- 10 CNC-Achsen, 12 SPS-Achsen
- Automatisiertes Werkstückhandling, 15 SPS-Achsen, 2 CNC-Achsen
- Werkzeugwechsler, 2 Ebenen, 36 Plätze, 3 SPS-Achsen

Der manuelle Aufbau der virtuellen Maschine wurde in 6 MW realisiert. Wie auch bei Maschine 1 wurden anschließend die einzelnen Baugruppen nach dem Konzept dieser Arbeit modelliert und in eine Bibliothek wiederverwendbar abgelegt. Die manuelle Modellierung aus dieser Bibliothek heraus betrug anschließend 1 MW. Durch den Einsatz des für diese Arbeit realisierten Generators konnte die Erstellung der virtuellen Maschine incl. Ankopplung an das Steuerungssystem, unter Zuhilfenahme der Bibliothek, auf 3 Minuten reduziert werden.

Aufbau der virtuellen Maschine	Dauer
Manuell	6 MW
Manuell, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	2 MW
Automatisiert mit dem Generator, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	<b>4 Minuten</b>

Tabelle 4: Vergleich der benötigten Aufbauzeiten der virtuellen Maschine für Maschine 2

Für den abschließenden Test des Modellgenerators wurde ein Anlagenteil einer hochkomplexen Fertigungsanlage (Abbildung 7-5) für die vollautomatisierte Möbelfertigung generiert. Die Anlagenteile sind über Förderstrecken miteinander verbunden. Die Werkstücke werden von einem Transfer-Portal aus der Förderstrecke entnommen und in die Anlage eingebracht. Ein zweites Transfer-Portal führt die bearbeiteten Werkstücke wieder zurück auf die Förderstrecke. In der Anlage sind mehrere Bearbeitungsaggregate in Reihe miteinander verbunden, durch welche ein Werkstück fährt – möglicherweise auch mehrfach.

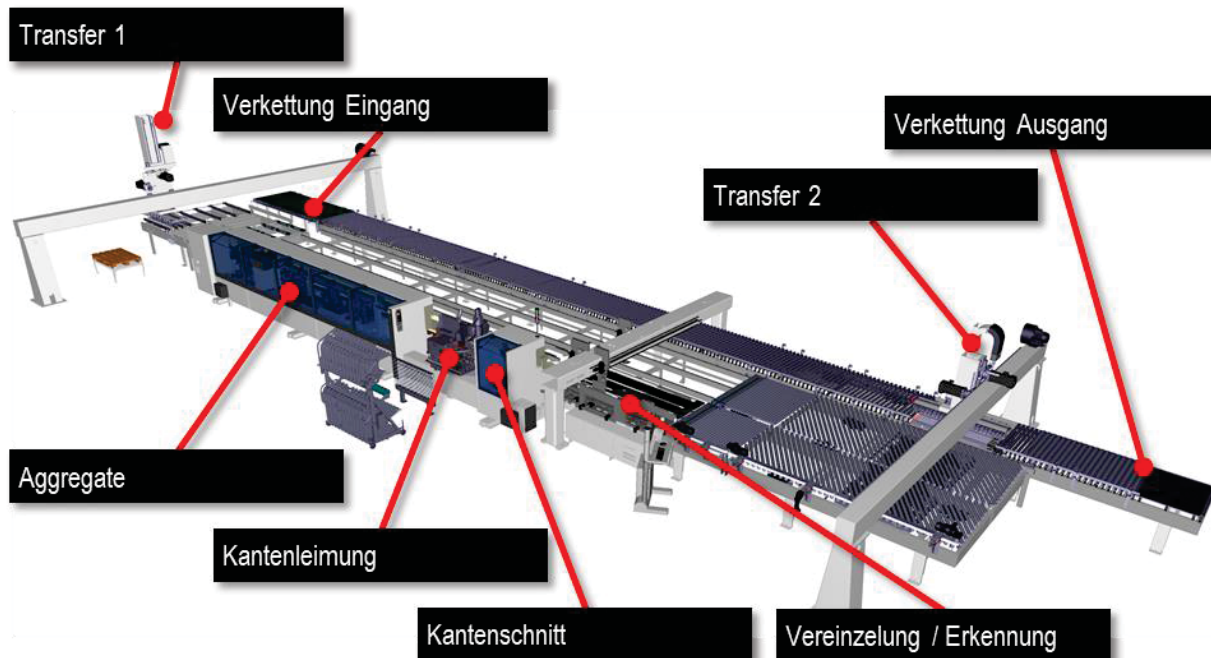


Abbildung 7-5: Anlagenteil einer Fertigungsanlage für die vollautomatisierte Möbelfertigung

## Technische Daten des Verhaltensmodells

- 246 Baugruppen in 53 Funktionsbaugruppen
- 3242 E/A (über mehrere Feldbussysteme)
- 143 Querverbindungen
- 2 Steuerungssysteme (Anlage, Transfersysteme)

Aufbau der virtuellen Maschine	Dauer
Manuell	15 MW
Manuell, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	4 MW
Automatisiert mit dem Generator, unterstützt durch eine Baugruppenbibliothek	<b>15 Minuten</b>

### 7.1 Fazit zur Verifikation

Anhand der beiden Beispielmaschinen sowie der Fertigungsanlage konnte die Eignung des in Kapitel 0 vorgestellten und in Kapitel 6 realisierten Konzeptes für den industriellen Einsatz im mechatronischen Entwicklungsprozess verifiziert werden.

Es konnte gezeigt werden, wie die mechatronische Aufteilung in Baugruppen auf die virtuelle Maschine übertragen werden kann (Anforderung 1 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3). Hierfür wurden die mechatronischen Schnittstellen nach Kapitel 5.2 in der virtuellen Baugruppe adaptiert und eine objektorientierte Modellierung gewählt, welche die maschinenspezifische Instanziierung einer Baugruppe ermöglicht. Die hierfür notwendigen Konzepte wurden definiert und realisiert.

Die Integration in den mechatronischen Entwicklungsprozess (Anforderung 2 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3) konnte dadurch realisiert werden, dass disziplinübergreifende Standards, wie z. B. die Betriebsmittelkennzeichen in die virtuelle Maschine übernommen wurden. Hinzu kommt die Herstellung einer 1:1-Beziehung zwischen der realen und der virtuellen Baugruppe. Durch diese Homogenisierung war es möglich den mechatronischen Ablauf zur Projektierung einer Maschine bzw. Anlage

auf die virtuelle Maschine zu übertragen. Etablierte Abläufe und Tools konnten beibehalten und auf Basis der Kommissionierungsliste eine virtuelle Maschine automatisiert erstellt werden.

Der im Rahmen der Arbeit wurde ein Generator geschrieben, welcher, ausgehend von einer Kommissionierungsliste, automatisiert eine virtuelle Maschine erstellt (Anforderung 3 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3). Hierfür greift er auf einen CPS-Baukasten zurück.

### 7.2 Technology Readiness Level

Der Reifegrad einer Technologie wird mit der Skala des Technology Readiness Level (TRL) in neun Stufen<sup>1</sup> eingeteilt (Mankins 1995; ESA.2012). Der im Rahmen dieser Arbeit konzipierte digitale Zwilling wurde für den produktiven Einsatz bei einem weltweit agierenden Hersteller von Maschinen und Anlagen für die Holzbearbeitung und Möbelfertigung konzipiert und realisiert. Die Verifikation fand an realen Kundenmaschinen bzw. -Anlagen statt. Die Arbeit ist daher auf der Stufe TRL 5 bzw. 6 einzuordnen.

---

<sup>1</sup> Die neun TRL-Stufen sind wie folgt definiert:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips,
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie,
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie,
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor,
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung,
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung,
- TRL 7: Prototyp im Einsatz,
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit,
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes.

---

## 8 Zusammenfassung

Vom Maschinenbau erwartet der Markt kundenspezifische und kurzfristig lieferbare Maschinen und Anlagen in hoher Qualität bei zunehmender Komplexität, bedingt durch einen zunehmenden Automatisierungsgrad. In den letzten Jahren optimierten die führenden Anlagenhersteller dafür ihren Entwicklungsprozess durch Softwaretools für die Projektierung und durch Generatoren für die weitgehend automatische Erstellung von anlagenspezifischer Software und Parameterlisten für die Automatisierungsgeräte. Obwohl die einzelnen Softwarebausteine immer wieder verwendet werden und man diese weitgehend als fehlerfrei erwarten darf, ist die neue automatisch generierte Kombination oft nicht fehlerfrei. Bis zum Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme, welche die reale Steuerung an einem virtuellen Abbild der realen Maschine, der sog. „virtuellen Maschine“, betreibt und testet, konnten solche Fehler häufig erst bei der Inbetriebnahme der Anlage erkannt werden und waren dann aufwändig unter Zeitdruck zu korrigieren. Im Rahmen dieser virtuellen Inbetriebnahme werden heute schon während des Aufbaus der realen Maschine umfassende Softwaretests durchgeführt. Dazu gehören insbesondere Tests, ob die Steuerungsalgorithmen unzulässige Anlagenzustände sicher erkennen und dann bestimmungsgemäß reagieren.

Der Aufbau einer solchen virtuellen Maschine ist heute eine manuelle, zusätzliche und teure Aufgabe für Experten, obwohl die reale Maschine selbst samt Steuerungstechnik doch weitgehend automatisch im Engineeringprozess konfiguriert, parametrisiert und programmiert werden kann.

Im Rahmen der Arbeit wurde daher zunächst dargestellt, nach welchen Prinzipien sich Maschinen und Anlagen heute auf Basis eines Baukastens aus wiederverwendbaren mechatronischen Baugruppen erstellen lassen, um dann der Frage nachzugehen, wie sich die mechatronische Aufteilung in Baugruppen auf die virtuelle Maschine übertragen lässt (Anforderung 1 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3). Dafür wurden die mechatronischen Schnittstellen in der virtuellen Baugruppe adaptiert und eine objektorientierte Modellierung gewählt, welche die maschinenspezifische Instanziierung einer virtuellen Baugruppe ermöglicht. Die hierfür notwendigen Konzepte wurden definiert und realisiert.





Der Neuheitsgrad der Arbeit begründet sich darin, dass erstmals gezeigt wurde, wie hochkomplexe Maschinen und Anlagen in ein Simulationsmodell überführt werden können, welches diese mechatronische Komplexität abbilden kann. Modularisierungs- und Baukastenkonzepte, welche im Sondermaschinenbau eingesetzt werden, wurden auf den digitalen Zwilling übertragen.

Durch diese Überführung von mechatronischen Baugruppen in cyber-physische Systeme (CPS) konnte eine 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe umgesetzt werden, was den im Maschinenbau eingeführten Engineeringprozess im Kern unverändert lässt, den zu verändern bereits frühere andere Ansätze in der Praxis hat scheitern lassen. Zudem entstand dadurch die Möglichkeit, kinematische Ketten und Querbeziehungen aus der virtuellen Maschine zu erkennen und so die Erstellung des Simulationsmodells erstmals ganzheitlich zu automatisieren. Ohne diese Beziehungen konnten frühere Ansätze weder auf Werkzeugmaschinen noch auf Roboter übertragen werden.

Die Integration in den mechatronischen Entwicklungsprozess (Anforderung 2 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3) konnte dadurch realisiert werden, dass disziplinübergreifende Standards, wie z. B. die Betriebsmittelkennzeichen in die virtuelle Maschine übernommen wurden. Durch diese Homogenisierung war es möglich den mechatronischen Ablauf zur Projektierung einer Maschine bzw. Anlage auf die virtuelle Maschine zu übertragen. Etablierte Abläufe und Tools konnten beibehalten und auf Basis der Kommissionierungsliste eine virtuelle Maschine automatisiert erstellt werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein heute im industriellen Einsatz stehender Generator entwickelt, welcher, ausgehend von einer Kommissionierungsliste, automatisiert eine virtuelle Maschine aus einem CPS-Baukasten heraus erstellt (Anforderung 4 aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3). Für die Entwicklung konnten die im Engineeringprozess anfallenden Daten eines weltweit agierenden Herstellers von Maschinen und Anlagen für die Holzbearbeitung und Möbelfertigung genutzt werden. Die Verifikation fand an realen Kundenmaschinen bzw. -anlagen statt. Der produktive Einsatz des Vorgehensmodells sowie des Generators ist noch im Jahr der Veröffentlichung dieser Dissertation geplant.

Tabelle 5 fasst die genannten Punkte im Überblick zusammen.

	Erfüllt?
<b>Anforderung 1:</b> Erhalt der Modularisierung, 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppe	
<b>Anforderung 2:</b> Integration in den mechatronischen Entwicklungsprozess als neue Disziplin	
<b>Anforderung 3:</b> Automatische Generierung der virtuellen Maschine	
<b>Anforderung 4:</b> Nutzung der virtuellen Maschine über die virtuelle Inbetriebnahme hinaus	

*Tabelle 5: Abschließender Vergleich der Anforderungen aus Kapitel 3 mit dem Ergebnis dieser Arbeit*

Da dem Entwicklungsprozess nun durchgehend eine virtuelle Maschine zur Verfügung steht, kann diese bereits beim Kunden zur Vorplanung der Maschine bzw. Anlage eingesetzt werden. Der Kunde wird damit frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebunden und kann aktiv die endgültige Konstruktion der Maschine bzw. Anlage mitgestalten.



---

## 9 Literaturverzeichnis

**acatech 2010**

acatech - Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften e.V., 2010.  
*Cyber-Physical Systems: Innovation Durch Software-  
Intensive Eingebettete Systeme.*  
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin  
Heidelberg.  
Acatech DISKUTIERT.  
ISBN 3642144985

**Angerbauer et al. 2010**

Angerbauer, R; Buck, R; Doll, U; Hackel, M;  
Eberhardinger, S; Kayser, K.-H; Klebl, M; Mack, H;  
Siegler, R; Wascher, F; Würslin, R., 2010.  
*Adaptierbares Modellierungswerkzeug und  
Qualifizierungsprogramm für den Aufbau  
firmenspezifischer mechatronischer  
Engineeringprozesse: Ein Leitfaden für Maschinen-  
und Anlagenbauer.*  
Frankfurt, M.: VDMA-Verl.  
ISBN 978-3-8163-0589-7

**Balzert 1999**

Balzert, Heide, 1999.  
*Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und  
Entwurf.*  
Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.  
Lehrbücher der Informatik.  
ISBN 3827402859

**Bartenschlager et al. 1998**

Bartenschlager, J; Hebel, Hans; Schmidt, Georg,  
1998.  
*Handhabungstechnik mit Robotertechnik: Funktion,  
Arbeitsweise, Programmierung.*  
Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag.

ISBN 978-3-663-12166-4

DOI: 10.1007/978-3-663-12166-4

**Bauernhansl 2015**

Bauernhansl, T. (Hrsg.), 2015.

*Vorlesung "Wissens- und Informationsmanagement in der Produktion I", Vorlesung 9: „Virtuelle Inbetriebnahme 3“.*

Stuttgart

**Baum 2018**

Baum, Jessica, 2018.

Wie siamesische Zwillinge.

*MM Maschinenmarkt* (4), Sonderdruck

**Beckhoff 2012**

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2012.

*TwinCAT 3 - eXtended Automation (XA)*

Verfügbar unter:

[download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff\\_TwinCAT3\\_042012\\_d.pdf](https://download.beckhoff.com/download/Document/catalog/Beckhoff_TwinCAT3_042012_d.pdf)

Zugriff am: 30.11.2018

**Beckhoff 2015**

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, 2015.

*Handbuch "TwinCAT 3 AutomationInterface" 1.0*

Verfügbar unter:

[download.beckhoff.com/download/Document/automation/twincat3/AutomationInterface\\_pdf\\_DE.pdf](https://download.beckhoff.com/download/Document/automation/twincat3/AutomationInterface_pdf_DE.pdf)

Zugriff am: 30.11.2018

**Biesinger et al. 2018**

Biesinger, Florian; Meike, Davis; Krass, Benedikt; Weyrich, Michael, 2018.

A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory. In: *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*.

Piscataway: IEEE, S. 19–26

- ISBN 978-1-5386-7108-5  
DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502467
- Biesinger et al. 2019** Biesinger, Florian; Meike, Davis; Kraß, Benedikt; Weyrich, Michael, 2019.  
A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin.  
*Procedia CIRP* 79, S. 355–360  
DOI: 10.1016/j.procir.2019.02.087
- Boschert et al. 2016** Boschert, Stefan; Rosen, Roland, 2016.  
Digital Twin - The Simulation Aspect.  
In: Hehenberger, Peter; Bradley, David (Hrsg.):  
*Mechatronic Futures*.  
Cham: Springer International Publishing, S. 59–74  
ISBN 978-3-319-32154-7  
DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1\_5
- Chatti et al. 2019** Chatti, Sami; Tolio, Tullio (Hrsg.), 2019.  
*CIRP Encyclopedia of Production Engineering*.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-642-35950-7  
DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7
- Dausmann et al. 2011** Dausmann, M; Bröckl, U; Schoop, Dominik; Goll, Joachim, 2011.  
*C als erste Programmiersprache: Vom Einsteiger zum Fortgeschrittenen*.  
7., überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
ISBN 978-3-8348-1221-6
- DIN 4000-172** DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2012-12.  
*Sachmerkmal-Listen - Teil 172: Antriebene*

*Werkzeugeinheiten.*

Berlin: Beuth Verlag

**DIN 4000-210**

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2015-08.

*Sachmerkmal-Listen - Teil 210: Spanende  
Werkzeugmaschinen.*

Berlin: Beuth Verlag

**DIN 4003-172**

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2013-12.

*Konzept für den Aufbau von 3D-Modellen auf  
Grundlage von Merkmalen nach DIN 4000 - Teil 172:  
Angetriebene Werkzeugeinheiten.*

Berlin: Beuth Verlag

**DIN 4003-210**

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2015-08.

*Aufbau und Austausch von 3D-  
Werkzeugmaschinenmodellen auf Grundlage von  
Merkmalen nach DIN 4000 - Teil 210: Spanende  
Werkzeugmaschinen.*

Berlin: Beuth Verlag

**DIN 69871-1**

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
1995-10.

*Steilkegelschäfte für automatischen  
Werkzeugwechsel - Teil 1: Form A, Form AD, Form  
B und Ausführung mit Datenträger.*

Berlin: Beuth Verlag

**DIN EN 61131-3**

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2014-06.

*Speicherprogrammierbare Steuerungen -  
Programmiersprachen.*

Berlin: Beuth Verlag

- DIN EN 61800-7-201**      DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2016-11.  
*Elektrische Leistungsantriebssysteme mit  
einstellbarer Drehzahl – Teil 7-201: Generisches  
Interface und Nutzung von Profilen für  
Leistungsantriebssysteme (PDS) – Spezifikation von  
Profil-Typ 1.*  
Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 61800-7-204**      DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2016-11.  
*Elektrische Leistungsantriebssysteme mit  
einstellbarer Drehzahl – Teil 7-204: Generisches  
Interface und Nutzung von Profilen für  
Leistungsantriebssysteme (PDS) – Spezifikation von  
Profil-Typ 4.*  
Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 81346-2**      DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2010-05.  
*Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und  
Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und  
Referenzkennzeichnung – Teil 2: Klassifizierung von  
Objekten und Kennbuchstaben von Klassen.*  
Berlin: Beuth Verlag
- DIN ISO 7388-1**      DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):  
2014-07.  
*Werkzeugschäfte mit Kegel 7/24 für automatischen  
Werkzeugwechsel - Teil 1: Maße und Bezeichnung  
von Schäften der Formen A, AD, AF, U, UD und UF  
(ISO 7388-1:2007).*  
Berlin: Beuth Verlag

- Doll 2010** Doll, U., 2010.  
Einsatz von mechatronischen Designwerkzeugen der Digitalen Fabrik für die Anlagenprojektierung.  
In: *Stuttgarter Impulse - Fertigungstechnik für die Zukunft*.  
Stuttgart: Ges. für Fertigungstechnik, S. 631–648  
ISBN 978-3-925589-51-5
- Eigner et al. 2014** Eigner, M; Roubanov, Daniil; Zafirov, Radoslav (Hrsg.), 2014.  
*Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*.  
Berlin: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-662-43816-9  
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43816-9>  
DOI: 10.1007/978-3-662-43816-9
- ESA.2012** European Space Agency (ESA), 2012.  
*Strategic Readiness Level: The ESA Science Technology Development Route*.  
Verfügbar unter: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=37710>  
Zugriff am: 23.11.2019
- ETG 2017-09** EtherCAT Technology Group (Hrsg.): 2017-09.  
*EtherCAT Specification (Part 1-6)*.
- Gausemeier et al. 2013** Gausemeier, J; Dumitrescu, R; Steffen, D; Czaja, A; Wiederkehr, O; Tschirner, C., 2013.  
*Systems Engineering in der industriellen Praxis: Studie*.  
Paderborn  
Verfügbar unter: [https://www.hni.uni-paderborn.de/fileadmin/Fachgruppen/Seniorprofessur\\_Gausemeier/systemsengineerings/Studie\\_Systems-Engineering.pdf](https://www.hni.uni-paderborn.de/fileadmin/Fachgruppen/Seniorprofessur_Gausemeier/systemsengineerings/Studie_Systems-Engineering.pdf)

- Haberfellner et al. 1994** Haberfellner, R; Nagel, P; Becker, M., 1994.  
*Systems engineering. Methodik und Praxis.*  
Zürich: Verl. Industrielle Organisation.  
ISBN 3857439734
- Heisel et al. 2004** Heisel, U; Meitzner, M., 2004.  
Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme: Modulare  
Werkzeugmaschinensysteme zur Anpassung an den  
Produktlebenszyklus.  
*wt Werkstattstechnik online 94* (10), S. 517–520
- Hoang et al. 2016** Hoang, Xuan Luu; Fay, Alexander; Marks, Philipp;  
Weyrich, Michael, 2016.  
Systematization approach for the adaptation of  
manufacturing machines.  
In: *IEEE 21st International Conference on Emerging  
Technologies and Factory Automation (ETFA).*  
Piscataway: IEEE, S. 1–4  
ISBN 978-1-5090-1314-2  
DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733635
- Hoher 2016** Hoher, S., 2016.  
*Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur  
durchgängigen Entwicklungsunterstützung von  
Materialflusssteuerungen.*  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag.  
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 67,  
Universität Stuttgart, Dissertation, 2016.  
ISBN 978-3-8396-1197-5.
- INDEX RatioLine** INDEX-Werke GmbH & Co. KG.  
*RatioLine G250 G400: Hochleistungs-Dreh-  
Fräszentren*  
Verfügbar unter: [https://www.index-  
werke.de/fileadmin/user\\_upload/INDEX/G400/INDEX](https://www.index-werke.de/fileadmin/user_upload/INDEX/G400/INDEX)

\_G250\_G400\_DE.pdf

Zugriff am: 01.09.2017

**Isermann 2008**

Isermann, Rolf, 2008.

*Mechatronische Systeme: Grundlagen.*

2., vollst. neu bearb. Aufl.

Berlin: Springer.

ISBN 978-3-540-32512-3

DOI: 10.1007/978-3-540-32512-3

**ISG MDS-Axis 2018**

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, 2018.

*Dokumentation ISG-kernel, Achsparameter*

Verfügbar unter: [https://ftp.isg-](https://ftp.isg-stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/mds_axis_parameter_ger.pdf)

[stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/  
mds\\_axis\\_parameter\\_ger.pdf](https://ftp.isg-stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/mds_axis_parameter_ger.pdf)

Zugriff am: 02.06.2018

**ISG MDS-Channel 2018**

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, 2018.

*Dokumentation ISG-kernel, Kanalparameter*

Verfügbar unter: [https://ftp.isg-](https://ftp.isg-stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/mds_channel_parameter_ger.pdf)

[stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/  
mds\\_channel\\_parameter\\_ger.pdf](https://ftp.isg-stuttgart.de/download/kernel/documentation/deutsch/mds_channel_parameter_ger.pdf)

Zugriff am: 01.06.2018

**Jasperneite 2013**

Jasperneite, J. (Hrsg.), 2013.

*Modularer Maschinen- und Anlagenbau.*

ZVEI/FGCA Workshop

**Katz et al. 2000**

Katz, R; Min, B.-K; Pasek, Z.

Open architecture control technology trends.

In: *ERC/RMS Report 35*

**Kircher 2011**

Kircher, C., 2011.

*Selbstadaptierende NC-Steuerung für  
rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen.*

Heimsheim: Jost-Jetter.

ISW/IPA Forschung und Praxis 185.

- Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2011.  
DOI: 10.18419/opus-6773.  
ISBN 978-3-939890-79-9.
- Kircher et al. 2004** Kircher, C; Seyfarth, M; Wurst, K.-H., 2004.  
Modellbasiertes Rekonfigurieren von  
Werkzeugmaschinen.  
*wt Werkstattstechnik online 94* (5), S. 179–183
- Koren 1998** Koren, Y., 1998.  
Open-Architecture Controllers for Manufacturing  
Systems: Summary of Global Activity.  
In: Jovane, F; Pritschow, G; Koren, Y. (Hrsg.): *Open  
Architecture Control Systems - Summary of Global  
Activity: Summary of Global Activity*.  
Mailand: ITIA Series, S. 85–99
- Koren 2006** Koren, Y., 2006.  
General RMS Characteristics. Comparison with  
Dedicated and Flexible Systems.  
In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): *Reconfigurable  
Manufacturing Systems and Transformable  
Factories*.  
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S.  
27–45  
ISBN 978-3-540-29391-0  
DOI: 10.1007/3-540-29397-3\_3
- Koren et al. 1999** Koren, Y; Heisel, U; Jovane, F; Moriwaki, T;  
Pritschow, G; Ulsoy, G; van Brussel, H., 1999.  
Reconfigurable Manufacturing Systems.  
*CIRP Annals - Manufacturing Technology 48* (2), S.  
527–540  
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6

- Koren et al. 2010** Koren, Y; Shpitalni, M., 2010.  
Design of reconfigurable manufacturing systems.  
*Journal of Manufacturing Systems* 29 (4), S. 130–141  
DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.01.001
- Krause et al. 2018** Krause, Dieter; Gebhardt, Nicolas, 2018.  
*Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln.*  
Berlin: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-662-53039-9
- Kreusch 2002** Kreusch, K., 2002.  
*Verifikation numerischer Steuerungen an virtuellen Werkzeugmaschinen.*  
Aachen, Dissertation, 2002
- Kufner 2012** Kufner, A., 2012.  
*Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen.*  
Heimsheim: Jost-Jetter.  
ISW/IPA Forschung und Praxis 188.  
Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2012.  
DOI: 10.18419/opus-6786.  
ISBN 978-3-939890-94-2.
- Kuhn 2017** Kuhn, Thomas, 2017.  
Digitaler Zwilling.  
*Informatik-Spektrum* 40 (5), S. 440–444  
DOI: 10.1007/s00287-017-1061-2
- Langanke 2016** Langanke, K., 2016.  
Virtuelle Inbetriebnahme „Digitaler Zwillinge“:  
Digitalisierung im Werkzeugmaschinenbau.  
*VDI-Z* 158 (10), S. 36–37

- Lee 2008** Lee, E. A., 2008.  
*Cyber Physical Systems: Design Challenges*  
Verfügbar unter:  
<https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.html>  
Zugriff am: 24.04.2017
- Lee et al. 2013** Lee, Jay; Lapira, Edzel; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-an, 2013.  
Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment.  
*Manufacturing Letters* 1 (1), S. 38–41  
DOI: 10.1016/j.mfglet.2013.09.005
- Lindworsky 2011** Lindworsky, A., 2011.  
*Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest.*  
München: Utz.  
Forschungsberichte IWB 249.  
München, Technische Universität München, Dissertation, 2011.  
ISBN 978-3-8316-4125-3.
- List 2017** List, Ronald, 2017.  
*CATIA V5 – Grundkurs für Maschinenbauer: Bauteil- und Baugruppenkonstruktion, Zeichnungsableitung.*  
8., aktualisierte Auflage.  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
Lehrbuch.  
ISBN 978-3-658-17332-6
- Litto et al. 2004** Litto, M; Korajda, I; Mangold, C; Angerbauer, R; Hils, W; Lerche, M., 2004.  
*Baukastenbasiertes Engineering mit Föederal: Ein*

*Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer.*

Frankfurt am Main: VDMA Verl.

ISBN 3-8163-0478-8

**Mankins 1995**

Mankins, J. C., 1995, Edited: 2004.

*Technology Readiness Levels: A White Paper.*

NASA, Office of Space Access and Technology,  
Advanced Concepts Office

**Müller 1997**

Müller, J., 1997.

*Objektorientierte Softwareentwicklung für offene  
numerische Steuerungen.*

Berlin: Springer.

ISW-Forschung und Praxis 120.

Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 1997.

ISBN 9783540637134.

**NASA 2010**

National Aeronautics and Space Administration  
(NASA) (Hrsg.), 2010.

*Draft Modeling, Simulation, Information: Technology  
& Processing Roadmap.*

Washington, DC: NASA

**Neugebauer et al. 2007**

Neugebauer, R; Denkena, B; Wegener, K., 2007.

Mechatronic Systems for Machine Tools.

*CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2), S.  
657–686

DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.007

**Neuhausen 2001**

Neuhausen, J., 2001.

*Gestaltung modularer Produktionssysteme für  
Unternehmen der Serienproduktion.*

Aachen, Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen, Dissertation, 2001

**OCEAN Consortium 2002**

OCEAN Consortium, 2002.

*OCEAN Deliverable 1.1: Usability Study of available*

- 
- Real-Time Operating and Communication Systems.*  
Aachen/ Milano, Italy
- Oppelt et al. 2016** Oppelt, Mathias; Hoernicke, Mario; Rosen, Roland;  
Urbas, Leon; Barth, Mike, 2016.  
*Simulation 2025: Simulation im Lebenszyklus  
industrieller Anlagen.*  
Baden-Baden: Automation 2016
- OSACA 1996** N., N., 1996.  
*OSACA I & II Final Report: Open System  
Architecture for Controls within Automation Systems  
EP 6379 & EP 9115*
- OSACA Association 2001** OSACA Association, 2001.  
*OSACA Handbook Version 2.0*
- Pieloth 2011** Pieloth, R., 2011.  
Virtuell geht es schnell: Die Inbetriebnahme per  
Computer als Baustein im Engineering-Prozess.  
*Software & IT* (August)
- Pieloth 2013** Pieloth, R., 2013.  
Virtuelle Maschine ermöglicht schnelle  
Inbetriebnahme, Sonderdruck.  
*MM Maschinenmarkt* (41), 1-2
- Plattform Industrie 4.0 2016** Plattform Industrie 4.0, 2016.  
*Struktur der Verwaltungsschale: Fortentwicklung des  
Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente*  
Verfügbar unter:  
[https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_u  
nd\\_Medien/Publikationen/2016/april/Struktur\\_der\\_Ve  
rwaltungsschale/Struktur-der-Verwaltungsschale.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/april/Struktur_der_Verwaltungsschale/Struktur-der-Verwaltungsschale.pdf)  
Zugriff am: 30.11.2018

- Pritschow 2002** Pritschow, G., 2002.  
Auf dem Weg in die virtuelle Produktion.  
*wt Werkstattstechnik online* 92 (5), S. 186
- Pritschow 2005** Pritschow, G., 2005.  
Steuerungstechnik im Wandel: Neue Methoden zur  
Diagnose, Inbetriebnahme und Prozessoptimierung.  
*wt Werkstattstechnik online* 95 (5), S. 301
- Pritschow et al. 2001** Pritschow, G; Altintas, Y; Jovane, F; Koren, Y;  
Mitsubishi, M; Takata, S; van Brussel, H; Weck, M;  
Yamazaki, K., 2001.  
Open Controller Architecture – Past, Present and  
Future.  
*CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50 (2), S.  
463–470  
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62993-X
- Pritschow et al. 2003** Pritschow, G; Wurst, K.-H; Seyfarth, M; Bürger, T.,  
2003.  
Requirements for Controllers in Reconfigurable  
Machining Systems, CIRP 2nd international confe  
rence on reconfigurable manufacturing.  
*Ann Arbor, USA*
- Pritschow et al. 2005** Pritschow, G; Röck, S; Rüdele, H., 2005.  
Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen:  
Anforderungen und Eigenschaften einer Hardware-  
in-the-Loop-Simulationsumgebung für  
Werkzeugmaschinen.  
*wt Werkstattstechnik online* 95 (5), S. 302–308
- Pritschow et al. 2009** Pritschow, G; Wurst, K.-H; Kircher, C; Seyfarth, M.,  
2009.  
Control of Reconfigurable Machine Tools.  
In: ElMaraghy, H. (Hrsg.): *Changeable and*

- Reconfigurable Manufacturing Systems*.  
London: Springer London, S. 71–100  
ISBN 978-1-84882-066-1
- Reuter et al. 2010** Reuter, A; Kircher, C; Verl, A., 2010.  
Manufacturer-independent mechatronic information  
model for control systems.  
*Production Engineering 4* (2-3), S. 165–173  
DOI: 10.1007/s11740-010-0220-y
- Röck 2007** Röck, S., 2007.  
*Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit  
realen Steuerungselementen*.  
Heimsheim: Jost-Jetter.  
ISW-Forschung und Praxis 168.  
Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2007.  
ISBN 978-3-939890-24-9.
- Roddeck 2016** Roddeck, Werner, 2016.  
*Einführung in die Mechatronik*.  
5., überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
Lehrbuch.  
ISBN 978-3-658-15843-9
- Rosen et al. 2015** Rosen, Roland; Wichert, Georg von; Lo, George;  
Bettenhausen, Kurt D., 2015.  
About The Importance of Autonomy and Digital  
Twins for the Future of Manufacturing.  
*IFAC-PapersOnLine 48* (3), S. 567–572  
DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141
- Roth 2016** Roth, A., 2016.  
*Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0:  
Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus  
der Praxis*.

1. Aufl. 2016.  
Berlin: Gabler.  
ISBN 3662485044

**Sauer 2018**

Sauer, O., 2018.  
Digitale Zwillinge existieren für die wenigsten  
Maschinen und Anlagen.  
*Automobil Produktion (07-08)*, S. 6–7, 2018  
Zugriff am: 27.10.2019

**Scheifele et al. 2015**

Scheifele, S; Lechler, A; Verl, A., 2015.  
Automated Online Control System Configuration.  
In: Oduoza, Chike F. (Hrsg.): *FAIM 2015*.  
United Kingdom: The Choir Press, S. 446–453  
ISBN 978-1-910864-00-5

**Scheifele et al. 2016a**

Scheifele, S; Verl, A., 2016a.  
Automatische HiLS-Generierung für komplexe  
Maschinen: Hardware-in-the-Loop-Simulationslösung  
für den variantenreichen Sondermaschinenbau.  
*wt Werkstattstechnik online 106 (7/8)*, S. 501–505

**Scheifele et al. 2016b**

Scheifele, S; Lechler, A; Verl, A., 2016b.  
Steuerungstechnisches Engineering von Maschinen  
und Anlagen im Kontext Industrie 4.0.  
In: Uhlmann, E. (Hrsg.): *Industrie 4.0 - Vision und  
Realität*.  
Berlin: VDI-Verl., S. 49–59  
ISBN 978-3-18-369602-4

**Scheifele et al. 2016c**

Scheifele, S; Verl, A., 2016c.  
Automated Control System Generation Out of the  
Virtual Machine.  
*Procedia Technology 26*, S. 349–356  
DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.045

- Scheifele et al. 2016d** Scheifele, S; Lechler, A., 2016d.  
Verkürzte Umrüstzeit modularer Produktionsanlagen durch automatisierte Anpassung der Steuerung.  
In: Frey, G; Schumacher, W; Verl, A. (Hrsg.):  
*Fortschritte in der Antriebs- und Automatisierungstechnik (FAA)*.  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 88–97  
ISBN 978-3-8396-1006-0
- Scheifele et al. 2016e** Scheifele, S; Verl, A., 2016e.  
Steuerungsgenerierung aus der virtuellen Maschine: Automatische Parametrierung und Konfiguration der Steuerung modularer Werkzeugmaschinen für Industrie 4.0.  
*wt Werkstattstechnik online 106 (5)*, S. 302–307
- Scheifele et al. 2017** Scheifele, S; Riedel, O; Pritschow, G., 2017.  
Engineering of machine tools and manufacturing systems using cyber-physical systems.  
In: *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*.  
Piscataway: IEEE, S. 1503–1514  
ISBN 978-1-5386-3428-8  
DOI: 10.1109/WSC.2017.8247892
- Scholz 1989** Scholz, Wolfgang, 1989.  
*Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen*.  
München, Wien: Hanser.  
Fertigungstechnik - Erlangen 7.  
ISBN 9783446158252
- Siemens AG 2015** Siemens AG, 2015.  
*Der digitale Zwilling: Digitalisierung im Maschinenbau*.  
Verfügbar unter: <https://www.siemens.com/customer->

magazine/de/home/industrie/digitalisierung-im-maschinenbau/der-digitale-zwilling.html

Zugriff am: 11.02.2016

**Siemens AG 2018**

Siemens AG, 2018.

*Digitalisierung in der Industrie: Zwillinge mit Potenzial.*

Verfügbar unter:

<https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/industrie/der-digitale-zwilling.html>

Zugriff am: 20.11.2018

**Sperling 1999**

Sperling, W., 1999.

*Modulare Systemplattformen für offene Steuerungssysteme.*

Stuttgart, Universität Stuttgart, ISW, Dissertation, 1999

**Spur et al. 1997**

Spur, Günter; Krause, Frank-Lothar, 1997.

*Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik.*

München, Wien: Hanser.

ISBN 3-446-19176-3

**Talkhestani et al. 2018**

Talkhestani, Behrang Ashtari; Jazdi, Nasser; Schlögl, Wolfgang; Weyrich, Michael, 2018.

A concept in synchronization of virtual production system with real factory based on anchor-point method.

*Procedia CIRP* 67, S. 13–17

DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.168

**Uhlmann et al. 2017**

Uhlmann, E; Lang, K.-D; Prasol L; Thom, S; Peukert, B; Benecke, S; Wagner, E; Sammler, F; Richarz, S; Nissen, N., 2017.

Sustainable Solutions for Machine Tools.

- In: Stark, Rainer; Seliger, Günther; Bonvoisin, Jérémy (Hrsg.): *Sustainable Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, S. 47–69  
ISBN 978-3-319-48513-3  
DOI: 10.1007/978-3-319-48514-0\_4
- VDI 2206** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.):  
2004-06.  
*Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*.  
Berlin: Beuth Verlag
- VDI 2854** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.).  
*Sicherheitstechnische Anforderungen an automatisierte Fertigungssysteme*: Beuth Verlag
- VDI 4499-1** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.):  
2008-02.  
*Digitale Fabrik - Grundlagen*.  
Berlin: Beuth Verlag
- VDI/VDE 3693-1** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.):  
2016-08.  
*Virtuelle Inbetriebnahme*.  
Berlin: Beuth Verlag
- VDI/VDE 3695-2** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.):  
2010-10.  
*Engineering von Anlagen, Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Prozesse*: Beuth Verlag
- VDW 1997** Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), 1995.  
Abteilungsübergreifende Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen: Methodik und Systemkonzept zur Verbesserung der

Zusammenarbeit.  
VDI-Z (137), S. 54–60

**Voß 2012**

Voß, V., 2012.  
*Wiederverwendbare Simulationsmodelle für die domänen- und disziplinübergreifende Produktentwicklung.*  
Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2012.  
DOI: 10.18419/opus-6801

**Walden et al. 2015**

Walden, David D; Roedler, Garry J; Forsberg, Kevin; Hamelin, R. Douglas; Shortell, Thomas M. (Hrsg.), 2015.  
*Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities ; INCOSE-TP-2003-002-04, 2015.*  
4.  
Hoboken, NJ: Wiley.  
ISBN 9781118999400

**Weber 2015**

Weber, Klaus H., 2015.  
*Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen.*  
4., vollständig bearbeitete und aktualisierte Auflage.  
Berlin: Springer Vieweg.  
VDI-Buch.  
ISBN 978-3-662-48161-5

**Westkämper 2006**

Westkämper, E. (Hrsg.), 2006.  
*Abschlussbericht des Sonderforschungsbereichs 467 – Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion.*  
Stuttgart: Universität Stuttgart

**Westkämper et al. 2009**

Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich, 2009.  
*Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das*

- Stuttgarter Unternehmensmodell.*  
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.  
ISBN 978-3-540-21889-0
- Wünsch 2007** Wünsch, G., 2007.  
*Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme  
automatisierter Produktionssysteme.*  
München, Technische Universität München,  
Dissertation, 2007
- Wünsch et al. 2016** Wünsch, Andreas; Wiesner, Martin; Vajna, Sándor  
(Hrsg.), 2016.  
*CATIA V5 - kurz und bündig: Grundlagen für  
Einsteiger.*  
5., überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Wiesbaden: Springer Vieweg.  
ISBN 978-3-658-11542-5
- Wurst 1991** Wurst, K.-H., 1991.  
*Flexible Robotersysteme — Konzeption und  
Realisierung modularer Roboterkomponenten.*  
Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 1991.  
DOI: 10.1007/978-3-662-07253-0
- Wurst et al. 2006** Wurst, K.-H; Heisel, U; Kircher, C., 2006.  
(Re)konfigurierbare Werkzeugmaschinen –  
notwendige Grundlage für eine flexible Produktion.  
*wt Werkstattstechnik online* 96 (5), S. 257–265

Vom Maschinenbau erwartet der Markt kundenspezifische und kurzfristig lieferbare Maschinen und Anlagen in hoher Qualität bei zunehmender Komplexität. Daher optimierten Anlagenhersteller ihren Entwicklungsprozess für die weitgehend automatische Erstellung von anlagenspezifischen Daten. Obwohl die dabei genutzten Softwarebausteine immer wieder verwendet werden und man diese weitgehend als fehlerfrei erwarten darf, ist es die neue Kombination oft nicht.

Bis zum Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme konnten solche Fehler häufig erst bei der Inbetriebnahme erkannt werden und waren dann aufwändig zu korrigieren. Dem stand seither der manuelle und damit teure Aufwand zur Erstellung des dafür notwendigen Digitalen Zwillings entgegen. Diese Arbeit zeigt auf, wie sich dessen Erstellung automatisieren lässt. Durch die Überführung der mechatronischen Baugruppen in cyber-physische Systeme (CPS) wird eine 1:1-Beziehung zwischen realer und virtueller Baugruppen umgesetzt, was den im Maschinenbau eingeführten Engineeringprozess im Kern unverändert lässt. Hierdurch ist eine Generierung des Digitalen Zwillings erstmals ganzheitlich automatisiert möglich

