

Matthias Lochbichler

Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme

Systematic selection of a modelling depth in the design process of mechatronic systems

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Band 394 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2020

ISSN (Print): 2195-5239
ISSN (Online): 2365-4422
ISBN: 978-3-947647-13-2

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

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

Satz und Gestaltung: Matthias Lochbichler

Hersteller: readbox unipress in der readbox publishing GmbH
Dortmund

Printed in Germany

Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Matthias Lochbichler
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 19. März 2020
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen von Industrie- und Forschungsprojekten. Hierzu gehörten insbesondere das EU-Forschungsprojekt „Entwurfstechnik intelligente Mechatronik“ (ENTIME) sowie das Innovationsprojekt „InverSa – Intelligente vernetzte Systeme für automatisierte Geldkreisläufe“ des Spitzenclusters „Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe“ (it's OWL).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, der mir große Freiheiten in der wissenschaftlichen Ausarbeitung meiner Arbeit ließ, aber gleichzeitig immer wieder wichtige Impulse zum positiven Gelingen dieser Arbeit gab. Ich danke ihm für das entgegengebrachte Vertrauen und für die Ermöglichung dieser Dissertation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Leiter der Fachgruppe strategische Produktplanung und Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut, danke ich für die Übernahme des Korreferats. Ich bedanke mich auch bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster und Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer für ihr Mitwirken in der Promotionskommission.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und für die schöne und unvergessliche Zeit am Lehrstuhl. Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen ehemaligen Kollegen und Freunden Dr.-Ing. Daniel Kruse, Christopher Lankeit, Dr.-Ing. Felix Oestersötebier und Dr.-Ing. Ingo Scharfenbaum für die fachlichen Diskussionen und für die intensive inhaltliche Auseinandersetzung mit meiner Dissertation. Für die gewissenhafte und sorgfältige Durchsicht des Manuskripts danke ich Annette Bökamp-Gros.

Meine Eltern Christa und Heinz-Gerd sowie mein Bruder Stefan haben mich in meinem Leben auf vielfältigste Weise unterstützt und mir stets liebevoll zur Seite gestanden. Ich danke ihnen von ganzem Herzen.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Partnerin Handan Polat bedanken, die mich stets mit ihrer Liebe begleitet, mich motiviert und mich bestärkt. Ihr gilt mein herzlichster Dank!

Paderborn, im März 2020

Matthias Lochbichler

Vorveröffentlichungen

- [LSB⁺12] LOCHBICHLER, M.; SCHMÜDDERRICH, T.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodology for Selecting the Modeling Depth of Object-Oriented Behavioral Models. In: *International Conference on Modeling and Simulation (ICMS)*. WASET World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 67, Zürich, 2012, S. 327-331.
- [SLB⁺13] SCHMÜDDERRICH, T.; LOCHBICHLER, M.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodik zur anforderungsgerechten Wahl der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen zur virtuellen Inbetriebnahme. In: BERTRAM, T.; CORVES, B.; JANSCHKE, K. (Hrsg.): *Tagungsband VDI Mechatronik 2013*. Aachen, 2013, S. 43-48.
- [LOT14] LOCHBICHLER, M.; OESTERSÖTEBIER, F.; TRÄCHTLER, A.: Dynamic Behavior Models and Their Modeling Depth in the Design Process of Mechatronic Systems. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2014)*. Montreal, Québec, 2014.
- [LLT⁺15] LOCHBICHLER, M.; LANKEIT, C.; TRÄCHTLER, A.; LANDWEHR, M.; HOISCHEN, L.: Systematische Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel eines Geldautomaten. In: BERTRAM, T.; CORVES, B.; JANSCHKE, K. (Hrsg.): *Tagungsband VDI Mechatronik 2015*. Dortmund, 2015, S. 143-148.
- [LLT15] LANKEIT, C.; LOCHBICHLER, M.; TRÄCHTLER, A.: Challenges in Requirements Engineering for Mechatronic Systems – Problem Analysis and First Approach. In: *Jurnal Teknologi* 76, 4 (2015), S. 1-5.
- [LLO⁺15] LANKEIT, C.; LOCHBICHLER, M.; OESTERSÖTEBIER, F.; TRÄCHTLER, A.; LANDWEHR, M.: From Goals to Systems via Technical Requirements and Physical Models. In: *Proceedings of the first IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. Rom, 2015, S. 112-117.

Zusammenfassung

Ein zentraler Bestandteil moderner Entwicklungsmethodiken für mechatronische Systeme ist ein durchgängiger modellbasierter Entwurf. Modelle werden im gesamten Entwurfsprozess eingesetzt. Die Schwierigkeit besteht in der teilweise sehr aufwändigen Modellerstellung. Aufbau und Art der Modellierung sind nicht formal beschrieben und daher sehr stark vom Ersteller des Modells abhängig. Eine große Herausforderung stellt hier die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe dar, damit ein Modell die geforderten Modellierungsziele effizient erfüllt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine neuartige Methode zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme vorgestellt. Die Methode leistet einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des Entwurfsprozesses mechatronischer Systeme und unterstützt den Entwickler bei der Wahl der Modellierungstiefe in den entscheidenden Entwurfsphasen. Zur Identifikation dieser Entwurfsphasen wird eine Methodik für den Entwurfsprozess mechatronischer Systeme erarbeitet. Anhand der Entwurfsmethodik wird die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe an den erforderlichen Stellen im Entwurfsprozess integriert. Am Beispiel eines Geldautomaten werden sowohl die Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme als auch die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe angewendet.

Abstract

A major element of modern development methods for mechatronic systems is a consistent model-based design. Models are used in various fields of this process. The difficulty lies in the modelling that can be very intricate in parts. Structure and type of modelling are not formally described and therefore depend on the developer of the model. For a model to meet the required modelling objectives efficiently, it is essential to select an appropriate modelling depth.

This thesis presents a novel method for the systematic selection of a modelling depth in the design process of mechatronic systems. The method makes an important contribution to improving the design process of mechatronic systems and supports the developer in choosing an appropriate modelling depth at the key design stages. For identifying these design stages, a methodology for the design process of mechatronic systems is elaborated. According to the design methodology, the method for selecting the modelling depth is integrated to the design process where required. Both the design methodology for mechatronic systems and the method for selecting the modelling depth are applied using the example of an ATM.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen und Literaturüberblick	9
2.1 Begriffsdefinitionen	9
2.2 Mechatronische Systeme	17
2.3 Modellierung mechatronischer Systeme	22
2.3.1 Modellbildungsstrategien	22
2.3.2 Mathematische Modelle	28
2.3.3 Methoden der theoretischen Modellbildung	31
2.4 Modellbasierte Entwurfsmethodiken mechatronischer Systeme .	33
2.4.1 Mechatronische Komposition	33
2.4.2 Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206	34
2.4.3 Spezifikationstechnik CONSENS	36
2.4.4 ENTIME-Entwurfssystematik	38
2.4.5 Weitere Entwurfsmethodiken	40
2.4.6 Bewertung der recherchierten Entwurfsmethodiken	42
2.5 Ansätze zur Klassifikation und Wahl der Modellierungstiefe . . .	46
2.5.1 Einteilungsmöglichkeiten aus der Modellbildung	46
2.5.2 Einteilungsmöglichkeiten aus dem Top-Down-Entwurf . . .	49
2.5.3 Praxisnahe Einteilungsmöglichkeiten	51
2.5.4 Bewertung der recherchierten Ansätze	53
2.6 Fazit und Handlungsbedarf	57
3 Modellbasierte Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	61
3.1 Systemkonzipierung	64
3.2 Disziplinspezifischer Entwurf	68

3.3	Disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik	71
3.4	Modellgestützte Systemintegration	74
3.5	Zwischenfazit	76
4	Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe	79
4.1	Modellierungstiefe und Modellkomplexität von Dynamikmodellen	80
4.2	Vorgehen bei der Modellbildung und der Modellanalyse	82
4.3	Modellierungsziele im Entwurfsprozess	85
4.4	Die vier Ebenen der Modellierungstiefe	87
4.5	Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe	102
4.6	Quantifizierung von Modelleigenschaften	104
4.7	Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel kooperierender Delta- Roboter	113
4.7.1	Idealisierte Dynamikmodelle in der Systemkonzipierung .	115
4.7.2	Detaillierte Dynamikmodelle im disziplinspezifischen Ent- wurf	117
4.8	Zusammenfassung	120
5	Dynamikmodelle im Entwurfsprozess eines Geldautomaten	123
5.1	Einführung in die Thematik	124
5.2	Modellbasierter Entwurf des Geldweges in einem Geldautomaten	129
5.2.1	Systemkonzipierung des Geldweges	131
5.2.2	Disziplinspezifischer Entwurf des Geldweges	152
5.2.3	Disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik und modellgestützte Systemintegration des Geldweges .	159
5.3	Fazit	165
6	Prototypische Werkzeugunterstützung	167
6.1	Die Geldwege-Modellbibliothek	169
6.2	Das Geldwege-Systemmodell	173
6.3	Weitere Automatisierungsmaßnahmen	176
7	Resümee und Ausblick	179
8	Literaturverzeichnis	183

Abkürzungsverzeichnis

AFLP	Anforderung, Funktion, logisches Lösungselement und physikalisches Element
AMS	Autonomes mechatronisches System
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor
CAD	Computer-aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CONSENS	Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems
CPS	Cyber-Physical Systems
CRS	Cash-Recycling-System
DAE	Differential Algebraic Equation
DC	Gleichstrommotor
DzGl	Differenzgleichung
ENTIME	Entwurfstechnik intelligente Mechatronik
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMI	Functional Mock-up Interface
FMU	Functional Mock-up Unit
GUI	Graphical User Interface
GWM	Geldwegemodell
HiL	Hardware-in-the-Loop
InverSa	Intelligente vernetzte Systeme für automatisierte Geldkreisläufe
IT	Informationstechnologie
it's OWL	Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe

LE	Lösungselement
LM	Lösungsmuster
MFM	Mechatronisches Funktionsmodul
MiL	Model-in-the-Loop
MKM	Münchener Produktkonkretisierungsmodell
MKS	Mehrkörpersystem
MTT2D	Media Transport Toolkit 2D
MTT3D	Media Transport Toolkit 3D
MVPE	Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung
ODE	Ordinary Differential Equation
PDE	Partial Differential Equation
PLM	Product-Lifecycle-Management
RCP	Rapid Control Prototyping
REM	Rand-Elemente-Methode
RFLP	Requirements, Functional and Logical Architecture, and Physical Levels
rpm	Umdrehungen pro Minute
SiL	Software-in-the-Loop
SysML	Systems Modelling Language
UML	Unified Modelling Language
V-Modul	Vereinzelungsmodul
V-Spalt	Vereinzelungsspalt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VMS	Vernetztes mechatronisches System
XiL	X-in-the-Loop
XML	Extensible Markup Language

Symbolverzeichnis

a	Beschleunigung
a_i	Konstante
b_{seg}	Breite eines Papiersegments
c_{dreh}	Drehfederkonstante
c_{kon}	Kontaktsteifigkeitskoeffizient
c_{max}	Maximaler Kontaktsteifigkeitskoeffizient
D	Dimensionslose Dämpfung
d_{dreh}	Drehdämpferkonstante
δ	Eindringtiefe
$\dot{\delta}$	Eindringgeschwindigkeit
d_{kon}	Kontaktdämpfungskoeffizient
d_{max}	Maximaler Kontaktdämpfungskoeffizient
d_{reib}	Reibkonstante
d_{strukt}	Strukturdämpfung von Papier
e	Induzierte Spannung (EMF)
E_{papier}	Elastizitätsmodul von Papier
ϵ_g	Guide-Toleranz
$F(t)$	Kraft
f	Anzahl an Freiheitsgraden
F_K	Kontaktkraft
F_N	Normalkraft
F_R	Reibkraft
$f(t)$	Zeitabhängige Funktion
Γ	Modellierungstiefe eines Dynamikmodells
γ	Gewichtungsfaktor zur Bestimmung der Gesamtmodellierungstiefe
Γ_{ges}	Modellierungstiefe eines zusammengesetzten Dynamikmodells
Γ_{Ziel}	Zielmodellierungstiefe eines Dynamikmodells
$g(t)$	Zeitabhängige Funktion
i	Strom
I_A	Ankerstrom
I_E	Erregerstrom

K	Modellkomplexität eines Dynamikmodells
K_{ges}	Gesamtmodellkomplexität zusammengesetzter Modelle
k_e	Drehzahlkonstante
k_f	Reibkonstante
K_M	Motorkonstante
k_t	Drehmomentkonstante
L	Induktivität
L_A	Ankerinduktivität
L_E	Induktivität des Erregerkreises
l_g	Länge eines Guide-Elementes
l_{seg}	Länge eines Papiersegments
m	Masse
m_0	Steifigkeitsexponent
m_1	Dämpfungsexponent
M_{dreh}	Moment in einem Drehgelenk
M_{fl}	Reibmoment der Trockenreibung
M_i	Induziertes Motormoment
M_L	Lastmoment
m_{papier}	Papiermasse
M_R	Reibmoment
m_{Roller}	Masse einer Walze
m_{seg}	Masse eines Papiersegments
M_{tr}	Reibmoment der Flüssigkeitsreibung
$\mu(v)$	Geschwindigkeitsabhängiger Reibungskoeffizient
μ_x	Reibungskoeffizient in x-Richtung
μ_z	Reibungskoeffizient in z-Richtung
n	Zustand eines Dynamikmodells
n_{dg}	Anzahl an Drehgelenken
n_{min}	Minimalzustand eines Dynamikmodells
n_{seg}	Anzahl an Papiersegmenten
ν_{Papier}	Querkontraktionszahl von Papier
ω_M	Winkelgeschwindigkeit eines Motors
$\dot{\omega}_M$	Winkelbeschleunigung eines Motors
φ	Winkel
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit
φ_{Schalt}	Schaltwinkel einer Weiche

Ψ	Magnetischer Fluss
R	OHMScher Widerstand
R_A	Ankerwiderstand
R_E	Widerstand des Erregerkreises
R_g	Gyrationswiderstand
ρ_{papier}	Papierdichte
$\sigma(t)$	Heaviside-Funktion
T	Zeitkonstante
t	Zeit
Θ_M	Massenträgheitsmoment eines Motors
Θ_{seg}	Massenträgheitsmoment eines Papiersegments
Θ_{zz}	Massenträgheitsmoment um die z-Achse
t_{seg}	Dicke eines Papiersegments
t_{vereinz}	Vereinzelungszeit
U	Spannung
U_A	Ankerspannung
U_E	Erregerspannung
U_i	Induzierte Spannung
U_L	Spannung an der Spule
U_R	Spannung am Widerstand
U_s	Motorspannung
$u(t)$	Zeitabhängiger Systemeingang
v	Geschwindigkeit
v_g	Oberflächengeschwindigkeit eines Guide-Elementes
v_t	Grenzgeschwindigkeit
x	Position
$x(t)$	Zustandsgröße
$y(t)$	Zeitabhängiger Systemausgang

1 Einleitung

Moderne technische Produkte umfassen viele verschiedene Komponenten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen und lassen sich häufig nicht eindeutig den ingenieurwissenschaftlichen Bereichen wie Mechanik, Elektrotechnik oder Informatik zuordnen. Es ist vielmehr die Interaktion der einzelnen disziplinspezifischen Komponenten innerhalb eines Produktes, die Entwickler heutzutage vor große Herausforderungen stellt. Produkte dieser Art werden als mechatronische Systeme bezeichnet (vgl. [VDI04, S. 13]). Mechatronische Systeme begleiten uns in unserem Alltag, etwa Kraftfahrzeuge, Geldautomaten und Waschmaschinen, um nur einige zu nennen. Der Funktionsumfang solcher Produkte steigt stetig. Die Integration neuer Funktionen – ob software- oder hardwareseitig – und die Steigerung der Produktqualität bei gleichzeitig wachsenden Ansprüchen an die Funktionalität erfordern neue innovative Entwicklungsmethoden zur Effizienzsteigerung und Komplexitätsbeherrschung (vgl. [BIT15a, S. 12]).

Anhand der Geschichte des Geldautomaten lässt sich die steigende Komplexität mechatronischer Systeme exemplarisch darstellen. Im Jahre 1967 wurde einer der ersten Geldautomaten Europas in Enfield Town nördlich von London aufgestellt und beinhaltete nur eine geringe Anzahl an Funktionen [Spi14]. Der Kunde konnte mit Hilfe eines Schecks Geld abheben. Ausgezahlt wurden dem Kunden maximal 10 Pfund Sterling. Heutzutage sind ca. 2,3 Millionen Geldautomaten weltweit in Betrieb [ATM14]. Im Laufe der Zeit wurden und werden immer mehr Funktionen in Geldautomaten integriert. Moderne Cash-Recycling-Systeme (CRS¹) sind in der Lage, mit einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 10 Noten pro Sekunde bis zu 200 Geldnoten ein- und auszuzahlen, und verfügen über ein sehr komplexes Sicherheitskonzept [Win14].

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Entwicklung mechatronischer Systeme, speziell der Entwurfsprozess, stellt den Entwickler heutzutage vor viele Herausforderungen und bietet zugleich eine Vielzahl an Verbesserungspotenzialen. Funktionen werden nicht mehr ausschließlich durch disziplinspezifische Komponenten erfüllt, sondern durch fachdisziplinübergreifende Systeme. Diese wachsende Interdisziplinarität führt zu einer hohen Schnittstellenvielfalt und dadurch zu einer steigenden System- sowie Anforderungskomplexität (vgl. [GDS⁺13, S. 14]). Produkte können nicht mehr nur aus

¹ CRS ist ein Geldautomat, bei dem eingezahlte Banknoten nach einer Echtheitsprüfung wieder zur Auszahlung bereitgestellt werden [Win14].

dem Blickwinkel einer einzelnen Fachdisziplin betrachtet und somit auch nicht mit deren spezifischer Entwurfsmethodik allein entwickelt werden. ALVAREZ CABRERA et al. sehen die multidisziplinäre Modellierung als eine große Herausforderung im Entwurf mechatronischer Systeme. Gleichzeitig identifizieren sie einen Mangel an geeigneten Werkzeugen und Methoden für den disziplinübergreifenden Entwurf solcher Systeme [ACFT⁺10].

Aufgrund der steigenden Systemkomplexität, einer höheren Schnittstellenvielfalt und kürzeren Produktentwicklungszyklen werden durchgängige Werkzeugketten, die Kompatibilität neuer Methoden mit der bisherigen Entwicklungswelt und eine frühzeitige Definition und Verfeinerung von Anforderungen sowie frühzeitige Funktionstests gefordert (vgl. [GDS⁺13], [aca13], [BIT15a]). Hierdurch rücken die modellbasierten Entwicklungsmethodiken immer mehr in den Fokus, und ihre Vorteile kommen gegenüber konventionellen Methodiken stärker denn je zur Geltung. Ein wichtiges Ziel dieser Entwicklungsmethodiken ist, die Anzahl von Prototypenfertigungen und Versuchen durch den Einsatz von Simulation² – genauer gesagt durch die Untersuchung an Modellen – stark zu reduzieren, um dadurch kürzere Entwicklungsphasen zu erhalten und Entwicklungskosten einzusparen. Gerade in den frühen Phasen des Entwurfsprozesses sollen Modelle eingesetzt werden [aca13, S.93-95]. Modelle dienen z. B. zur Spezifikation von Anforderungen sowohl an das zu entwickelnde Gesamtsystem als auch an Aktorik und Sensorik, zur Reglerauslegung und zur Beschreibung und Analyse des statischen und des dynamischen Systemverhaltens.

Modelle werden auch zur Beschreibung der Abfolge von Prozessphasen und Prozessschritten eingesetzt. Solche Vorgehensmodelle stellen nach LINDEMANN ein Hilfsmittel zum Planen und Kontrollieren dieser Phasen und Prozesse dar [Lin09, S. 33].

Eines der wohl bekanntesten und am weitesten etablierten Vorgehensmodelle ist das V-Modell der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, das in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04] vorgestellt wird. Es beschreibt die erforderlichen Prozessphasen bei der Entwicklung mechatronischer Systeme. In Bild 1-1 ist das V-Modell dargestellt. Es besteht aus den drei Phasen Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration. Zuerst wird das Gesamtsystem spezifiziert und in kleinere Subsysteme unterteilt (Systementwurf), die in der zweiten Phase in den jeweiligen Domänen detailliert und konkretisiert werden. In der letzten Phase werden die Teilsysteme auf Basis der Erkenntnisse der vorangegangenen Phasen zusammengeführt und deren Zusammenspiel untersucht. Die einzelnen Phasen werden dabei iterativ durchlaufen. Begleitet und unterstützt

²„Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI13, S. 14].

werden die drei Phasen durch Modellbildung und -analyse. Der Ausgangspunkt sind definierte Anforderungen an das zu entwickelnde System. Das Ergebnis stellt dann das Produkt dar.

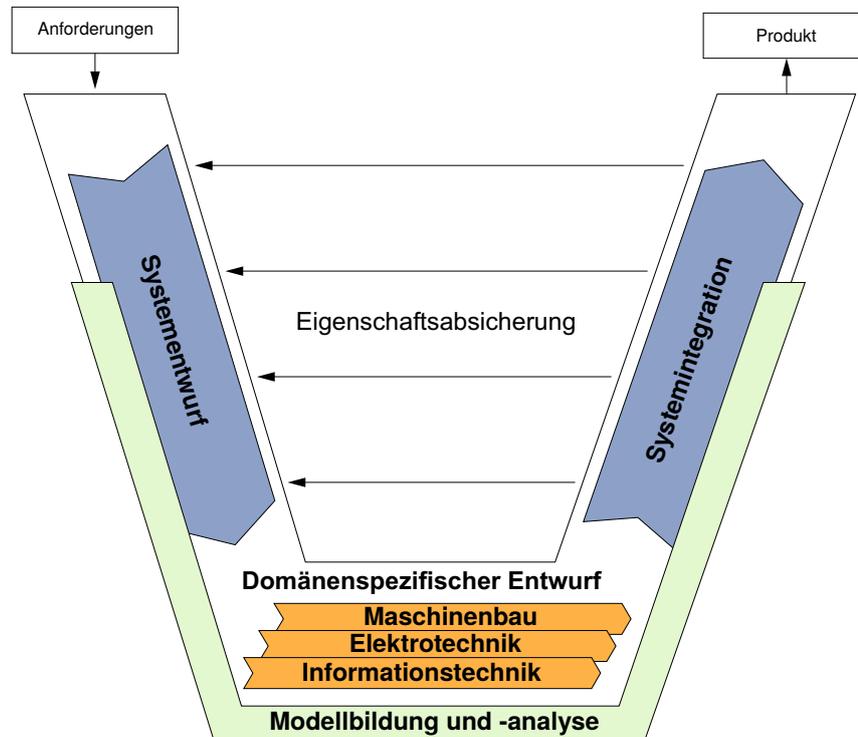


Bild 1-1: V-Modell (vgl. [VDI04, S. 29])

Die am Heinz Nixdorf Institut entwickelte Entwurfssystematik „Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik (ENTIME)“³ greift die Phasen Systementwurf und disziplinspezifischer Entwurf des V-Modells auf und detailliert sie. Beide Phasen werden durch die Schritte Zielbestimmung, Synthese und Analyse zusammengefasst und enthalten eine detaillierte Vorgehensweise. Bild 1-2 zeigt eine abstrakte Darstellung des Entwicklungsprozesses nach ENTIME. Das Ergebnis der ersten Phase ist eine idealisierte Prinziplösung auf Gesamtsystemebene. Nach dem Durchlaufen der zweiten Phase erhält man konkrete Teillösungen einzelner Komponenten. In beiden Phasen werden Modelle zur Entwicklung der Lösungen eingesetzt. Das Ziel ist ein durchgängiger modellbasierter Entwurf.

Die Schwierigkeit des modellbasierten Entwurfs mechatronischer Systeme besteht in der teilweise sehr aufwändigen Modellerstellung. Der Aufbau und die Art der

³ENTIME ist ein von der Europäischen Union und dem Land Nordrhein-Westfalen gefördertes Forschungsprojekt. Es wurde vom Heinz Nixdorf Institut in enger Kooperation mit verschiedenen Unternehmen aus der Region durchgeführt [GTS14].

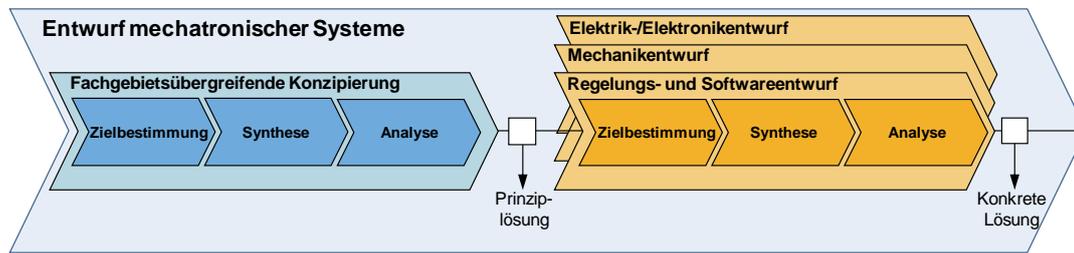


Bild 1-2: ENTIME-Entwurfssystematik (vgl. [GSA⁺ 11, S. 24])

Modellierung sind nicht formal beschrieben und daher sehr stark vom Ersteller des Modells abhängig. Eine große Herausforderung stellt hier die Wahl eines geeigneten Detaillierungsgrades dar, d. h. die Frage wie detailliert Systemkomponenten und Vorgänge in einem Modell abgebildet werden müssen, damit das Modell die geforderten Modellierungsziele effizient erfüllt, wobei die Betonung auf der Effizienz liegt. Der Begriff Detaillierungsgrad – im Folgenden Modellierungstiefe genannt – beschreibt, wie detailliert physikalische Effekte und deren Wechselwirkungen in einem Modell abgebildet sind. Eine genaue Definition dieses Begriffs ist Bestandteil dieser Arbeit und wird in Abschnitt 2.1 ausgeführt. Der allgemein bekannte Leitsatz der Modellierung bringt den Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Detaillierung zum Ausdruck:

*„Modelle müssen so genau wie nötig und so einfach wie möglich sein“
(in Anlehnung an [Neu90, S. 16]).*

Die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe erfordert genaue Systemkenntnisse. Eine detaillierte Modellierung eines Systems ist in der Regel sehr zeitintensiv und verursacht dadurch Kosten. Modelle tragen daher besonders dann zur Zeitersparnis im Entwurfsprozess bei, wenn sie wiederverwendet werden. Trägt man, wie in Bild 1-3 dargestellt, den Modellierungsaufwand über der Modellgenauigkeit auf, so entsteht eine nichtlineare Funktion, die gegen eine Hundertprozentlinie der Modellgenauigkeit strebt. Diese Linie stellt die Realität dar, die jedoch niemals 1:1 durch ein Modell abgebildet werden kann. Allerdings ist damit die Frage, wann ein Modell so genau wie nötig und so einfach wie möglich ist, noch nicht beantwortet.

Ein weiteres Problem innerhalb des modellbasierten Entwurfs ist die Aufbereitung und Wiederverwendung von Lösungswissen in Form von Modellen und/oder Teilmodellen [aca13]. Ziel ist es, mithilfe der Wiederverwendung von Modellen einen Beitrag zur Verringerung des Modellierungsaufwands in zukünftigen Projekten zu leisten und damit Entwicklungskosten einzusparen. Hierzu müssen die Modelle dementsprechend aufbereitet werden. Während des Entwurfsprozesses entstehen, je nach Entwicklungsfortschritt, Modelle mit unterschiedlicher Model-

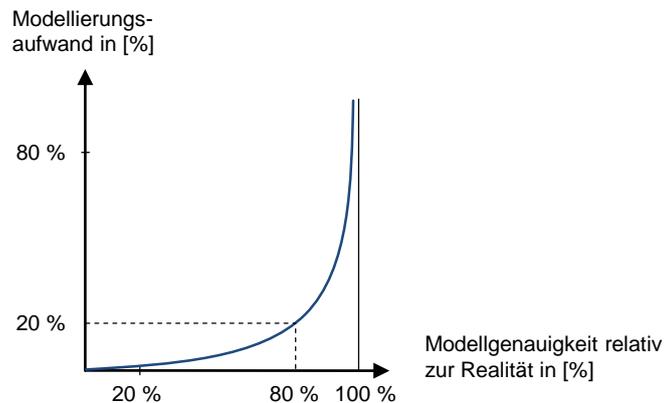


Bild 1-3: Schematischer Zusammenhang zwischen dem Modellierungsaufwand und der Modellgenauigkeit (in Anlehnung an [Bea10, S. 175], [Wol92, S. 73])

lierungstiefe. Diese müssen aufbereitet und archiviert werden. Die Modellierungstiefe eines Modells kann als ein Kriterium zur Klassifikation von Modellen in einem Wissensspeicher eingesetzt werden. Wichtig für den erfolgreichen Einsatz ist die Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus der Systemintegrationsphase (vgl. Bild 1-1) und dem disziplinspezifischen Entwurf – auch die an Prüfständen oder Prototypen gewonnenen Erfahrungen müssen wiederum in die detaillierten und in die idealisierten Modelle, sofern möglich, einfließen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur *systematischen Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme*. Die Methode trägt zur Verbesserung des Entwurfsprozesses mechatronischer Systeme bei und unterstützt den Entwickler bei der Wahl der Modellierungstiefe in den entscheidenden Phasen des modellbasierten Entwurfsprozesses. Die Erstellung von Modellen mit einer ausreichenden Modellierungstiefe, welche die Modellierungsziele erfüllt, bildet damit den Schwerpunkt dieser Arbeit.

Zur Entwicklung der Methode und zur zielgerichteten Nutzung von Modellen im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme muss zunächst der Prozess selbst genauer betrachtet werden. Hier gilt es, den Prozess sehr detailliert darzustellen, damit die jeweiligen Schritte deutlich werden, in denen die Modellierungstiefe vom Entwickler gewählt werden muss. Dadurch kann die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe an den erforderlichen Stellen in den Entwurfsprozess integriert werden.

Die Entwicklung einer solchen Methode setzt sowohl die Definition des Begriffs Modellierungstiefe als auch die Quantifizierung der Modellierungstiefe voraus. Weiterhin müssen Kriterien ausgearbeitet werden, auf deren Basis der Entwickler eine bestimmte Modellierungstiefe bzw. eine bestimmte Ebene der Modellierungstiefe wählen kann. Über den gesamten Entwurfsprozess entstehen Modelle mit unterschiedlichen Modellierungstiefen. Hierbei muss die Konsistenz zwischen allen erstellten Modellen sichergestellt werden.

Darüber hinaus soll ein prototypisches Werkzeug entwickelt werden, das speziell die Anwendung der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel eines Geldautomaten unterstützt.

Zusammenfassend ergeben sich für diese Arbeit drei Ziele:

1. Detaillierung und Ausarbeitung einer Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme,
2. Entwicklung einer Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe und
3. Entwicklung einer prototypischen Werkzeugunterstützung für den Systementwurf.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. Bild 1-4 zeigt den strukturellen Aufbau und die Ziele dieser Arbeit.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen dargestellt und ein Literaturüberblick gegeben. Zunächst werden wichtige Begriffe definiert und erläutert. Es folgt die Beschreibung der theoretischen Grundlagen dieser Arbeit. Hierzu gehören die Grundbausteine und die Hierarchie mechatronischer Systeme. Da die Modellbildung in dieser Arbeit von besonderer Relevanz ist, werden das Vorgehen und die zu beachtenden Aspekte bei der Modellierung mechatronischer Systeme in einem eigenen Abschnitt erläutert. Anschließend beginnt mit dem Literaturüberblick der zweite Teil dieses Kapitels. Zunächst erfolgt ein Überblick zu modellbasierten Entwurfsmethodiken für mechatronische Systeme. Im darauffolgenden Abschnitt werden recherchierte Arbeiten und Ansätze zur Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess dargestellt. Anhand des Literaturüberblicks wird in Abschnitt 2.6 der Handlungsbedarf abgeleitet.

In den weiteren Kapiteln folgen auf Basis des identifizierten Handlungsbedarfs die Lösungsentwicklung und die Anwendung. Zunächst wird in Kapitel 3 die Erarbeitung einer Methodik für den modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme

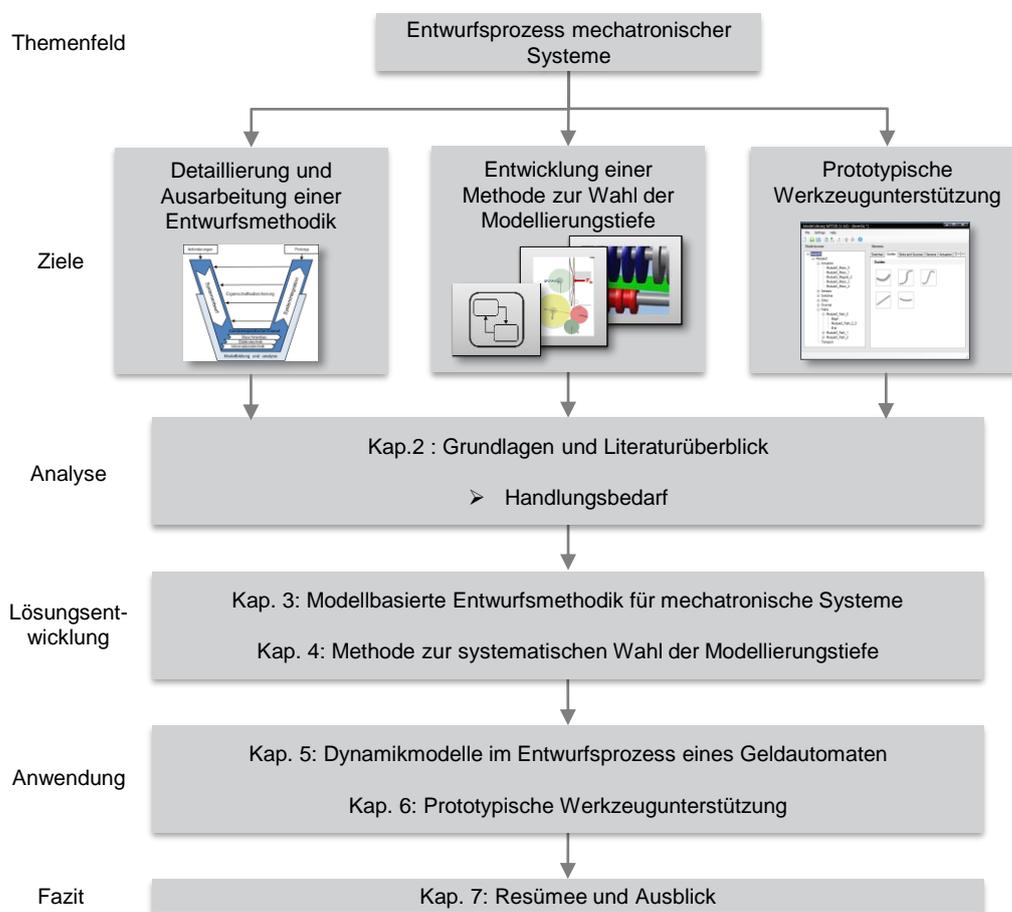


Bild 1-4: Aufbau und Ziele der Arbeit

beschrieben. Als Ausgangspunkt dient das sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie etablierte V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04].

Gemäß der Entwurfsmethodik wird in Kapitel 4 die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme vorgestellt. Zunächst werden die Modellierungstiefe und die Komplexität von Dynamikmodellen definiert. Anschließend wird ein Vorgehen bei Modellbildung und -analyse vorgestellt. Es folgen die Definition verschiedener Modellierungsziele im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme und die Qualifizierung der Modellierungstiefe mithilfe von vier Ebenen. In den weiteren Abschnitten werden Kriterien zur Wahl der Ebenen und die Quantifizierung der Modelleigenschaften Modellierungstiefe und Modellkomplexität gezeigt. Abschließend erfolgt die Anwendung der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel kooperierender Delta-Roboter.

In Kapitel 5 werden verschiedene Dynamikmodelle eines Geldautomaten bzw. seiner Systemelemente und deren Einsatzmöglichkeiten im modellbasierten Entwurfsprozess gezeigt. Sowohl die Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme als auch die entwickelte Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe finden in diesem Kapitel Anwendung.

Ein prototypisches IT-Werkzeug zur Unterstützung des Entwurfsprozesses eines Geldautomaten wird in Kapitel 6 vorgestellt. Das Werkzeug beinhaltet eine Modellbibliothek für den Geldweg eines Automaten mit Modellen unterschiedlicher Modellierungstiefe. Mithilfe des IT-Werkzeugs werden zum einen Modelle schneller erzeugt, und zum anderen bietet es die Möglichkeit, ein Systemmodell als zentrales Dokument des Entwurfs zu erstellen.

Abschließend werden in Kapitel 7 ein Resümee gezogen und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten gegeben.

2 Grundlagen und Literaturüberblick

Dieses Kapitel gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teile. Zuerst werden die Grundlagen dieser Arbeit vorgestellt, und anschließend wird ein Literaturüberblick zu den Themenfeldern modellbasierte Entwicklungsmethodiken und Methoden zur Wahl der Modellierungstiefe gegeben. Das Kapitel endet mit dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf.

Zunächst werden wichtige Begriffe erklärt (Abschnitt 2.1) und der Aufbau mechatronischer Systeme beschrieben (Abschnitt 2.2). Die Modellbildung in der Mechatronik ist ein wichtiger Teil dieser Arbeit und wird in Abschnitt 2.3 erläutert. Abschnitt 2.4 widmet sich dem modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme und gibt einen Überblick über bestehende Entwurfsmethodiken. Bei der Modellbildung stellt die Wahl der Modellierungstiefe eine große Herausforderung dar. Ziel ist es, systematisch ein Modell mit einer geeigneten Modellierungstiefe zu erstellen, das die gestellten Modellierungsziele effizient erfüllt. Hierzu werden in Abschnitt 2.5 Ansätze zur Wahl der Modellierungstiefe bzw. Ansätze zur Qualifizierung der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme vorgestellt. Abschließend wird in Abschnitt 2.6 der Handlungsbedarf auf Basis des recherchierten Literaturüberblicks dargestellt.

2.1 Begriffsdefinitionen

System

Nach [DIN09a] ist ein System eine Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die als von der Umgebung abgegrenzt betrachtet werden (vgl. Bild 2-1). Darüber hinaus werden in dieser Norm u. a. die folgenden Aussagen über den Systembegriff getroffen:

- *„Ein System wird im Allgemeinen hinsichtlich seiner Zielsetzung, zum Beispiel der Ausführung einer bestimmten Funktion, definiert.“*
- *„Elemente eines Systems können natürliche oder künstliche Gegenstände ebenso wie Arten von Denkvorgängen und deren Ergebnisse (zum Beispiel Organisationsformen, mathematische Verfahren, Programmiersprachen) sein.“*

- „Das System wird als von der Umgebung und von den anderen äußeren Systemen durch eine gedachte Hüllfläche abgegrenzt betrachtet, durch welche die Verbindungen zwischen diesen Systemen und dem betrachteten System hindurchgehen“ [...] [DIN09a, S. 11 ff.].

CZICHOS fasst den Systembegriff aus [DIN09a] in [Czi08, S. 9] zusammen und bezeichnet das System als ein Gebilde, das durch die Funktion und die Struktur verbunden ist. Die Systemfunktion überführt Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen und wird von der Struktur des Systems getragen. Die Systemstruktur besteht nach CZICHOS aus der Gesamtheit der Systemelemente und ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen. Jedes System kann wiederum als Teilsystem eines übergeordneten Systems betrachtet werden, und jedes Teilsystem lässt sich in kleinere Elemente gliedern. Nach EHRENSPIEL ist der Systembegriff somit

„[...] vom Kleinen zum Großen, vom Ganzen bis zum Teil durchgängig anwendbar [...]“ [Ehr07, S. 22].

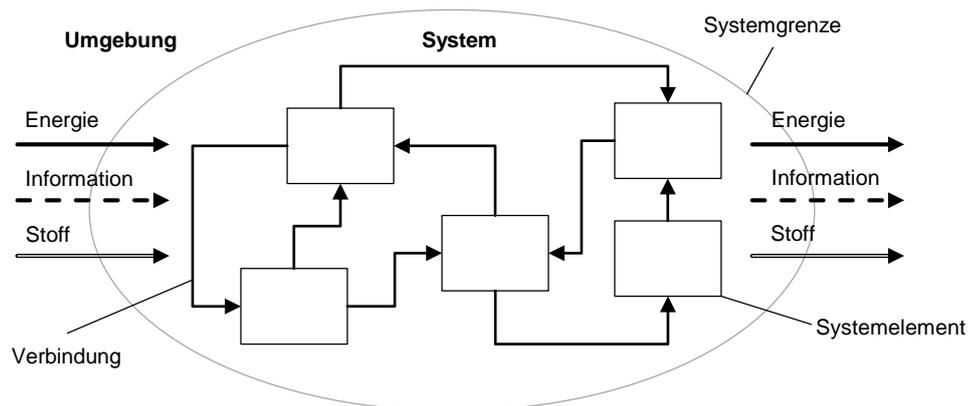


Bild 2-1: System [Ehr07, S. 21]

Bild 2-1 zeigt die graphische Darstellung eines Systems, das aus Elementen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemelementen besteht. Das System ist von der Umgebung abgegrenzt und steht mit den drei nach PAHL und BEITZ [PBF⁺05, S. 39 ff.] definierten Flüssen – Energie-, Stoff- und Informationsfluss – mit ihr in Verbindung.

In dieser Arbeit wird der Systembegriff nach der [DIN09a] und der Detaillierung aus technischer Sicht von CZICHOS verwendet.

Funktion

Der Zweck eines Systems oder eines Systemelements wird mit Hilfe von Funktionen beschrieben. Eine Funktion ist die eindeutige, lösungsneutrale und reprodu-

zierbare Formulierung des Zusammenhangs zwischen Eingang und Ausgang eines Systems (vgl. [PBF⁺05, S. 42 ff.]). Konkrete Realisierungs- und Umsetzungsmöglichkeiten werden dabei nicht betrachtet (vgl. [PL11, S. 61]). EHRENSPIEL definiert die Funktion eines Systems wie folgt:

„Eine Funktion im Sinne der Konstruktionsmethodik ist die lösungsneutrale Formulierung des gewollten (geplanten, bestimmungsgemäßen) Zwecks eines technischen Gebildes. Sie drückt die Zustandsänderung (Eigenschaftsänderung) eines Objekts (Umsatzprodukt) aus, die durch den Funktionsträger bewirkt wird. Man unterscheidet Gesamtfunktionen und Teilfunktionen sowie Hauptfunktionen und Nebenfunktionen.“ [Ehr07, S. 692].

Bei der Entwicklung technischer Systeme bilden Funktionen und Funktionsmodelle einen wichtigen Bestandteil und werden zu Analyse und Synthese eingesetzt. LINDEMANN definiert das Funktionskonzept bzw. -modell wie folgt:

„Das Funktionskonzept definiert das Produkt in seinen wesentlichen funktionalen Eigenschaften und bildet die Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte auf Wirk- und Bauebene“ [PL11, S. 61].

Wirkprinzip

Zur Erfüllung und Umsetzung einer Funktion werden Wirkprinzipien – auch Wirkzusammenhang genannt – entworfen und eingesetzt. PAHL und BEITZ definieren ein Wirkprinzip als:

„Grundsatz, von dem sich eine bestimmte Wirkung zur Erfüllung der Funktion ableitet (physikalischer, biologischer, chemischer Effekt oder Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale in Verbindung mit einer Teilfunktion)“ [PBF⁺05, S. 751].

Es entspricht nach EHRENSPIEL dem Lösungsprinzip, das die Verwirklichung einer Funktion oder mehrerer verknüpfter Funktionen durch die Auswahl von Effekten und wirkstruktureller Festlegung darstellt [Ehr07, S. 329]. Im Fokus ingenieurwissenschaftlicher Entwicklungen steht oft die Verwendung physikalischer Effekte im Gegensatz zu biologischen und chemischen Effekten. Es gibt unzählige Sammlungen, in denen physikalische Effekte dargestellt sowie aufgelistet sind (siehe z. B. [VDI97], [VDI82], [PL11], [PBF⁺05]). Eine weitere Sammlung von Wirkprinzipien aus dem Bereich Konstruktion sind in [Rot00], [Rot01] und [Rot96] zu finden. Ein Wirkprinzip lässt sich nach WOLFFGRAMM durch die Benennung und die Zielsetzung, die wesentlichen Eigenschaften des Arbeitsgegenstandes, die Funktionseigenschaften des Arbeitsorgans sowie die Wirkbedingung der Operationsenergie beschreiben [Wol78].

Die Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion wird als Wirkstruktur bezeichnet. Sie stellt ein Modell zur Beschreibung der Systemstruktur dar und wird an späterer Stelle genauer erläutert.

Lösungselemente und Lösungsmuster

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Lösungswissen je nach Fortschritt des Entwurfsprozesses in Form von Lösungsmustern (LM) und Lösungselementen (LE) dargestellt, deshalb werden die beiden Begriffe kurz erläutert. GAUSEMEIER et al. bezeichnen mit dem Begriff Lösungselement realisierte und bewährte Lösungen zur Erfüllung einer Funktion des Gesamtsystems. Es wird zwischen materiellen und immateriellen Lösungselementen unterschieden. Lösungselemente können sowohl Bauteile, -gruppen, Module als auch Softwarebibliotheken (SPS-Bausteine etc.) sein. Lösungselemente werden u. a. mithilfe von detaillierten Gestaltmodellen oder von deataillierten disziplinspezifischen Verhaltensmodellen spezifiziert. Eine genaue Beschreibung der Spezifikation von Lösungselementen findet sich in [GTS14, S. 102 ff.].

Unter Lösungsmustern verstehen GAUSEMEIER et al. die Klassifizierung von Lösungselementen zur abstrakten Darstellung einer Klasse von Lösungselementen. Zu einem Lösungsmuster existieren mehrere Lösungselemente. Deren detaillierte Spezifikationen werden in eine abstraktere, funktionale Beschreibung überführt; so wird z. B. ein detailliertes Verhaltensmodell in ein idealisiertes Verhaltensmodell überführt, welches das grundsätzliche Verhalten dieser Klasse von Lösungselementen repräsentiert (vgl. [GTS14, S. 124 ff.]).

Sowohl Lösungsmuster als auch Lösungselemente können wiederum Teile eines übergeordneten Elementes oder Musters sein. Hierdurch entsteht eine sogenannte Kaskade von Lösungselementen/-mustern. Beispielsweise ist das Lösungselement Dämpfer ein Teil des Lösungselementes MacPherson-Federbein¹, das wiederum ein Teil des Lösungselementes Fahrwerk ist etc. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf [Oes18] und [Dum10] verwiesen. Eine detaillierte Darstellung zur Erstellung und Auswahl von Lösungsmustern wird in [Ana15] gegeben.

Modell

Modelle dienen der Beschreibung und Analyse von Systemen. Je nach Anwendung und Zweck des Modells kann seine Art variieren. Zunächst folgt die Definition des allgemeinen Modellbegriffs nach STACHOWIAK, der sich in seinem Werk [Sta73] mit der Modelltheorie im Allgemeinen intensiv auseinandersetzt. Er definiert ein Modell als Abbild von etwas sowie als Vorbild für etwas. Ferner kann ein Modell

¹Das MacPherson-Federbein ist eine weit verbreitete Vorderachsradaufhängung (2005 weltweit 78 %) und benannt nach dem US-Amerikaner Earle S. MacPherson [HEG07, S. 464].

als eine Repräsentation eines bestimmten Originals – im Sinne eines Abbildes oder Vorbildes – angesehen werden.

Darüber hinaus definiert STACHOWIAK drei Hauptmerkmale zur Beschreibung des allgemeinen Modellbegriffs [Sta73, S. 131 ff.]:

1. „**Abbildungsmerkmale:** Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können“ [Sta73, S. 131].
2. „**Verkürzungsmerkmal:** Modelle erfassen im allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen“ [Sta73, S. 132].
3. „**Pragmatisches Merkmal:** Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen“ [Sta73, S. 132-133].

CELLIER definiert ein Modell folgendermaßen:

„A model (M) for a system (S) and an experiment (E) is anything to which E can be applied in order to answer questions about S “ [Cel91, S. 5].

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2209 (3D-Produktmodellierung [VDI09]) und der VDI-Richtlinie 2211 (Datenverarbeitung in der Konstruktion, Berechnungen in der Konstruktion [VDI03]) wird in [VWB⁺09, S. 130 ff.] ein Modell als Abbild oder Nachbild eines Originals bezeichnet, das nicht alle Eigenschaften des Originals besitzt, wobei das Original selbst auch ein Modell sein kann. Es ist ein abstraktes materielles oder immaterielles Gebilde, um ein Original für einen bestimmten Zweck zu repräsentieren. Weiterhin wird das Modell als eine Abstraktion der Realität bezeichnet, und es werden Eigenschaften sowie Ausprägungen weggelassen, die für die Betrachtung oder Aufgabenstellung nicht von wesentlicher Bedeutung sind. In Bild 2-2 ist die Problemlösung mittels Modellen graphisch dargestellt.

Es gibt zahlreiche Gründe für den Einsatz von Modellen. Häufig werden sie eingesetzt, weil die Untersuchungen an ihnen meist kostengünstiger, ungefährlicher, reproduzierbar und besser kontrollierbar sind [GTS14]. In jedem Fall muss ein angemessenes Verhältnis zwischen dem Nutzen durch die Modellanalyse und dem Aufwand der Modellerstellung oder Modellbildung erreicht werden. In [VWB⁺09,

S. 130] wird die Modellbildung als Abstraktion beschrieben. Die objektive Realität wird durch die Wahrnehmung, die einer unbewussten Abstraktion entspricht, in eine subjektive Realität überführt. Die Modellierung stellt eine bewusste Abstraktion dar und überführt die subjektive Realität in ein Modell der Realität. Die Modellanalyse führt zu Lösungen im Modell, die wiederum interpretiert werden müssen, damit sie auf die Problemstellung am Original übertragen werden können (siehe Bild 2-2). Modellanalyse und Modellbildung haben eine enorme Bedeutung und einen großen Nutzen zur Lösung komplexer Probleme.

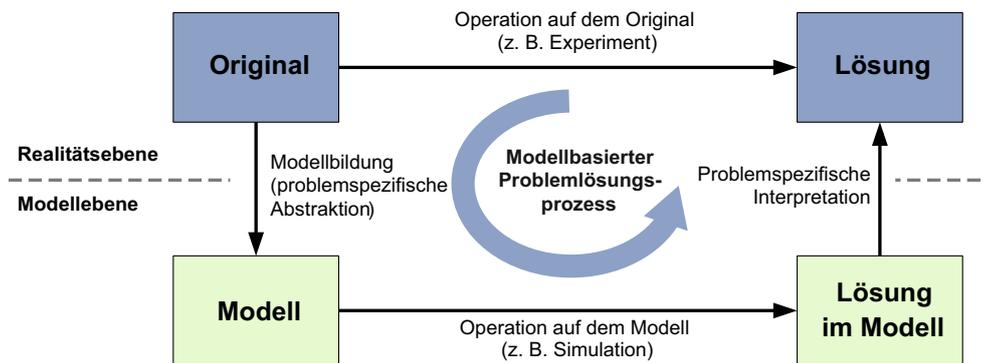


Bild 2-2: Problemlösung mittels Modellen [GTS14, S. 30]

In Bezug auf die vorliegende Arbeit finden die folgenden, nach [GTS14, S. 31 ff.] definierten Unterscheidungen von Modellen ihre Anwendung, wobei es sich dabei ausschließlich um immaterielle Modelle handelt:

- Ein **Vorgehensmodell** wie das bereits gezeigte V-Modell oder das Vorgehen bei der ENTIME-Entwurfssystematik (siehe Bild 1-1 und 1-2, S. 3) beschreibt die Abfolge von Prozessphasen und -schritten. Vorgehensmodelle stellen nach LINDEMANN ein Hilfsmittel zum Planen und Kontrollieren dieser Phasen und Prozesse dar [Lin09, S. 33].
- Disziplinübergreifende **Systemmodelle** (in [VWB⁺09, S. 21] auch als Produktmodelle bezeichnet) beschreiben die komplexen Systemzusammenhänge und Abhängigkeiten auf einem gleichbleibendem Abstraktionsniveau und z. T. über alle Phasen des virtuellen Entwurfsprozesses hinweg [FMS15]. Das Systemmodell gliedert sich dabei zumeist in verschiedene konsistente und verknüpfte Teilmodelle (Partialmodelle), in denen die jeweiligen Aspekte separat beschrieben werden. Die Systemstruktur wird zum Beispiel in einem Strukturmodell dargestellt.
- **Anforderungsmodelle** repräsentieren das Zielsystem und bilden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie qualitative und quan-

titative Randbedingungen für das zu entwickelnde Produkt ab [VWB⁺09, S. 148]. Dies geschieht meist textuell und informell oder semi-formal.

- Ein **Funktionsmodell** legt nach VAJNA et al. die funktionale Struktur bzw. die Funktionshierarchie des zu entwickelnden Systems fest [VWB⁺09, S. 148].
- Das **Strukturmodell** bildet die hierarchische und die modulare Struktur des Systems ab [GTS14, S. 31].
- **Verhaltensmodelle** beschreiben ein System, Teilsystem oder Systemelement im Hinblick auf das dynamische, zeitliche oder statische Verhalten. Quantitative mathematische Modelle ermöglichen die Analyse des Systems durch Simulation (vgl. Abschnitt 2.3).
- In **Gestaltmodellen** wird die Geometrie des Systems zumeist mittels 2D- oder 3D-CAD-Zeichnungen beschrieben. Es wird beispielsweise zwischen Kanten- (Drahtmodelle, Wireframes), Flächen- (Surface Models, Sheet Bodies) und Volumenmodellen (Solids, Solid Models) unterschieden, um nur einige zu nennen [VDI09, S. 23].

Modellierungstiefe und Modellkomplexität

“The most common attributes used to compare alternative models are level of detail and complexity although these terms are used in a number of different ways“ [BT96, S. 1].

BROOKS et al. bezeichnen die Modellierungstiefe (Synonyme sind Detaillierungsgrad, -tiefe oder komplementär Abstraktionsgrad und im Englischen level of detail, modeling depth, degree of abstraction) und die Komplexität eines Modells als häufig verwendete Eigenschaften zum Vergleich verschiedener Modelle [BT96]. Allerdings existiert keine allgemein akzeptierte Definition der Begriffe Modellierungstiefe und (Modell-) Komplexität. Häufig werden Modelle als detailliert bezeichnet, obwohl man damit ausdrücken will, dass ein Modell aus vielen Elementen und Wechselwirkungen besteht und somit keine Aussage über den Detaillierungsgrad bzw. die Modellierungstiefe eines Elementes gibt. Oder ein Modell wird als komplex bezeichnet, weil es schwierig zu verstehen und eigentlich kompliziert gemeint ist. Gelegentlich werden die beiden Begriffe fälschlicherweise auch gleichgesetzt.

Die Wahl eines geeigneten Modells mit einer ausreichenden Modellierungstiefe ist eine große Herausforderung (vgl. [Law91], [BT96]). Einerseits muss die Modellierungstiefe so gewählt werden, dass das Modell die Modellierungsziele erfüllt (vgl. [Wal95]), und andererseits soll ein Modell möglichst einfach abgebildet werden. Daher wird die Wahl der Modellierungstiefe in [Rob08] und [Law09] auch mehr als eine „*Kunst anstelle einer Wissenschaft*“ bezeichnet. NEUNZERT schreibt:

„[...] ein Modell zu finden, das so einfach wie möglich, aber so genau wie nötig ist, ist eine Kunst: man braucht Erfahrung und Phantasie [...]“ [Neu90, S. 16].

In [RB95] wird die Komplexität eines Modells als Zusammenspiel aus dem Modellumfang und dem Detaillierungsgrad bezeichnet. Mit dem Umfang eines Modells bezeichnet ROBINSON die Elemente, die im Modell berücksichtigt werden müssen, wohingegen der Detaillierungsgrad die erforderliche Genauigkeit eines Elementes beschreibt. WEBSTER et al. sind der Auffassung, dass die Komplexität häufig mit der Modellierungstiefe verwechselt wird [WPH⁺84]. BROOKS et al. schreiben in [BT96], dass ein einfaches Modell das Gegenteil sowohl eines detaillierten als auch eines komplexen Modells ist. Daher wird die Komplexität von ihnen als eine strukturelle Eigenschaft eines Modells bezeichnet, wohingegen der Detaillierungsgrad eine Aussage über die Genauigkeit gibt. In [Sim62, S. 481] beschreibt SIMON, dass die Komplexität bzw. der Grad der Komplexität eines Modells abhängig von der Beschreibungsart und der Betrachtungsweise ist und grundsätzlich durch die Anzahl der Elemente definiert ist. JUST et al. erklären den Begriff Modellierungstiefe als Merkmal, wie detailliert ein physikalischer Effekt modelliert ist [JIZ⁺10].

Dieser Überblick hat gezeigt, dass es in der Literatur keine einstimmige Meinung zu den beiden Modelleigenschaften gibt. Die Definition dieser Begriffe ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Für den weiteren Verlauf gelten die folgenden Definitionen, die in Kapitel 4 präziser beschrieben und deren Unterschiede verdeutlicht werden.

Modellierungstiefe: Der Begriff Modellierungstiefe beschreibt, wie detailliert ein Effekt und seine Wechselwirkungen in einem Modell abgebildet sind.

Modellkomplexität: Die Modellkomplexität (kurz: Komplexität) eines Modells ist eine strukturelle Eigenschaft. Sie gibt Auskunft über die Anzahl an Systemelementen, Wechselwirkungen und Zuständen.

Simulation

Eine Simulation ist die Durchführung eines Experiments an einem Modell mit dem Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse über das Modell auf das System zu übertragen. JANSCHKE bezeichnet die Simulation als das Experimentieren an Modellen (vgl. [Jan10, S. 50]). Es wird häufig zwischen einer Simulation mit und ohne Rechnerunterstützung unterschieden (vgl. [VDI09, S. 107]). Letztere können beispielsweise Experimente im Windkanal sein, bei denen zur Untersuchung aerodynamischer und aeroakustischer Eigenschaften von Flugzeugen oder Autos Verkehrssituationen in der Luft oder auf der Straße simuliert werden. VAJNA et al. beschreiben die Simulation als:

„[...] die Durchführung von „Experimenten“ an passenden physikalischen (realen) Modellen oder an mathematischen (abstrakten analytischen oder numerischen) Modellen [...]“ [VWB⁺09, S. 152].

Die untersuchten Modelle werden auch als Simulationsmodelle bezeichnet. Die Gründe für den Einsatz von Simulationsmodellen bzw. für die Durchführung von Simulationen sind im Wesentlichen:

- Vorgänge verstehen und nachvollziehen zu können,
- Vorgänge und Szenarien zu optimieren sowie
- Vorgänge vorhersagen zu können.

Simulationen oder Experimente an Simulationsmodellen werden häufig eingesetzt, wenn beispielsweise (vgl. [VWB⁺09], [VDI13], [JT14a]):

- kein reales System existiert oder es aus anderen Gründen nicht verfügbar ist (z. B. in der Entwurfsphase),
- Untersuchungen am realen System zu aufwändig oder teuer sind,
- das Experiment am realen System zu gefährlich ist (z. B. bei Flugzeugen oder Kraftwerken),
- die Untersuchungen ethisch nicht vertretbar sind,
- Parameterstudien und -optimierungen am Simulationsmodell leichter durchzuführen sind,
- das reale System nicht beobachtbar ist.

Ein großer Vorteil beim Einsatz von Simulationsmodellen ist die Reproduzierbarkeit. Darüber hinaus eignen sich Simulationen zur Ausbildung von Fachpersonal, wie z. B. Piloten, und sind mittlerweile auch ein wichtiger Bestandteil der Unterhaltungsindustrie.

In dieser Arbeit wird die Definition nach VAJNA et al. verwendet, wobei der Fokus auf Simulationen mit Rechnerunterstützung liegt [VWB⁺09].

2.2 Mechatronische Systeme

Im folgenden Abschnitt werden die Grundbausteine mechatronischer Systeme sowie die Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme erläutert.

Grundbausteine mechatronischer Systeme

Gemäß dem allgemeinen Systembegriff (vgl. Abschnitt 2.1) ist in Bild 2-3 die Grundstruktur mechatronischer Systeme dargestellt. Nach der VDI-Richtlinie

2206 bestehen mechatronische Systeme in der Regel aus den vier Grundbausteinen Grundsystem, Sensorik, Informationsverarbeitung und Aktorik [VDI04, S. 14 ff.], [GTS14, S. 27 ff.]:

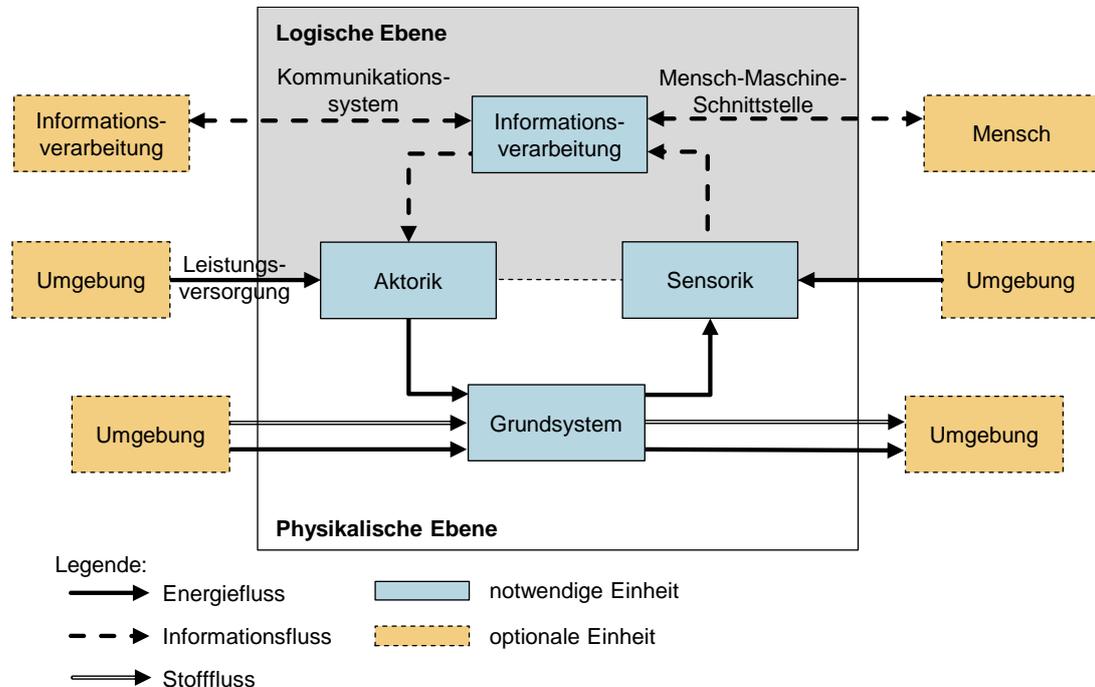


Bild 2-3: Grundstruktur mechatronischer Systeme (vom Autor verändert, vgl. [VDI04, S. 14], [GTS14, S. 27])

- Das **Grundsystem** stellt den Kern der physikalischen Ebene dar. Es besteht in der Regel aus mechanischen, elektromechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Elementen oder aus Kombinationen daraus.
- Die **Sensorik** dient zur Erfassung von Zustandsgrößen² des Grundsystems sowie zur Weitergabe der Größen an die Informationsverarbeitung und bildet somit die Schnittstelle von der physikalischen zur logischen Ebene.
- Die **Informationsverarbeitung** bildet den Kern der logischen Ebene und dient u. a. zur Verarbeitung der Sensorsignale in Stellsignale für die Aktorik. Zu ihren Aufgaben gehören die Regelung bzw. Steuerung des Systemverhal-

²Zustandsgrößen oder Zustandsvariablen eines technischen Systems sind eingeführte Variablen, die nach FÖLLINGER "[...] zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen der Strecke vermitteln und den Zustand der Strecke charakterisieren" [Föll08, S. 387]. In der Regel handelt es sich dabei um physikalische Größen eines technischen Systems, wie z. B. Position oder Geschwindigkeit.

tens, ggf. die Optimierung des Systemverhaltens, die Überwachung und die Ablaufsteuerung sowie Sicherungs- und Notfallroutinen (vgl. [Hes06, S. 5]).

- Die **Aktorik** hat die Aufgabe, die von der Informationsverarbeitung vorgegebenen Stellsignale umzusetzen und somit Einfluss auf das Grundsystem zu nehmen (Zustandsgrößen zu verändern).

Grundsätzlich besteht das mechatronische System aus den vier genannten Grundbausteinen. Gelegentlich entstehen durch die räumliche Integration von Funktionseinheiten intelligente Einheiten, z. B. existieren Aktoren und Sensoren mit einer eigener Informationsverarbeitung. Darüber hinaus kann die Leistungsversorgung von Aktoren und Sensoren zum System gehören oder außerhalb des Systems liegen.

Weiterhin besitzt das mechatronische System Schnittstellen zu anderen optionalen Einheiten außerhalb des Systems. Die Informationsverarbeitung kann beispielsweise über ein Kommunikationssystem mit Informationsverarbeitungen anderer technischer Systeme Informationen austauschen, oder über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle kann der Mensch Einfluss auf das System nehmen.

Die einzelnen Bausteine mechatronischer Systeme sind mithilfe der folgenden drei Flussarten verknüpft (vgl. [PBF⁺05]):

- **Energiefluss:** Beschreibt mechanische, elektrische oder thermische Energie sowie Kenngrößen wie z. B. Kraft oder elektrischen Strom.
- **Stofffluss:** Stellt die Zu- und Abfuhr von Stoffen dar. Beispiele sind Kühlflüssigkeit, Gase oder Festkörper.
- **Informationsfluss:** Beschreibt den Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Elementen des mechatronischen Systems, wie z. B. Messsignale, Stellsignale etc.

Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme

Einfache mechatronische Systeme lassen sich mithilfe der vier Bausteine problemlos darstellen. Wegen der steigenden Komplexität technischer Systeme reicht diese Darstellung aber häufig nicht aus. Daher müssen alternative Strukturierungsprinzipien herangezogen werden. Zweck der Strukturierung ist es, Ordnung zu schaffen und komplexe Dinge in zu bewältigende Teilaufgaben zu zerlegen, um so die Übersichtlichkeit, das Verständnis und die Nachvollziehbarkeit für Dritte zu steigern und Fehler zu vermeiden [JT14b].

LÜCKEL et al. unterscheiden zur Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme zwischen zwei Ordnungsprinzipien zur Reduzierung der Komplexität [LKS00, S. 15]:

- Hierarchisierung (vertikale Gliederung): Eine Abstraktion erfolgt nach oben und die Detaillierung nach unten.
- Modularisierung (horizontale Gliederung): Zusammenfassung / Abgrenzung von Funktionen oder Bauteilen einer Ebene.

Für die vorliegende Arbeit wird zur Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme die in Bild 2-4 dargestellte Variante aus [HNS⁺97, S. 3 ff.] und [LKS00, S. 15] gewählt. Sie besteht aus den folgenden drei Ebenen und berücksichtigt die beiden oben genannten Ordnungsprinzipien:

- **Mechatronisches Funktionsmodul (MFM):** Die vier Grundbausteine eines mechatronischen Systems, bestehend aus Grundsystem, Sensorik, Aktorik und einer lokalen Informationsverarbeitung, bilden das MFM [Jun95, S. 227].
- **Autonomes Mechatronisches System (AMS):** Das AMS besteht aus informationstechnisch und/oder mechanisch gekoppelten MFMs. Eine übergeordnete Informationsverarbeitung übernimmt übergeordnete Aufgaben, etwa eine Überwachung mit Fehlerdiagnose, und generiert ggf. Vorgaben für die lokalen Informationsverarbeitungen der MFMs. Darüber hinaus kann ein AMS zugeordnete Sensoren beinhalten. Ein AMS benötigt keine eigene Aktorik, da diese durch unterlagerte MFMs realisiert werden.
- **Vernetztes Mechatronisches System (VMS):** Eine rein informationstechnische Kopplung von autonomen mechatronischen Systemen mit einer übergeordneten Informationsverarbeitung bildet ein VMS. Analog zu einem AMS werden in der Informationsverarbeitung von VMS übergeordnete Aufgaben realisiert.

Diese Darstellung lässt sich an einem einfachen Beispiel veranschaulichen. Ein Vereinzler³ in einem Geldautomaten – bestehend aus einer mechanischen Grundstruktur, Sensoren, Aktoren sowie einer lokalen Informationsverarbeitung – bildet ein MFM. Der Geldautomat selbst besteht aus vielen MFMs mit einer übergeordneten Informationsverarbeitung und stellt ein AMS dar. Verbindet man mehrere Geldautomaten zu einem Verbund, entsteht ein VMS.

³Die Aufgabe eines Vereinzlers in einem Geldautomaten besteht im Trennen einer einzelnen Geldnote von einem Geldnotenstapel.

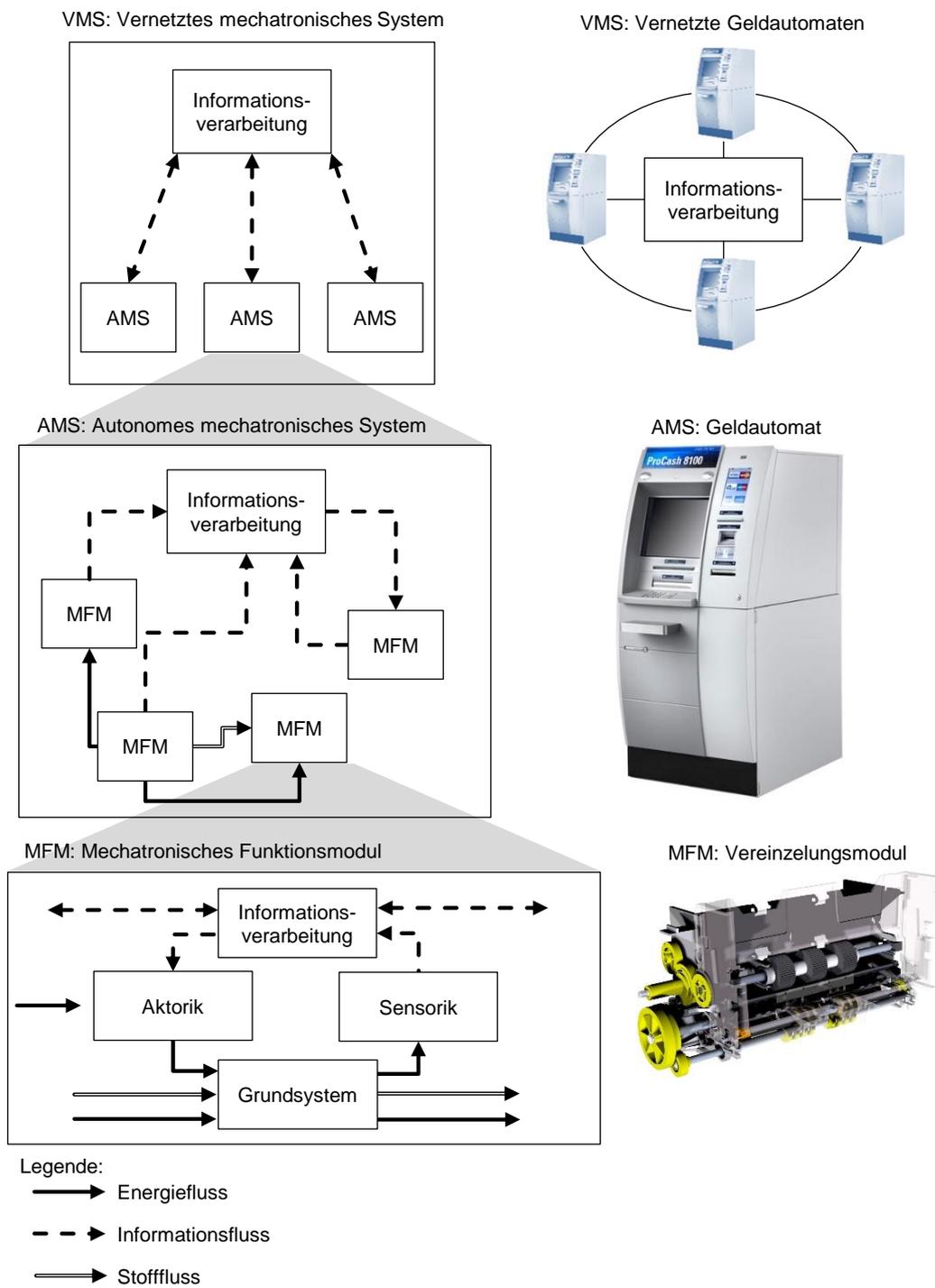


Bild 2-4: Hierarchie mechatronischer Systeme (vom Autor verändert, vgl. [GL00, S. 6])

2.3 Modellierung mechatronischer Systeme

Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist die Modellbildung bzw. die Modellierung mechatronischer Systeme. Sie lässt sich nach KROLL in drei wesentliche Strategien unterteilen (vgl. [Kro13]):

- die theoretische Modellbildung,
- die experimentelle Modellbildung und
- die wissensbasierte Modellbildung.

Das Ziel ist es, das System oder Teile des Systems mithilfe eines meist mathematischen Modells zu beschreiben, um so Aussagen über das System treffen zu können. Die mathematischen Modelle unterscheiden sich in der Gleichungsart (Struktur) und der Anzahl an Parametern. Zu jeder Modellbildungsstrategie existieren Methoden, die zur Erstellung des mathematischen Modells dienen. Im Folgenden werden die Modellierungsstrategien vorgestellt. Es folgt eine Übersicht über die verschiedenen Arten mathematischer Modelle, bevor im letzten Teil dieses Abschnitts ein Überblick über Methoden zu ihrer Erzeugung gegeben wird.

2.3.1 Modellbildungsstrategien

Im Fokus dieser Arbeit steht die theoretische Modellbildung. Der Vollständigkeit halber werden die experimentelle und die wissensbasierte Modellbildung ebenfalls kurz vorgestellt.

Theoretische Modellbildung

Die theoretische Modellbildung beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen physikalischen Systemeigenschaften und den Parametern des Systems. Das mathematische Ersatzmodell bzw. die Systemgleichungen werden anhand physikalischer Gesetze hergeleitet. Die theoretische Modellbildung basiert stets auf Annahmen und Vereinfachungen der Realität, weshalb genaue Kenntnisse über das zu modellierende System vorausgesetzt sind. Einige Gründe für die Verwendung der theoretischen Modellbildung sind im Folgenden aufgeführt (vgl. [JT14b]):

- Analyse des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke⁴ (Verständnis über den Prozess),
- Grundlage für den Reglerentwurf,
- Grundlage für die Auslegung bzw. Dimensionierung des Systems,

⁴Das gezielt zu beeinflussende dynamische System wird in der Regelungstechnik auch als (Regel-) Strecke bezeichnet [Föl08, S. 1 ff.].

- rechnerische Vorhersage des Systemverhaltens durch Simulation,
- quantitative Berechnung von Kraft und Bewegungsgrößen,
- Klärung physikalischer Ursachen für störende Erscheinungen (z. B. Resonanzschwingungen, Brüche, Lärm)(vgl. [Dre06, S. 5]),
- Ermittlung optimaler Parameterwerte hinsichtlich spezieller Kriterien, wie z. B. Materialaufwand (Masse), Steifigkeit, Lage kritischer Drehzahlen [Dre06, S. 5] und
- Überwachung und Fehlerdiagnose, Parameterschätzung, Zustandsschätzung und Beobachtung [Ise08, S. 333].

In der Regel zeichnen sich mechatronische Systeme durch ein kontrolliertes dynamisches Verhalten aus. In der Modellierung gilt es, dieses dynamische Verhalten mithilfe von mathematischen Modellen abzubilden. Bild 2-5 zeigt die Vorgehensweise bei der Modellierung der Systemdynamik mechatronischer Systeme am Beispiel eines realen Systems in Form eines Elektromotors.

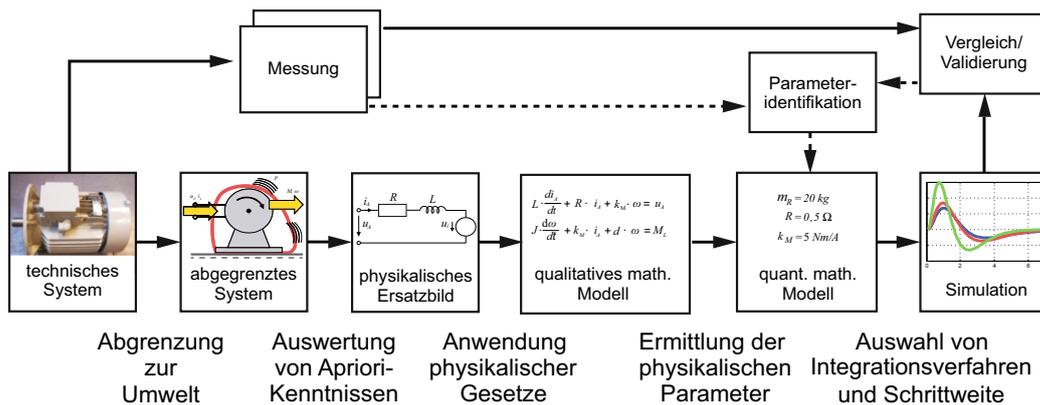


Bild 2-5: Vorgehensweise zur Erstellung von Dynamikmodellen realer Systeme (in Anlehnung an [GTS14, S. 40], vgl. [Oes18], [Kru19])

Zunächst müssen die technische Anlage gegenüber der Umwelt abgegrenzt und Schnittstellen definiert werden. Hierzu werden die Ein- und die Ausgangsgrößen sowie innere Zustände bestimmt (vgl. Systembegriff, Abschnitt 2.1). Anschließend werden Apriori-Kenntnisse genutzt, um Annahmen und Vereinfachungen zu treffen und ein physikalisches Ersatzbild des zu modellierenden Systems zu erstellen. Dieser Schritt ist entscheidend für eine erfolgreiche Modellierung. Es wird der Detaillierungsgrad bzw. die Modellierungstiefe des Modells festgelegt, und darüber hinaus gilt es, die entscheidenden physikalischen Effekte zu identifizieren, was ein ausreichendes Systemverständnis und detaillierte Erfahrungswerte voraussetzt. Ein physikalisches Ersatzbild entsteht durch die Verwendung von sogenannten „reduzierten Lösungselementen“ [Trä15] oder „First-Principles“ [HL11,

S. 77]. Sie bilden einen Baukasten aus einfachen Standardbausteinen der jeweiligen Disziplinen, aus denen sich ein Gesamtsystem zusammensetzen lässt. Zu den reduzierten Lösungselementen zählen beispielsweise die Energiespeicher *mechanische Masse*, *hydraulische* und *elektrische Induktivität* sowie die Energiespeicher *mechanische Feder*, *hydraulische* und *elektrische Kapazität*. Des Weiteren gehören die Energieverbraucher *mechanischer Dämpfer*, *Drossel* (hydr. Widerstand) und der *elektrische Widerstand* zu den reduzierten Lösungselementen.

Auf Basis des physikalischen Ersatzbildes wird unter Anwendung physikalischer Gesetze ein qualitatives mathematisches Modell erzeugt. Die einzelnen Parameter müssen im nächsten Schritt ermittelt werden, um so ein quantitatives mathematisches Modell zu liefern. Die Parameter können Datenblättern o. ä. entnommen werden oder müssen ggf. mithilfe von Messungen am realen System, am Teilsystem oder an Modellen höherer Modellierungstiefe identifiziert werden (vgl. experimentelle Modellbildung, S. 26). Anschließend kann das quantitative mathematische Modell durch die Überführung in ein numerisches Modell simuliert werden. Hierzu werden numerische Integrationsverfahren – sogenannte Solver – verwendet. Es existieren verschiedene Klassen von Integrationsverfahren zur Lösung der Gleichungen, wie z. B. Einschritt- und Mehrschrittverfahren sowie explizite und implizite Verfahren. Eine Übersicht über gängige numerische Integrationsverfahren und deren Eigenschaften findet sich in [SWP12].

Ein ständiger Begleiter der Modellierung ist die Plausibilitätsprüfung, auch Verifikation genannt. Mithilfe der Verifikation wird überprüft, ob das Modell die spezifizierten Anforderungen erfüllt und für die Simulation im Rechner korrekt implementiert wurde (siehe [VWB⁺09, S. 154]). Die Verifikation ist die Beantwortung der Frage:

“Habe ich das Modell richtig gebaut (implementiert)?“ [Jan10, S. 52].

Die Verifikation ist der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und aussagekräftigen Referenzdaten. Hierzu eignen sich Erkenntnisse, die nach JANSCHKEK

“[...] über analytische Betrachtungen der zugrunde liegenden mathematischen Modelle gewonnen werden können [...]“ [Jan10, S. 53].

Als Beispiele nennt JANSCHKEK das stationäre Verhalten über Grenzwertsätze der LAPLACE-Transformation, das eingeschwungene Verhalten bei harmonischer Anregung mittels Frequenzgang sowie die Drallerhaltung bei konservativen mechanischen Systemen (vgl. [Jan10]).

Sobald das Modell verifiziert und simulierbar ist, muss man es, um eine gültige Aussage treffen zu können und die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zu überprüfen, validieren. Die Validierung erfolgt mittels eines Vergleichs der Simulationsergebnisse mit Messungen. Genau wie bei der Parameteridentifikation

erfolgen die Messungen am realen System, an Teilsystemen oder an bereits validierten Modellen mit einer höheren Modellierungstiefe. Bei der Parameteridentifikation und der Validierung ist darauf zu achten, dass verschiedene Messungen verwendet werden. Im Gegensatz zur Verifikation ist die Validierung die Beantwortung der Frage:

“Habe ich das richtige Modell gebaut?“ [Jan10, S. 52].

Bzgl. der Validierung sei an dieser Stelle auf [Kru19] verwiesen. KRUSE stellt in seiner Arbeit eine Methodik zur Validierung von Modellen vor. Weitere Anregungen zur Vorgehensweise bei der Modellierung finden sich in [Sal93], [Jan10], [Ise08], [VWB⁺09] und [Pid96]. BOLTON gibt in [Bol04] eine Übersicht zu Bausteinen mechatronischer Systeme und die Modellierung u. a. von mechanischen, elektrischen, hydrodynamischen und thermischen Systemen. In [HGP07] werden Beispiele für mechatronische Komponenten und auch zur Modellierung von Aktoren und Sensoren gezeigt. NOLLAU zeigt in [Nol09] eine praxisnahe Einführung in die Modellbildung und die Simulation technischer Systeme. Ein Überblick über die theoretische Modellierung hydraulischer Systeme ist in [JK03] aufgeführt.

Zur Beschreibung von Systemen gibt es eine Vielzahl an Modellklassen, die bei der Entwicklung mechatronischer Systeme in den jeweiligen Disziplinen eingesetzt werden. Tabelle 2-1 zeigt typische Modelle zur Beschreibung von Teilen mechatronischer Systeme, die den jeweiligen Disziplinen zugeordnet sind, in denen sie eingesetzt werden.

Die Modellklassen sind dabei nur Mittel zum Zweck und geben dem Anwender Kriterien an die Hand, wie schließlich die mathematischen Modelle erzeugt werden können und anschließend ein numerisches Modell abgeleitet werden kann. In den meisten Fällen werden das mathematische und anschließend das numerische Modell automatisiert vom Modellierungswerkzeug⁵ erzeugt.

Es existieren eine Vielzahl an Methoden für die theoretische Modellierung mechatronischer Systeme, die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellt werden.

⁵Zu den Modellierungswerkzeugen gehören u. a. Programme wie *Adams*[®] [Ada15], *RecurDyn*[®] [Fun14], *Dymola*[®] [Dym15] und *Simscape*[®] [Sim15].

Tabelle 2-1: Disziplinspezifische Modelle zur Beschreibung mechatronischer Systeme (vgl. [SE14], [Föl08], [Nol09], [GTS14])

<p><i>Mechanik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mehrkörpermodelle • Finite-Elemente-Modelle • Modelle kontinuierlicher Systeme • Flexible Mehrkörpermodelle
<p><i>Elektrotechnik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Netzwerke • Elektrische Schaltpläne
<p><i>Regelungstechnik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Zustandsraumdarstellung • Übertragungsfunktion • Blockschaltbild
<p><i>Informatik/Softwaretechnik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Strukturdiagramme, wie Komponenten- und Klassendiagramme • Dynamikdiagramme, wie Zustands-, Aktivitäten- und Sequenzdiagramme
<p><i>Hydraulik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hydraulische Schaltpläne • CFD-Modelle zur Strömungsuntersuchung
<p><i>Thermodynamik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Wärmeübertragungsmodelle • Molekulare Dynamikmodelle
<p><i>Partikelverfahrenstechnik</i></p>
<p>...</p>

Experimentelle Modellbildung

Die experimentelle Modellbildung erfolgt auf Basis von Messungen an einem System, indem Ein- und Ausgangssignale erfasst und mittels einer Identifikationsmethode ausgewertet werden. Deshalb bezeichnet ISERMANN die experimentelle Modellbildung auch als Identifikation [Ise08, S. 333]. Mithilfe einer Identifikationsmethode entsteht ein mathematisches Ersatzmodell, das den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal abbildet. Die meisten Methoden basieren auf der Anregung des Systems mit einer definierten Zeitfunktion und einer Analyse seiner Zeitantwort. Anschließend werden die Parameter des Modells so angepasst, dass seine Zeitantworten mit denen des Systems übereinstimmen. Die experimentelle Modellbildung wird u. a. auch eingesetzt, um theoretisch erstellte Modelle

zu überprüfen und um ggf. eine Online-Identifikation oder Parameterschätzung in ein System zu integrieren (vgl. [Ise08]).

Die experimentelle Modellbildung liefert entweder ein parametrisches oder ein nichtparametrisches Modell (vgl. [Ise08][S.335]). Parametrische Modelle bestehen aus Gleichungen, welche die Parameter explizit enthalten (z. B. Differentialgleichungen oder Übertragungsfunktionen). In [VDI04] ist die experimentelle Modellbildung folgendermaßen definiert:

“Aus Messungen an dem zu beschreibenden System wird rückwärts auf die Systemstruktur(-gleichungen) geschlossen“ [VDI04, S. 53].

Zu den gängigen Identifikationsmethoden für parametrische Modelle gehören nach ISERMANN et al. u. a. (vgl. [IM11]):

- die Kennwertermittlung,
- die Modellanpassung,
- die Parameterschätzung,
- Zustandsraummethoden,
- Extended Kalman Filter und
- neuronale Netze.

Nichtparametrische Modelle bestehen aus Funktionen in Form von Wertetafeln oder Kurvenverläufen (wie z. B. Gewichtsfunktionen, Frequenzgangwerte). Bei diesen Modellen bleibt der physikalische Zusammenhang zwischen den Modellparametern und den Systemparametern unbekannt. Identifikationsmethoden nichtparametrischer Modelle sind beispielsweise (vgl. [IM11]):

- die Fourier-Analyse,
- die Frequenzgangmessung und
- die Korrelation.

Weiterführende Informationen zu Vorgehensweisen und Methoden bei der experimentellen Modellbildung finden sich in [Ise08, S. 333-407], [VWB⁺09, S. 134 ff.] und [GW08]. KEESMAN [Kee11] liefert ein Übersichtswerk zu Systemidentifikation, Methoden und Herangehensweisen. NELLES [Nel01] gibt eine Übersicht zur Identifikation nichtlinearer Systeme. Weitere Informationen zu den Frequenzmethoden sind in [PS12] und [SPR12] zu finden.

Wissensbasierte Modellbildung

Die wissensbasierte Modellbildung basiert auf Erfahrungen und Handlungsanalysen von Experten und wird deshalb in der Literatur auch als erfahrungsbasierte

oder expertenbasierte Modellbildung bezeichnet [Kro13]. Das Wissen von Experten wird über das Ursache-Wirkung-Prinzip im Rahmen eines Expertenmodells verfügbar gemacht. Zu den Methoden wissensbasierter Modellbildung gehören nach BEIERLE et al. und KROLL u. a. (vgl. [BKI14], [Kro13]):

- die logikbasierte Wissensrepräsentation und Inferenz,
- regelbasierte Systeme,
- maschinelles Lernen,
- Fuzzy-Logik,
- Boole'sche Logik und
- probabilistische Netzwerke (vgl. [Fis15]).

Diese Strategie der Modellbildung findet im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine Anwendung. Es sei an dieser Stelle auf die Übersichtswerke [BKI14] und [Kro13] verwiesen. Anwendungsbeispiele zu wissensbasierten Systemen finden sich u. a. in [Jun02] und [Fis15].

2.3.2 Mathematische Modelle

Das Ziel der Modellierung mechatronischer Systeme ist es, mithilfe der theoretischen Modellbildung und ihrer Methoden ein mathematisches Modell zu erstellen. Die Mathematik gilt nach GÜNTHER et al. als natürliche Modellsprache (vgl. [GV14]) und beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen physikalischen Eigenschaften eines Systems und den Parametern. Übersichtswerke zur mathematischen Modellierung sind beispielsweise [IK08] und [GV14].

Bei mechatronischen Systemen steht die kontrollierte Bewegung als zentrale Funktion im Vordergrund. Hierzu ist es erforderlich, sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten eines Systems in einem mathematischen Modell abzubilden. Im Folgenden werden fünf Klassen mathematischer Gleichungen zur Beschreibung von Systemen vorgestellt.

Algebraische Gleichungen:

Eine algebraische Gleichung n -ten Grades besitzt nach PAPULA die Form [Pap09]

$$a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x + a_0 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x^i = 0. \quad (2-1)$$

Solche Gleichungen werden u. a. zur Beschreibung des Hebelgesetzes, des Übersetzungsverhältnisses in einem Getriebe und zur Beschreibung von Verschaltungen, wie z. B. der Reihen- oder Parallelschaltung, verwendet.

Gewöhnliche Differentialgleichungen:

Eine gewöhnliche Differentialgleichung (ODE: ordinary differential equation) n -ter Ordnung lautet nach STREHMEL et al. [SWP12]:

$$f(t, x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t), \dots, x^{(n)}(t)) = 0, \text{ mit } n \in \mathbb{N}. \quad (2-2)$$

ODEs werden sehr häufig zur Beschreibung mechatronischer Systeme verwendet. Eine der wohl bekanntesten ODEs in der Mechanik ist die NEWTONsche Bewegungsgleichung eines Massenpunktes. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen einer um \ddot{x} beschleunigten Masse m und der am Massenpunkt angreifenden Kräfte F . Damit lautet die Gleichung (vgl. [Str15]):

$$m \cdot \ddot{x}(t) = \vec{F}(t). \quad (2-3)$$

Differential-algebraische Gleichungssysteme:

Differential-algebraische Gleichungen (DAE: differential algebraic equation) werden in zahlreichen Anwendungsgebieten eingesetzt, wie z. B. zur Beschreibung von elektrischen Netzwerken und mechanischen Mehrkörpersystemen (vgl. [Jan10], [SWP12]). Ein DAE-System besteht aus Differentialgleichungssystemen, die durch algebraische Nebenbedingungen beschränkt werden. Die folgende Gleichung zeigt exemplarisch ein DAE-System mit einer ODE 1. Ordnung und einer algebraischen Nebenbedingung [SWP12]:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), y(t)), \quad (2-4)$$

$$0 = g(t, x(t), y(t)). \quad (2-5)$$

DAE-Systeme werden häufig zur Modellierung des Verhaltens mechatronischer Systeme eingesetzt, und sie stellen ein weites Forschungs- und Anwendungsfeld dar. Für zusätzliche Informationen sei an dieser Stelle auf [CK06] und [BCR96] verwiesen.

Partielle Differentialgleichungen:

Die allgemeine Form einer partiellen Differentialgleichung (PDE: partial differential equation) der Ordnung k mit $x = (x_1 \dots x_n)$ und der Funktion $u(x)$ lautet nach BURG et al. [BT04]:

$$F(x, u(x), \frac{\partial u(x)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial u(x)}{\partial x_n}, \dots, \frac{\partial^k u(x)}{\partial x_n^k}) = 0. \quad (2-6)$$

Es existieren zahlreiche Beispiele für die Anwendung von PDEs. KARPFIGER gibt in [Kar15, S. 872] einen guten Überblick über verschiedene PDEs. Hierzu gehören u. a.:

- Laplace-Gleichung zur Beschreibung eines Potentials, etwa eines Gravitationspotentials oder einer elektrischen Feldstärke,
- Wärmeleitungsgleichung, die einen Wärmeleitungs- oder Diffusionsprozess beschreibt,
- Wellengleichung zur Beschreibung von Schwingungsvorgängen, wie z. B. der Ausbreitung von Schallwellen oder elektromagnetischer Wellen,
- Schrödinger-Gleichung zur Beschreibung der Bewegung von Elementarteilchen,
- Maxwell-Gleichungen: Lineare PDEs bilden den Zusammenhang von elektrischen und magnetischen Feldern mit elektrischen Ladungen und elektrischem Strom ab,
- Navier-Stokes-Gleichungen: Nichtlineare PDEs zur Beschreibung eines instationären Flusses eines inkompressiblen, viskosen Fluids (vgl. hierzu auch [Xu13]).

Eine weitere Übersicht zu PDEs findet sich u. a. in [BT04]). Die Lösung solcher PDEs gestaltet sich i. d. R. schwierig, weshalb in der Literatur zahlreiche Lösungsmethoden existieren. Hierzu gehören beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Finite-Differenzen-Methode (FDM) und die Rand-Elemente-Methode (REM)⁶. Einen guten Überblick über PDEs im Zusammenhang mit numerischen Methoden zu ihrer Lösung geben LARSSON et al. in [LHW05].

Differenzgleichungen:

Unter einer Differenzgleichung (DzGl) verstehen KRAUSE et al. in [KN99] eine Gleichung der Gestalt

$$f(t, x(t), x(t+1), \dots, x(t+n)) = 0, \text{ gültig für alle } t \in \mathbb{N}. \quad (2-7)$$

Anwendung finden DzGlen im Bereich der digitalen Signalverarbeitung im Rahmen der Z-Transformation. KRAUSE et al. geben in [KN99] eine Einführung in die Theorie und die Anwendung von Differenzgleichungen im Bereich diskreter dynamischer Systeme. In [Sch08] werden Methoden zur Analyse diskreter Signale und Systeme vorgestellt. Abschließend sei auf [Sch10] verwiesen. SCHÜSSLER befasst sich in diesem Werk mit dem Entwurf diskreter Systeme unter Verwendung von DzGlen.

⁶Unterschied FEM, FDM und REM: Das zu untersuchende (Teil-) System wird bei der FEM in endliche Elemente unterteilt, bei der FDM vernetzt, wobei Differenzenquotienten bzgl. der Gitterpunkte eingeführt werden, und bei der REM in Randknoten unterteilt [Geg06, S. 91].

2.3.3 Methoden der theoretischen Modellbildung

Die Methoden zur Modellierung mechatronischer Systeme sind i. d. R. abhängig von der jeweiligen Disziplin. Es existieren disziplinspezifische Systemelemente, die zur Beschreibung von Vorgängen und Systemeigenschaften eingesetzt werden. Allerdings bestehen auch Analogien zwischen den einzelnen disziplinspezifischen Elementen. Ein mechanisches Masse-Feder-Dämpfer-System kann beispielsweise das gleiche Verhalten, wie ein elektrotechnischer RLC-Schwingkreis, bestehend aus Widerstand, Kondensator und Spule, besitzen.

In Bild 2-6 sind verschiedene Modellierungsarten am Beispiel eines Einmassenschwingers dargestellt. Ausgehend von dem physikalischen Ersatzbild, lässt sich der Einmassenschwinger mithilfe einer gewöhnlichen Differentialgleichung 2. Ordnung beschreiben (ODE). Diese kann in die Zustandsraumdarstellung⁷ überführt oder in den Frequenzbereich⁸ transformiert werden, um so die Frequenzbereichsmethodik und Zustandsraummethoden der Regelungstechnik zu verwenden (siehe [Föl08]).

Neben der gleichungsbasierten Modellierung kann die Differentialgleichung auch als signalflussorientiertes Modell, bestehend aus Standardblöcken, dargestellt werden, die mithilfe von Pfeilen miteinander verbunden sind. Diese Modellierungsart beruht auf dem Ursache-Wirkung-Prinzip, und es werden gerichtete Verbindungen verwendet. Eine weitere Möglichkeit stellt die topologieorientierte Modellierung dar. Sie erfolgt mithilfe des physikalischen Ersatzbildes. Der Ersteller verkoppelt vorgegebene Systemelemente miteinander, und es werden ungerichtete Verbindungen zwischen den Systemelementen verwendet. Die Differentialgleichungen werden bei dieser Modellierungsart automatisch generiert, hier z. B. auf Basis der beschriebenen reduzierten Lösungselemente. Zuletzt sei auf die CAD-basierte Modellierung hingewiesen, die disziplinspezifisch (hier für die Mechanik) in spezialisierten Modellierungstools, wie z. B. *RecurDyn*, erfolgt. Häufig stehen umfangreiche Modellbibliotheken zur Verfügung. Es wird das physikalische Ersatzbild grafisch abgebildet, und die Bewegungsgleichungen werden automatisiert generiert.

Wie bereits gezeigt, ist es das Ziel der theoretischen Modellierung, das System mithilfe von mathematischen Modellen (vgl. Abschnitt 2.3.2) zu beschreiben.

⁷Das Zustandsraummodell besteht aus einem System von n Differentialgleichungen 1. Ordnung zur Beschreibung eines dynamischen Systems. Es eignet sich insbesondere zur Beschreibung von Mehrgrößensystemen linearer und nichtlinearer Systeme [Lun10a], [Lun10b].

⁸Lineare gewöhnliche Differentialgleichungen im Zeitbereich können mithilfe der Laplace-Transformation in algebraische Gleichungen im Bildbereich überführt werden, wodurch sich die Lösung bzw. die Analyse der linearen Differentialgleichungen häufig einfacher gestaltet (siehe [Föl08, S. 387 ff.]).

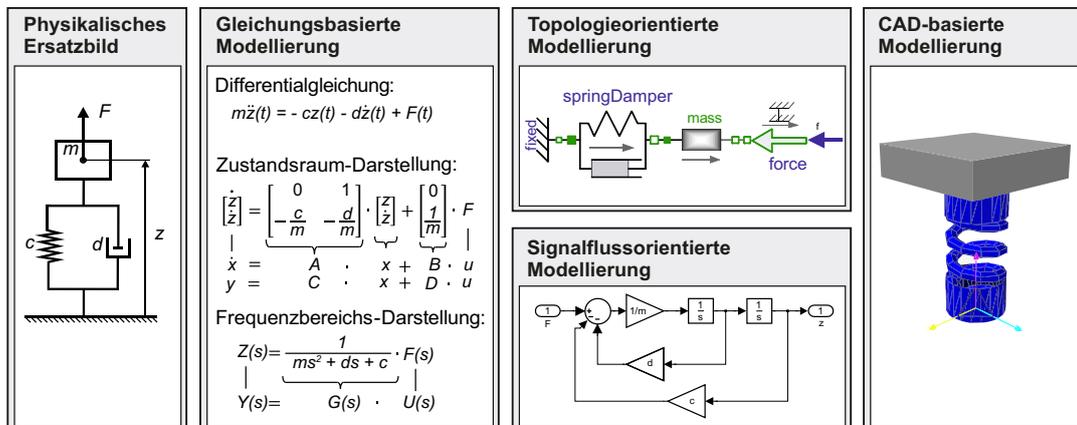


Bild 2-6: Modellierungsarten zur Erstellung von Dynamikmodellen (in Anlehnung an [GTS14, S. 43], vgl. [Oes18], [Kru19])

Zur Bestimmung dieser mathematischen Modelle existieren sowohl Methoden in den jeweiligen Disziplinen mechatronischer Systeme als auch disziplinunabhängige Methoden. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick gegeben. JANSCHKE unterteilt die Methoden in drei Klassen⁹ (vgl. [Jan10]):

- energiebasierte Modellbildung,
- mehrpolbasierte Modellbildung,
- mehrpol- und energiebasierte Modellierung.

Der LAGRANGESche Formalismus, die HAMILTONSchen Gleichungen sowie der Impuls- und Drehimpulssatz (NEWTON-EULER) bilden die Klasse der energiebasierten Modellbildung. KUYPERS und STRAUMANN geben in [Kuy97] und [Str15] eine detaillierte Beschreibung der Formalismen. Zur mehrpolbasierten Modellierung gehören u. a. die KIRCHHOFFSchen Netzwerke (siehe [BPW09]) und die Bondgraphen. Die KIRCHHOFFSchen Netzwerke sind definiert durch Flussgrößen, Differenzgrößen und die dazu gehörigen Erhaltungssätze der Fluss- (Knotensatz) und Differenzgrößen (Maschensatz) [Jan10]. Die Bondgraphen stellen einen speziellen netzwerkorientierten Modellierungsansatz dar, wobei ein Bond eine Verknüpfung von Fluss- und Differenzgrößen ist. Sie können zur Beschreibung von Multidomänenmodellen eingesetzt werden. Eine gute Übersicht zur Modellierung mechatronischer Systeme mit Bondgraphen ist in [Rod12], [DM03] und [Bor10] zu finden. Die letzte Klasse stellt mit dem Port-HAMILTONIAN-Formalismus eine Kombination aus der mehrpol- und der energiebasierten Modellierung dar. Die-

⁹JANSCHKE wählt diese Unterteilung mit dem Hinweis, dass eine ausführliche Diskussion dieser Ansätze den Rahmen seines Buches sprengen würden (vgl. [Jan10]).

ser Formalismus verknüpft die disziplinübergreifende Energiebetrachtung mit der Modularisierbarkeit von KIRCHHOFFSchen Netzwerken (vgl. [Jan10] und [SJ14]).

2.4 Modellbasierte Entwurfsmethodiken mechatronischer Systeme

Es existieren zahlreiche Methodiken und Leitfäden für den modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. In diesem Abschnitt werden einige dieser Methodiken vorgestellt. Nach GAUSEMEIER et al. stellt das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 die größte Übereinstimmung zwischen Industrie und Wissenschaft dar, weshalb viele Arbeiten im Bereich der Mechatronik auf dem V-Modell aufbauen [GTS14, S. 10]. Diese These wird mittels der durchgeführten Literaturrecherche zu diesem Thema gestärkt. Im Folgenden werden die erfolgversprechendsten Entwurfsmethodiken und Leitfäden vorgestellt. Anschließend erfolgen eine Bewertung und ein Fazit.

2.4.1 Mechatronische Komposition

Die mechatronische Komposition nach LÜCKEL et al. ist eine in den Leitfaden der Produktentwicklung nach PAHL et al. eingebettete Vorgehensweise für den Entwurf mechatronischer Systeme (vgl. [LKS00]). Der Leitfaden der Produktentwicklung in [PBF⁺05] gliedert sich grob von der Aufgabe bis zum Produkt in die folgenden Phasen:

- Produktplanung und Aufgabenklärung,
- Systementwurf,
- Teilefertigung und Montage,
- Labor- und Feldversuch.

LÜCKEL et al. und TOEPPER ergänzen den Systementwurf um die mechatronische Komposition mit dem Ziel, eine frühzeitige, ganzheitliche und funktionsorientierte Gesamtsystemauslegung im Rechner durchzuführen (vgl. [LKS00], [Toe02]). Hierzu werden die Prozessbausteine Modellbildung, Analyse und Synthese verwendet. Die Abbildung des Systems erfolgt im Rechner. Anschließend wird das Modell im Rechner untersucht. Die Synthese meint in diesem Fall das Zusammenführen der einzelnen Teilsysteme zu einem neuen Ganzen unter Berücksichtigung der Analyseergebnisse [Toe02, S. 68 ff.]. HARCHENKO gibt in [Har10, S. 10 ff.] eine detaillierte Beschreibung und einen Leitfaden zur Anwendung der drei Prozessbausteine. Darüber hinaus unterscheidet JUST bei der Modellbildung zwischen einer Vorgehensweise bei Neuentwicklungen und Produktoptimierungen [Jus14, S. 31]. ILLG

unterscheidet in [Ill14, S. 31] zwischen drei Phasen der mechatronischen Komposition unter Verwendung der oben genannten Bausteine Modellierung, Analyse und Synthese:

- **Komposition des Grundsystems:** In der ersten Phase erfolgen die Auslegung und der Entwurf des Grundsystems. Im Fokus stehen die dynamischen Vorgänge im Grundsystem.
- **Idealisierte Komposition:** Die zweite Phase umfasst den Entwurf erster Strategien zur Regelung der dynamischen Vorgänge im Grundsystem unter idealisierten Randbedingungen. Das Grundsystem wird zur Funktionserfüllung um eine Regelung erweitert. Sensorik und Aktorik werden in dieser Phase noch als idealisiert angenommen.
- **Ganzheitliche Komposition:** Im letzten Schritt werden unter anderem auch die Einflüsse von Sensorik und Aktorik berücksichtigt, indem detaillierte Modelle sowohl der Sensoren als auch der Aktoren verwendet werden.

Mithilfe der mechatronischen Komposition werden Schritt für Schritt die vier Systembausteine modellbasiert entworfen und ausgelegt. Es erfolgt eine ganzheitliche Optimierung des Gesamtsystemverhaltens unter Berücksichtigung der wesentlichen dynamischen Eigenschaften der Systembausteine und der Wechselwirkungen.

2.4.2 Das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206

Die Vorgehensweise der VDI 2206 [VDI04] zur Entwicklung mechatronischer Systeme beruht im Wesentlichen auf dem Prinzip „*divide et impera*“¹⁰, zu deutsch „*teile und herrsche*“, und bedeutet, dass man ein Problem so lange in kleinere und einfachere Teilprobleme zerlegt, bis man diese lösen (beherrschen) kann. Anschließend werden diese Teillösungen zu einer Lösung des Gesamtproblems zusammengeführt. Dieses Prinzip spiegelt auch das V-Modell wider. Häufig werden das Prinzip des Teilens in der Literatur auch als Top-down-Methode und das anschließende Zusammenführen der Teillösungen als Bottom-up-Methode bezeichnet. Im Systementwurf (siehe Bild 2-7) wird ein grobes Konzept zur Erfüllung der gestellten Anforderungen an das zu entwickelnde System unter Teilnahme aller beteiligten Domänen bzw. Fachdisziplinen entworfen. Anschließend wird das grobe Konzept in kleinere Teillösungen zerlegt und im domänenspezifischen Entwurf von der jeweiligen verantwortlichen Disziplin bearbeitet und gelöst. In der

¹⁰Der Ausdruck wird in dem 1532 erschienenen Werk „*Der Fürst (Il Principe)*“ von Niccolò Machiavelli (1469-1527) verwendet und beschreibt die Art, wie man herrschen soll. Dieser Ausdruck wurde auf das Lösen von Problemstellungen – speziell in der Informatik – übertragen und wird vor allem als Entwurfsmethode für Algorithmen verwendet (siehe u. a. [BB96, S. 219 ff.]).

darauffolgenden Systemintegration werden die Teillösungen schrittweise zu einer Gesamtlösung zusammengeführt. Begleitet wird das Vorgehen von Modellbildung und -analyse sowie einer ständigen Eigenschaftsabsicherung gegenüber den an das zu entwickelnde System gestellten Anforderungen. Am Ende entsteht, je nach Reifegrad des Systems, ein Erzeugnis, das vom Labormuster bis hin zum (Vor-)Serienprodukt reicht (vgl. Bild 2-7).

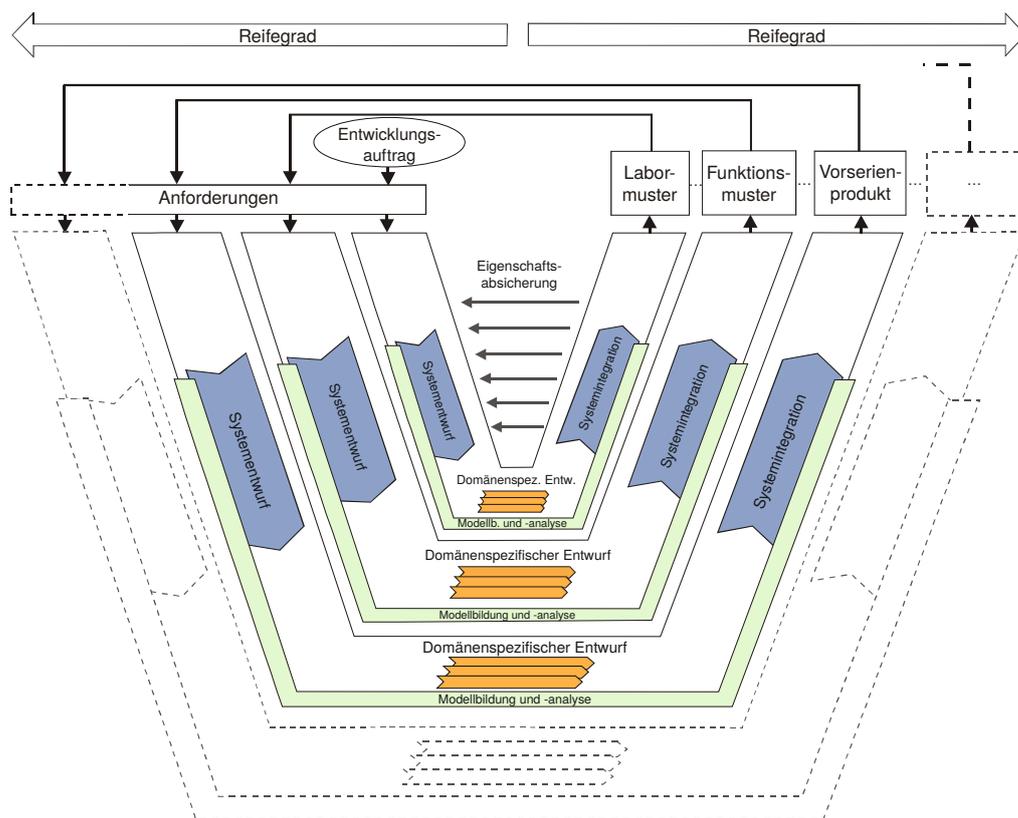


Bild 2-7: Durchlaufen mehrerer Makrozyklen (V in V-Modell) mit zunehmendem Reifegrad (in Anlehnung an [VDI04, S. 31])

Die in der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04] dargestellte Entwurfsmethodik für mechanische Systeme besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: dem Problemlösungszyklus auf Mikroebene (siehe [VDI04, S. 27-29]), dem V-Modell auf der Makroebene sowie vordefinierten und wiederkehrenden Prozessbausteinen. Im Folgenden werden die wichtigsten Prozessbausteine und Phasen des V-Modells erläutert [VDI04, S. 29 ff.]:

- **Anforderungen:** Den Ausgangspunkt der Entwicklung bildet der Entwicklungsauftrag. Zur Präzisierung der Aufgabenstellung werden Anforderungen

an das Produkt formuliert. Diese Anforderungen bilden den Maßstab zur Bewertung des späteren Produktes.

- **Systementwurf:** In dieser Phase wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept entworfen, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zu entwickelnden Produktes enthält.
- **Domänenspezifischer Entwurf:** Das im Systementwurf ausgearbeitete Lösungskonzept wird in dieser Phase getrennt in den jeweiligen Domänen konkretisiert, um insbesondere die Funktionserfüllung bei kritischen Funktionen sicherzustellen.
- **Systemintegration:** Zur Untersuchung des Zusammenwirkens der einzelnen Ergebnisse aus den Domänen werden sie zu einem Gesamtsystem integriert. Dabei kann die Integration schrittweise erfolgen, z. B. an Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfständen.
- **Eigenschaftsabsicherung:** Während des gesamten Entwurfsprozesses müssen die erarbeiteten Lösungen mit dem Lösungskonzept und den gestellten Anforderungen verglichen werden. Neben Validierung und Verifikation (vgl. Abschnitt 2.3) stehen dem Entwickler sogenannte X-in-the-Loop-Techniken zur Verfügung, wie z. B. HiL, Software-in-the-Loop (SiL) und Model-in-the-Loop (MiL) [Ise06] sowie Rapid-Control-Prototyping (RCP).
- **Modellbildung und -analyse:** Die Entwicklungsphasen werden zur Untersuchung der Systemeigenschaften von Modellbildung und -analyse begleitet.
- **Produkt:** Das Ergebnis eines Makrozyklus ist ein Produkt bzw. Abstufungen je nach Reifegrad, wie z. B. Labormuster, Prototyp etc.

2.4.3 Spezifikationstechnik CONSENS

CONSENS (**CON**ceptual design **Spec**ification technique for the **EN**gineering of complex **S**ystems) ist eine Spezifikationstechnik zur disziplinübergreifenden Beschreibung einer Prinziplösung mechatronischer Systeme. Sie bietet eine Vorgehensweise zur Erstellung eines Systemmodells in der Konzeptphase (vgl. linker Ast des V-Modells) und umfasst eine graphische Modellierungssprache (vgl. [GFD⁺08a], [GFD⁺08b], [GLL12]). Bild 2-8 zeigt sieben Modelle – sogenannte Partialmodelle – am Beispiel kooperierender Delta-Roboter, die im Rahmen des ENTIME-Projektes entstanden sind und einander einen Ball zuspiesen [GTS14].

Folgende Partialmodelle werden zur Beschreibung der Prinziplösung vorgeschlagen (vgl. [GTS14, S. 38 ff.]):

- **Umfeldmodell:** Das zu untersuchende bzw. zu entwickelnde System wird zu Beginn in seinem Umfeld als „Black Box“ abgebildet. Es werden alle

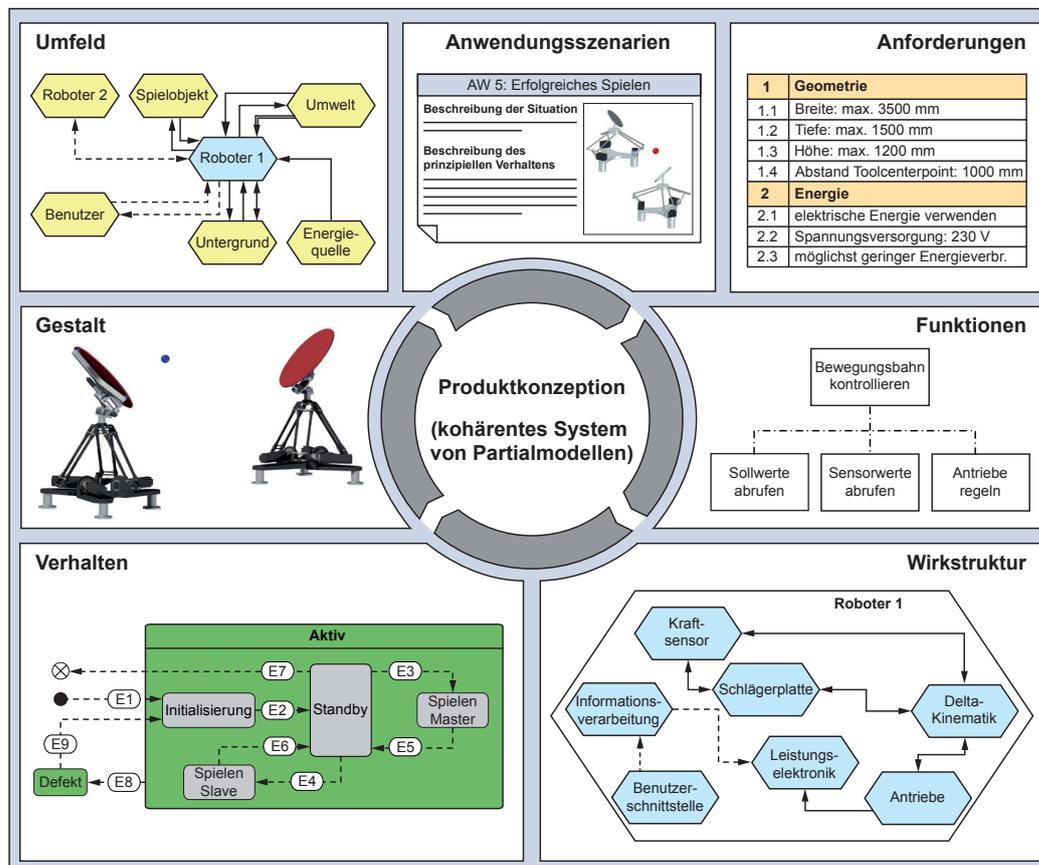


Bild 2-8: Partialmodelle der Spezifikationstechnik CONSENS nach [GTS14, S. 38]

Umfeldelemente, die in Wechselwirkung mit dem System stehen, modelliert. Hierzu werden die drei bekannten Flussarten Information, Energie und Stoff verwendet.

- **Anwendungsszenarien:** Sie setzen sich aus der Beschreibung der Situation und der Beschreibung des prinzipiellen Systemverhaltens zusammen, die in einem Steckbrief aufgelistet werden. Sie verweisen auf alle für das Szenario relevanten Elemente der Prinziplösung.
- **Anforderungen:** Das Partialmodell umfasst eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt, die während der Entwicklung umzusetzen sind. Sämtliche Anforderungen werden textuell beschrieben, und quantifizierbare Anforderungen werden durch Attribute und deren Ausprägungen konkretisiert.

- **Funktionen:** Die Gesamtfunktion des Systems wird solange hierarchisch in Teilfunktionen unterteilt, bis zu den Subfunktionen sinnvolle Lösungsmuster gefunden werden können. Die Formulierung der einzelnen Funktionen erfolgt lösungsneutral.
- **Wirkstruktur:** In der Wirkstruktur werden die Systemelemente, deren Merkmale sowie die Beziehungen der Systemelemente zueinander beschrieben. Ziel ist die Abbildung des grundsätzlichen Aufbaus und der prinzipiellen Wirkungsweise des Systems. Systemelemente repräsentieren Systeme, Module, Bauteile oder Softwarekomponenten. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen.
- **Verhalten:** Bei der Spezifikation von mechatronischen Systemen spielen die Modellierung von Aktivitäten, Zuständen und Zustandsübergängen sowie die Auswirkung auf die Wirkstruktur eine wesentliche Rolle. Diese Art der Modellierung erfolgt im Partialmodell Verhalten. DUMITRESCU unterscheidet zwischen drei Arten: Verhalten - Zustände, Verhalten - Aktivitäten und Verhalten - Sequenz (vgl. [Dum10]).
- **Grobgestalt:** Bereits während des Systementwurfs sind erste Festlegungen der Gestalt des Systems vorzunehmen. Sie sind ebenfalls Teil der Prinzipiellung. Der Aspekt umfasst Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte des Systems. Des Weiteren können Hüllflächen und Stützstrukturen beschrieben werden. Die rechnerunterstützte Modellierung erfolgt mit Hilfe gängiger 3D-CAD-Systeme.

Detailliertere Darstellungen der Spezifikationstechnik CONSENS als auch der verwendeten Partialmodelle sind in [GFD⁺08a], [GFD⁺08b], [GLL12] zu finden.

2.4.4 ENTIME-Entwurfssystematik

Ein Instrumentarium zur Entwicklung mechatronischer Systeme bietet die am Heinz Nixdorf Institut entwickelte Systematik „Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik“ (ENTIME) [GTS14]. Hierbei werden im Wesentlichen die beiden Entwurfsphasen Systementwurf und domänenspezifischer Entwurf der VDI-Richtlinie 2206 aufgegriffen und um ein Konstrukt zur Bereitstellung und Wiederverwendung von Lösungswissen erweitert. Die ENTIME-Entwurfssystematik besteht aus einem **Vorgehensmodell** mit zwei Entwurfsphasen – dem **fachgebietsübergreifenden Systementwurf** und dem **Regelungs- und Steuerungsentwurf**¹¹ – zur Spezifikation und modellbasierten Absicherung des Produktes

¹¹Der Regelungs- und Steuerungsentwurf ist hier ein exemplarischer Vertreter in der zweiten Entwurfsphase. Neben dieser Fachdisziplin existieren weitere Fachdisziplinen, wie z. B. Maschinenbau, Elektrotechnik oder Softwaretechnik.

sowie einem Wissensspeicher zur Bereitstellung von Lösungswissen in Form des **Semantic Web**¹² (vgl. [OJT⁺12]). Des weiteren wird die Systematik von einer **durchgängigen IT-Unterstützung** begleitet. Bild 2-9 zeigt eine abstrakte Darstellung der Systematik und der einzelnen Bestandteile.

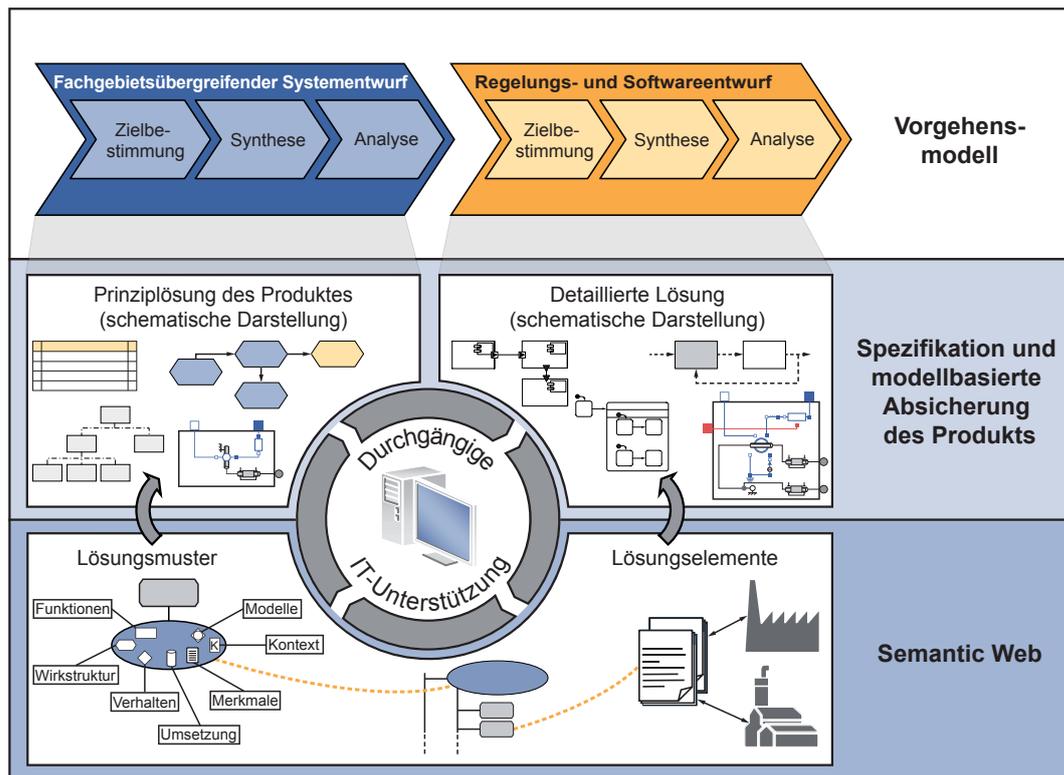


Bild 2-9: Instrumentarium der ENTIME-Entwurfssystematik [GTS14, S. 16]

GAUSEMEIER et al. teilen das Vorgehensmodell in die beiden genannten Phasen fachgebietsübergreifender Systementwurf und fachgebietspezifische Ausarbeitung, die wiederum aus den Schritten Zielbeschreibung, Synthese und Analyse bestehen. Das Vorgehensmodell soll dem Entwickler als Leitfaden für einen systematischen Entwurf mechatronischer Systeme dienen und dabei vorhandenes Lösungswissen einbinden. Im Fokus steht dabei die Formalisierung der in der Entwicklung vorhandenen Dokumente und Modelle für eine zielgerichtete Suche im Semantic Web.

¹²Das Semantic Web ist eine Erweiterung des World Wide Web hin zu einem Netz, in dem alles mit allem verbunden ist [BLF99, S. 1 ff.].

Im fachgebietsübergreifenden Systementwurf erfolgt die Spezifikation des Systemverhaltens in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Fachgebieten. Zur Zielbeschreibung des Lösungskonzeptes werden die aus CONSENS (siehe vorheriger Abschnitt) bekannten Partialmodelle herangezogen. Auf Basis der Partialmodelle erfolgt während der Synthese die Auswahl von Lösungsmustern aus dem Semantic Web. Zusätzlich zu den Partialmodellen wird bereits in der frühen Phase der Entwicklung ein idealisiertes Dynamikmodell des Systems erstellt. Dieses Modell dient zur Definition von Anforderungen an das zu entwickelnde System und stellt somit den Ausgangspunkt zur Auswahl von geeigneten Systemelementen dar. Das Ergebnis dieser Phase stellt die Prinziplösung dar, die durch die Partialmodelle und idealisierte Dynamikmodelle repräsentiert wird. Sie dient als Ausgangspunkt für die anschließende Konkretisierung und Ausarbeitung.

Es folgt die detaillierte Ausarbeitung des Systems. In dieser Phase wird konkretes Lösungswissen ausgewählt. Hierzu werden Lösungsmuster durch konkrete Lösungselemente ersetzt, indem beispielsweise Motoren eines bestimmten Herstellers ausgewählt werden. Bild 2-9 zeigt exemplarisch den Regelungs- und Steuerungsentwurf. Nachdem die Lösungselemente ausgewählt wurden, erfolgen eine Detaillierung des Systems und eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens. Das Ergebnis dieser Phase ist eine konkrete Lösung.

Ein wesentlicher Bestandteil der ENTIME-Entwurfssystematik ist das Semantic Web. Es dient der Bereitstellung und Wiederverwendung von Lösungswissen, das in Form von Lösungsmustern und Lösungselementen abgelegt wird (Abschnitt 2.1). Der Entwickler bekommt so die Möglichkeit, Lösungselemente verschiedener Anbieter in neue Lösungen zu integrieren. Eine detaillierte Darstellung findet sich in [Oes18].

2.4.5 Weitere Entwurfsmethodiken

In der Literatur existieren viele Entwurfsmethodiken für mechatronische Systeme. Im Folgenden wird eine kleine Auswahl an weiteren disziplinübergreifenden Vorgehensmodellen vorgestellt. Anschließend folgt eine Bewertung der recherchierten Entwicklungsmethoden mechatronischer Systeme.

Bereits 1994 entstand die Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik in der VDI-Richtlinie 2422. Sie baut auf der aus der Mechanik stammenden VDI-Richtlinie 2221 auf und berücksichtigt die Steuerung durch Mikroelektronik in einem Vorgehensmodell [VDI94, S. 15]. Anhand der Aufgabenstellung wird ein Gerätekonzept entworfen. Im nächsten Schritt erfolgen der Entwurf und die Ausarbeitung parallel in den Teilgebieten Softwareentwicklung, Schaltungsentwicklung und Entwicklung des elektromechanischen Geräteteils. Die

Ausarbeitungen werden zunächst getrennt voneinander und anschließend gemeinsam erprobt.

ISERMANN stellt in [Ise08, S. 35 ff.] ein erweitertes V-Modell vor, das auf dem V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 basiert. Er unterscheidet zwischen dem Systementwurf bis zu einem Labormuster, der Systemintegration bis zu einem Funktionsmuster und dem Systemtest bis zum Vorserienprodukt. Die einzelnen Phasen des V-Modells werden durch 13 detaillierte Entwurfsschritte beschrieben.

In [Ben05, S. 44 ff.] wird ein 3-Ebenen-Vorgehensmodell, das ebenfalls auf dem V-Modell beruht, vorgestellt. BENDER unterteilt zur Reduzierung und Beherrschung der steigenden Komplexität das V-Modell in drei Ebenen: System-, Subsystem- und Komponenten-Ebene. Dabei betrachtet er die Domänen Software, Hardware und Mechanik. Zunächst finden auf Systemebene eine Analyse der Anforderungen sowie der Entwurf des Systems statt. Anschließend wird das System in Subsysteme unterteilt, und es folgen eine erneute Anforderungsanalyse und der Entwurf der Subsysteme. Auf der Komponentenebene findet die Ausarbeitung in den jeweiligen Domänen statt. Die Systemintegration erfolgt sukzessive. Zunächst werden die Komponenten zu Subsystemen zusammengeführt und getestet. Sind die Integrationstests erfolgreich, so wird die Integration der Subsysteme zum System fortgeführt und schließlich auf Systemebene getestet.

Eine weitere Abwandlung des V-Modells als Antwort auf den steigenden Integrationsgrad bei mechatronischen Systemen (z. B. bei der Adaptronik¹³) stellt das W-Modell nach ANDERL et al. dar. Dieses Vorgehensmodell dient zur Entwicklung aktiver Systeme unter Anwendung der Prinzipien des Systems Engineering und ist ähnlich zum V-Modell nach BENDER in die drei Ebenen System, Partialsysteme und disziplinspezifische Komponenten unterteilt. Weiterhin besteht das W-Modell aus den fünf Phasen: Systemanalyse mit Anforderungsanalyse und einem Systementwurf, Analyse von Lösungen und Abhängigkeiten, virtuelle Integration, Modellanalyse und Detaillierung, physische Systemintegration (vgl. [NA10], [ANR12]). Beginn und Abschluss der Entwicklung im W-Modell sind mit dem V-Modell weitestgehend identisch. Der wesentliche Unterschied zeigt sich im domänenspezifischen Entwurf der einzelnen Komponenten. Es wird eine virtuelle Systemintegrationsphase eingeführt. Zur Absicherung der Systemeigenschaften werden die Modelle zusammengeführt, analysiert und detailliert, bevor die physische Systemintegration erfolgt.

Das MVPE-Vorgehensmodell (Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung) verwendet ebenfalls das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 als Ausgangsplattform

¹³Bei der *Adaptronik* handelt es sich um eine Weiterführung des Begriffs Mechatronik. Sie befasst sich mit selbstanpassungsfähigen und aktiv reagierenden Strukturen. Synonyme sind beispielsweise „*Smart Structures*“ oder „*Smart Materials*“ [Jan99].

[EGZ12], [ERZ14, S. 86 ff.]. EIGNER et al. gliedern das Vorgehensmodell in vier Hauptteile: interdisziplinäre Systementwicklung, disziplinspezifische Ausdetaillierung, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung sowie Systemlebenszyklus und PLM¹⁴-Backbone. Die wesentlichen Änderungen dieses Vorgehensmodells gegenüber dem klassischen V-Modell umfassen Artefakte zur Systembeschreibung, zusätzliche Integrations- und Absicherungsäste und schließlich die Integration in den Produktlebenszyklus. Das System wird entlang des linken Astes nach EIGNER et al. durch die Beschreibungsartefakte Anforderung (A), Funktion (F), Element der logischen Architektur (L) sowie physikalisches Element (P) beschrieben. Hierzu wird eine Modellierungsmethodik vorgestellt, die aus den Schritten Modellbildung und Spezifikation, Modellbildung und erste Simulation sowie disziplinspezifische Modellbildung und Simulation in den Disziplinen Mechanik, Software und E/E (Elektrik/Elektronik) besteht. Aus diesen Schritten entstehen ein Anforderungsmodell, ein Funktionsmodell, die logische Systemarchitektur und das dazu spezifizierte Verhaltensmodell des zu entwickelnden Systems.

Weitere Entwicklungsmethodiken sind auch in der Automobilindustrie zu finden, wie etwa [Sch16]. Hier wird das V-Modell entsprechend den Besonderheiten von Fahrwerkregelsystemen erweitert. Eine gute Übersicht sowie eine kurze Beschreibung weiterer Entwurfsmethodiken finden sich in [Gau08]. Darüber hinaus existieren viele disziplinspezifische Vorgehensmodelle, wie z. B. das Phasenmodell nach PAHL/BEITZ aus der Konstruktion [PBF⁺05], das Phasenmodell zur Entwicklung digitaler Schaltungen nach LIENING [Lie06] oder das V-Modell 97 zur Entwicklung von IT-Systemen [Ver00]. BENDER und EIGNER et al. führen die wichtigsten Methoden in ihren Werken auf (vgl. [Ben05], [ERZ14]).

2.4.6 Bewertung der recherchierten Entwurfsmethodiken

Zur Entwicklung der Methode und zur zielgerichteten Nutzung von Modellen im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme muss zunächst der Prozess selbst genauer betrachtet werden. Hier gilt es, den Prozess sehr detailliert darzustellen, damit die jeweiligen Schritte deutlich werden, in denen die Modellierungstiefe vom Entwickler gewählt werden muss. Dadurch kann die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe an den erforderlichen Stellen in den Entwurfsprozess integriert werden. Hieraus ergeben sich die folgenden Anforderungen an eine Entwurfsmethodik, anhand derer die recherchierten Methodiken bewertet werden sollen:

- **A1.1 Ganzheitlicher Entwurfsprozess:** Die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe soll für den gesamten modellbasierten Entwurfsprozess me-

¹⁴Product Lifecycle Management (PLM) ist ein Ansatz zur ganzheitlichen, unternehmensweiten Verwaltung aller Produkte über den gesamten Lebenszyklus – von der Idee bis hin zur Entsorgung [Sta15, S. 1].

chatronischer Systeme gültig sein. Deshalb müssen alle Schritte in der Entwurfsmethodik enthalten sein, bei denen der Einsatz von Modellen während des Entwurfs sinnvoll ist.

- **A1.2 Disziplinübergreifende Betrachtung der Systemdynamik:** Mechatronische Systeme zeichnen sich durch das Zusammenspiel vieler verschiedener Disziplinen zur Funktionserfüllung aus. Dieser Aspekt spiegelt sich auch bei der Dynamik solcher Systeme wider. Dabei können einzelne Systemelemente und/oder Teilsysteme verschiedener Disziplinen die Systemdynamik beeinflussen. Im Rahmen der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe werden Modelle betrachtet, welche die Systemdynamik bzw. einen Teil davon abbilden. Deshalb ist eine disziplinübergreifende Betrachtung der Systemdynamik von großer Bedeutung für diese Arbeit.
- **A1.3 Detaillierte Darstellung des Modellierungsprozesses:** Die Wahl der Modellierungstiefe ist ein wichtiger Bestandteil der Modellbildung. Um die Einsatzstellen der Methode zu identifizieren, müssen die einzelnen Modellierungsphasen im Entwurfsprozess bzw. die Vorgehensweise bei der Modellierung dementsprechend detailliert dargestellt werden. Im Fokus steht die Modellierung der Systemdynamik.
- **A1.4 Vorgabe von Detaillierungsstufen im Entwurfsprozess:** Die Entwurfsmethodik sollte nach Möglichkeit Detaillierungsstufen für Modelle zur Beschreibung der Systemdynamik vorsehen, also im Hinblick darauf, wie detailliert gewisse physikalische Effekte etwa in Abhängigkeit des Reifegrads abgebildet werden sollen.

Tabelle 2-2 zeigt einen Vergleich der recherchierten Ansätze mit den gestellten Anforderungen. Im Folgenden sollen die Anforderungen im Einzelnen kurz diskutiert werden.

A1.1 Ganzheitlicher Entwurfsprozess

Bei der Ganzheitlichkeit des Entwurfsprozesses driften die einzelnen Methodiken weit auseinander. Die Spezifikationstechnik CONSENS endet bei der Beschreibung des Systemkonzeptes. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Methode zur Spezifikation bzw. Beschreibung eines Systems. Das Vorgehensmodell der ENTIME-Entwurfssystematik endet mit der konkreten virtuellen Lösung. Die Systemintegration wird nicht näher betrachtet. In der VDI-Richtlinie 2422 ist die Entwicklung von Regelungskonzepten nicht vorgesehen. Den gesamten Entwurfsprozess – von den Anforderungen bis hin zu einem Produkt – berücksichtigen alle auf dem V-Modell basierenden Methodiken. Daher stellt das V-Modell einen guten Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme dar.

Tabelle 2-2: Methodiken und Vorgehensweisen für den modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme

<i>Entwurfsmethodiken</i>	<i>Anforderungen</i>			
	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4
Mechatronische Komposition	○	●	◐	◑
VDI-Richtlinie 2206	●	◐	◑	○
Spezifikationstechnik CONSENS	○	○	○	○
ENTIME-Entwurfssystematik	○	●	◐	◑
VDI-Richtlinie 2422	○	○	○	○
Detailliertes V-Modell nach ISERMANN	●	◐	○	○
3-Ebenen-V-Modell nach BENDER	●	○	○	○
W-Modell nach ANDERL et al.	●	◐	○	○
MPVPE-Vorgehensmodell nach EIGNER et al.	●	◐	○	◑

Legende

● vollständig erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

A1.2 Disziplinübergreifende Betrachtung der Systemdynamik

Grundsätzlich werden die drei (Haupt-)Disziplinen Mechanik, Elektronik und Informatik in allen recherchierten Methodiken berücksichtigt. Teilweise erhalten die drei Disziplinen andere Namen, sind aber trotzdem stets vertreten. Eine disziplinübergreifende Betrachtung der Systemdynamik erfolgt in der mechatronischen Komposition nach LÜCKEL bzw. in den drei von ILLG vorgestellten Phasen der mechatronischen Komposition. Im Vorgehensmodell der ENTIME-Entwurfssystematik wird die Systemdynamik sowohl im fachgebietsübergreifenden Systementwurf als auch für den Regelungs- und Steuerungsentwurf berücksichtigt. Die Erstellung von Modellen zur Beschreibung der Systemdynamik und deren Analyse werden in konkreten Schritten berücksichtigt. In den anderen Entwurfsmethodiken werden Modellbildung und -analyse erwähnt, jedoch nicht ausreichend genau beschrieben.

A1.3 Detaillierte Darstellung des Modellierungsprozesses

Grundsätzlich wird die Modellbildung in allen recherchierten Vorgehensmodellen der Entwurfsmethodiken berücksichtigt. Jedoch zeigen nur einige Methodiken eine detailliertere Beschreibung der Modellierung. Das Vorgehen bei der Modellierung der Systemdynamik wird im Rahmen der mechatronischen Komposition für jede der drei Phasen beschrieben. Bei der Komposition des Grundsystems werden zunächst die Systemgrenzen definiert und die dynamischen Vorgänge im System modelliert. Anschließend wird in der idealisierten Komposition das Modell um parametrierbare Reglermodelle und um idealisierte Modelle von Aktorik und Sensorik erweitert. In der ganzheitlichen Komposition erfolgt eine Modellerweiterung um detaillierte Modelle von Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung. In der VDI-Richtlinie 2206 wird ein Vorgehen beim modellbasierten Entwurf gezeigt. Zunächst erfolgt die Zielformulierung. Hier werden Untersuchungsziele und -aufgaben festgelegt und Anforderungen an die Modellbildung definiert. Anschließend beginnt mit dem Erstellen eines Ersatzmodells des Systems die Modellbildung. Das Vorgehensmodell der ENTIME-Entwurfssystematik zeigt sehr detaillierte Modellierungsschritte in den beiden Entwurfsphasen, die sich stark an der VDI 2206 und der mechatronischen Komposition orientieren. Das W-Modell nach ANDERL et al. enthält eine eigene Phase „Modellierung im Domänensystem“. Allerdings existiert keine detaillierte Beschreibung, wie bei der Modellierung vorgegangen werden soll. Bei allen genannten Modellierungsprozessen der jeweiligen Entwurfsmethodiken fehlen die Stellen, an denen die Modellierungstiefe des Modells festgelegt wird.

A1.4 Vorgabe von Detaillierungsstufen im Entwurfsprozess

In den recherchierten Entwurfsmethodiken werden grobe Detaillierungsstufen für Modelle vorgestellt. Es handelt sich dabei lediglich um Ansätze. Die mechatronische Komposition unterscheidet zwischen Komposition des Grundsystems, idealisierter und ganzheitlicher Komposition. Bei der ENTIME-Entwurfssystematik wird zwischen idealisierten und detaillierten Modellen der Systemdynamik unterschieden, und diese werden der jeweiligen Entwurfsphase zugeordnet. EIGNER et al. ergänzen das MPVPE-Vorgehensmodell um vier Modelltypen zur Beschreibung eines zu entwickelnden Systems. Diese Typen werden als AFLP (Anforderung, Funktion, Logik und Physik) bezeichnet. Auf diesen Ansatz wird später genauer eingegangen (siehe S. 49). Jedoch werden mit ihm keine Modelle der Systemdynamik mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden bezeichnet.

2.5 Ansätze zur Klassifikation und Wahl der Modellierungstiefe

Die Wahl der Modellierungstiefe spielt in der Modellbildung bzw. beim modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme eine entscheidende Rolle. Zur Wahl der Modellierungstiefe findet man nur wenige Ansätze in der Literatur. In den meisten Fällen handelt es sich um Einteilungsmöglichkeiten von Modellen, die während der Entwicklung eines Produktes entstehen. Allerdings bieten sie Ansätze und Erkenntnisse, die für eine Methode zur Wahl der Modellierungstiefe genutzt werden könnten. Die recherchierten Ansätze lassen sich im Wesentlichen drei Bereichen zuordnen:

- **Modellbildung:** Klassifikation der Modellierungstiefe mit engem Bezug zur modellbasierten Entwicklung mechatronischer Systeme.
- **Produktentwicklung:** Beschreibungsmöglichkeiten technischer Systeme, die speziell aus dem Top-Down-Entwurf in der Produktionsentwicklung oder dem Systems Engineering entstanden sind.
- **Praxis:** Praxisnahe Klassifikation der Modellierungstiefe, die bei der Entwicklung konkreter Systeme eingesetzt werden, wie z. B. in der Antriebstechnik.

Im Folgenden werden Ansätze zur Klassifikation und damit auch zur Wahl der Modellierungstiefe aus den drei genannten Bereichen vorgestellt. Am Ende des Abschnitts erfolgt eine Bewertung der einzelnen Ansätze.

2.5.1 Einteilungsmöglichkeiten aus der Modellbildung

Den ersten Bereich der Einteilungsmöglichkeiten unterschiedlicher Detaillierungsgrade bilden Ansätze aus dem Forschungsfeld der modellbasierten Entwicklung mechatronischer Systeme. Hierzu gehören die Ebenen der Modellierungstiefe nach KUFNER [Kuf12], die vier Beschreibungsebenen des objektorientierten Mechatronikmodells nach HAHN [Hah99], die Modellabstraktionsebenen im Modellierungsprozess aus der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04] und die Abstraktionsebenen nach LÜDECKE [Lüd03].

Ebenen der Modellierungstiefe zur automatisierten Modellgenerierung von Maschinenmodellen nach KUFNER

KUFNER schlägt in [Kuf12, S. 72 ff.] fünf Ebenen der Modellierungstiefe zur automatisierten Erstellung von Maschinenmodellen für den Einsatz in HiL-Simulationen von Montagemaschinen vor. Dieser Ansatz ist sehr stark von der Automatisierungstechnik geprägt. Die Modellierungstiefen 1 bis 5 sollen unter anderem zur

virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) von Montagemaschinen eingesetzt werden und sind folgendermaßen beschrieben:

- **Logisches Abbild:** Das System wird mithilfe einer logischen Wirkkette beschrieben, die aus dem logischen Zusammenhang zwischen Aktoren und Sensoren besteht.
- **Logisches Abbild mit Zeitverhalten:** Die logische Wirkkette wird um Übergangszeiten erweitert, indem beispielsweise Aktionszeiten zwischen einem Aktor und einem Sensor integriert werden.
- **Physikalisches Prinzipabbild:** In dieser Ebene erfolgt die Modellierung der grundlegenden physikalischen Wirkprinzipien.
- **Physikalisches Konstruktionsabbild:** Die Modellierungstiefe 4 ermöglicht die Modellierung detaillierter physikalischer Effekte durch die Berücksichtigung disziplinspezifischer Konstruktionsinformationen. Es werden dynamische Eigenschaften von Bauteilen und Baueinheiten bei der Betrachtung von Bewegungen berücksichtigt.
- **Physikalisches Zustandsabbild:** Bei der höchsten Modellierungstiefe werden an der Maschine bestehende Fehler in das physikalische Konstruktionsabbild integriert. Hierzu müssen Störgrößen erfasst werden, die durch Fertigungs-, Montagefehler oder durch Verschleiß und Verformung entstehen.

In [KHK10, S. 124] liefern KUFNER et al. Anwendungsszenarien für die jeweiligen Modellierungstiefen. Es handelt sich dabei um den Test der Steuerung von Montagemaschinen und die Optimierung der Taktzeit verschiedener Prozesse. Zum Test der Steuerung wird dem Entwickler die Modellierungstiefe 2 (logisches Abbild mit Zeitverhalten) nahegelegt. Die Ebenen 2 bis 4 eignen sich zur Optimierung von Taktzeiten, für die Ablaufoptimierung, für eine grundlegende Optimierung und eine umfassende Optimierung. Die drei Ebenen unterscheiden sich nur in der Genauigkeit, mit der die Abläufe modelliert werden. Die Ebene 1 eignet sich lediglich für einen Programmtest der Steuerung, und die Ebene 5 liefert nur in Sonderfällen einen relevanten Zugewinn.

Vier Ebenen der Mechatronikmodellbildung nach HAHN

Ein mechatronisches System lässt sich nach HAHN in vier verschiedenen Abstraktionsebenen modellieren, die als Beschreibungsebenen bezeichnet werden [Hah99, S. 37 ff.]. Es wird zwischen zwei disziplinspezifischen Ebenen, **Geometrie** und **Topologie**, und zwei disziplinübergreifenden Ebenen, **Verhalten** und **Verarbeitung**, unterschieden. Die Geometrieebene stellt vom Informationsgehalt her die detaillierteste Beschreibungsebene dar. Berechnungen auf dieser Ebene sind

FEM-Analysen oder Analysen des NVH¹⁵-Verhaltens. Die Topologieebene basiert auf disziplinspezifischen Beschreibungselementen und Kopplungen, aus denen sich nach HAHN automatisiert Verhaltensmodelle ableiten lassen. Mithilfe der Verhaltensmodelle lässt sich eine vereinheitlichte Modellierung der verschiedenen Disziplinen durchführen. Die Modellierung der Verhaltensmodelle erfolgt anhand von regelungstechnischen Signalflussmodellen. Die unterste Ebene bildet die Verarbeitungsebene. Modelle dieser Ebene werden i. d. R. nicht vom Anwender selbst direkt manipuliert, sondern aus der Beschreibungsform der Verhaltensebene automatisiert generiert. Hierzu gehören z. B. Zeit- und Frequenzdaten.

Modellabstraktionsebenen im Modellierungsprozess nach der VDI-Richtlinie 2206

In der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04, S. 51 ff.] werden vier verschiedene Modellerebenen zur Beschreibung mechatronischer Systeme vorgestellt. Einige der Modellabstraktionsebenen im Modellierungsprozess weisen Parallelen zu den Beschreibungsebenen nach HAHN auf. Die erste Ebene wird als **topologisches Modell** bezeichnet und beschreibt die drei Basisfunktionen kinematische Funktion (Gelenkzahl, Längen etc.), dynamische Funktion (z. B. Bewegung von Massen) und mechatronische Funktion (Regelungen, Steuerungen etc.). Auf Basis der Topologie wird ein **physikalisches Modell** erstellt, das die Systemeigenschaften in disziplinspezifischer Form beschreibt. Das **mathematische Modell** bildet die Grundlage zur Verhaltensbeschreibung des Systems und ist äquivalent zum Verhaltensmodell nach HAHN. Es werden die zuvor beschriebenen physikalischen Eigenschaften in mathematische Ausdrücke überführt. Anschließend erfolgt eine Aufbereitung des mathematischen Modells mithilfe von Algorithmen zur Simulation, wodurch das **numerische Modell** entsteht.

Abstraktionsebenen bei der Modellierung heterogener Systeme nach LÜDECKE

In [Lüd03, S. 18-21] werden Abstraktionsebenen bei der Modellierung heterogener Systeme vorgestellt. Im Fokus steht der Entwurf von Mikrosystemen¹⁶. Ein wichtiger Bestandteil ist z. B. der digitale Schaltungsentwurf. Die vier Abstraktionsebenen sind wie folgt definiert:

- **Funktionale Ebene:** Modelle basieren ausschließlich auf wertdiskreten Zustandsgrößen. Zustandsänderungen sind in dieser Ebene unabhängig von der Zeit.

¹⁵NVH: Analyse von Geräuschen, Vibrationen und Rauheiten (Noise, Vibration, Harshness) [HEG07, S. 475].

¹⁶Mikrosysteme vereinen laut LÜDECKE z. B. Sensoren, Signalverarbeitungskomponenten und Aktoren [Lüd03, S. 1].

- **Ereignisbasierte Ebene:** Modelle dieser Ebene werden aus Prozessen und Signalen gebildet, welche die Ein- und Ausgangsgrößen der Prozesse verbinden. Die Prozesse werden durch Ereignisse aktiviert, die mit einer gewünschten Verzögerung Ausgangsgrößen erzeugen.
- **Phänomenologische Ebene:** Netzwerke mit räumlich konzentrierten Elementen werden beschrieben durch gewöhnliche Differentialgleichungen und algebraische Gleichungen. Die Zustände ändern sich nur noch mit der Zeit.
- **Physikalische Ebene:** Die Modelle werden durch partielle Differentialgleichungen dargestellt. Die Systemvariablen, Fluss- und Potenzialgrößen beschreiben Felder mit räumlicher Ausdehnung. Die einzelnen Zustände sind sowohl vom Raum als auch von der Zeit abhängig. Bekannte Modellierungsverfahren sind FEM, Finite-Differenzen-Methode (FDM) und Rand-Elemente-Methode (REM).

2.5.2 Einteilungsmöglichkeiten aus dem Top-Down-Entwurf

In diesem Abschnitt werden einige Ansätze zur Einteilung von Modellen beschrieben, die während der Entwicklung eines Produktes entstehen. Sie haben keinen direkten Bezug zur Modellierungstiefe, jedoch könnten einige Aspekte in die Entwicklung der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe einfließen. Diese Ansätze werden im Folgenden vorgestellt und sind dem Bereich Top-Down-Entwurf zugeordnet, weil die Ebenen schrittweise vom Abstrakten hin zum Konkreten und Speziellen angeordnet sind.

AFLP/RFLP-Ansatz

Ein Ansatz zur Einteilung des Top-Down-Entwurfs ist der AFLP- bzw. RFLP-Ansatz. AFLP steht für **Anforderung, Funktion, logisches Lösungselement und physikalisches Element** (RFLP: Requirements, Functional and Logical Architecture, and Physical Levels). Dieser Ansatz stammt aus dem Anforderungsmanagement. In [ERZ14, S. 88] werden die vier Ebenen im Rahmen des MVPE-Vorgehensmodells zur Beschreibung eines Systems vorgestellt. Schritt für Schritt werden so das Anforderungs-, das Funktionsmodell, die logische Systemarchitektur und physikalische Verhaltensmodelle zur Entwicklung eines Systems erstellt. Nach EIGNER et al. werden die Anforderungsmodelle ausschließlich zur Modellbildung und zur Spezifikation verwendet. Funktionsmodelle können sowohl zur Spezifikation als auch für erste Simulationen eingesetzt werden. Physikalische Verhaltensmodelle werden den ersten Simulationen und der disziplinspezifischen Modellbildung und Simulation zugeordnet. Die logischen Systemarchitekturen können nach EIGNER et al. in allen drei Szenarien verwendet werden: Spezifikation, erste Simulation und disziplinspezifische Simulation.

Vier Schritte des Systems Engineering nach KOSSIAKOFF et al.

In [KSS⁺11, S. 93] beschreiben KOSSIAKOFF et al. Entwicklungsschritte des Systems Engineering. Aus diesen Schritten entstehen Ergebnisse in Form von Modellen mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad, die evtl. für die Entwicklung der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe herangezogen werden können.

1. **Requirements Analysis:** Problemanalyse und Definition von Anforderungen.
2. **Functional Definition:** Übersetzung der Anforderungen in Funktionen, die das System erfüllen muss.
3. **Physical Definition:** Festlegen von Systemelementen zur Erfüllung der Funktion und Auswahl des favorisierten Lösungsentwurfs.
4. **Design Validation:** Modellierung des Systems und Analyse mithilfe von Simulationen.

Hierarchische Modellierung technischer Systeme nach EHRENSPIEL

EHRENSPIEL präsentiert in [Ehr07, S. 38] eine Pyramide, die vier verschiedene Bereiche enthält, in denen sich technische Systeme modellieren lassen. Die vier Modellierungsbereiche werden im Folgenden vorgestellt:

- **Funktionelle** Lösungsmöglichkeiten: lösungsneutrale, verbale Formulierung der zu erfüllenden Funktionen des Systems.
- **Prinzipielle physikalische** Lösungsmöglichkeiten: mathematische Formulierung physikalischer Gesetze zur Erfüllung der Funktionen.
- **Gestalterische und stoffliche** Lösungsmöglichkeiten: Übergang von verbal/mathematisch formulierten Funktionen mithilfe sogenannter „Primitivgeometrie“ zur geometrisch-stofflich verkörperten Gestalt.
- **Fertigungs- und montagetechnische** Lösungsmöglichkeiten: gestalterische Darstellung der Lösung aus Sicht der Produktion.

Die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten steigt von der Spitze der Pyramide (Anforderung) bis hin zum untersten Modellierungsbereich an, damit auch der Informationsgehalt der jeweiligen Modelle.

Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell nach PONN et al.

Aufbauend auf der hierarchischen Modellierung nach EHRENSPIEL, ist das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) nach PONN et al. entstanden. Das

MKM besteht aus einem **Anforderungsraum** und einem aufgespannten **Lösungsraum** zur Erfüllung der Anforderungen [PL11, S. 26-34]. Der Anforderungsraum wird durch ein Anforderungsmodell repräsentiert und im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses in Schritten erweitert, detailliert und angepasst. Der Lösungsraum wird aus der **Funktions-**, der **Wirk-** und der **Bauebene** gebildet. Für die Funktionsebene werden verschiedene Modellierungsmöglichkeiten vorgestellt, die im Wesentlichen die funktionelle Struktur des Produktes darstellen. Anschließend werden nach Auswahl der Wirkprinzipien Wirkkonzepte erstellt. Es folgt die detaillierteste Ebene, in der die Produktgestalt festgelegt wird. Eine ähnliche Einteilung wird ebenfalls in der VDI-Richtlinie 2221 präsentiert [VDI03, S. 5 ff.].

2.5.3 Praxisnahe Einteilungsmöglichkeiten

Abschließend werden zwei Ansätze zur Einteilung der Modellierungstiefe aus praxisnahen Gebieten vorgestellt. Es handelt sich dabei um konkrete Ebenen von Berechnungsmodellen, die sich für eine Simulation eignen. Hierzu gehören die Modellierungsniveaus hochdynamischer Fertigungssysteme nach ZIRN et al. und die Modellstufen für Antriebssysteme nach DRESIG.

Modellierungsniveaus hochdynamischer Fertigungssysteme nach ZIRN et al.

Für Modellierung und Simulation von Werkzeugmaschinen und Robotern in verschiedenen Entwurfsstadien schlagen ZIRN et al. in [ZW06, S. 33 ff.] drei Modellierungstiefen vor.

- **Vereinfachte achsbezogene Betrachtung:** Auf dem ersten Niveau können einfache Auslegungsvorschriften aus sogenannten Handformeln hergeleitet werden, die zum überschlägigen Anlagenentwurf verwendet werden. Teilsysteme werden mithilfe einfacher Übertragungsglieder der Regelungstechnik beschrieben, und erste Regler- und Systemparameter können abgeschätzt werden.
- **Detailliertere Betrachtung durch Starrkörpermodelle:** Auf diesem Niveau wird die mechanische Struktur der Maschine durch Starrkörper in Verbindung mit Gelenken und Feder-Dämpfer-Elementen abgebildet. Dieses Verfahren muss bei der Betrachtung von Werkzeugmaschinen ggf. um Gelenk- und Strukturelastizitäten erweitert werden. Untersuchungsziele sind beispielsweise Stabilitätsbetrachtungen, Bahnfehler- und Produktivitätsabschätzungen, Ermittlung von Einstellwerten in Steuerungen und Antriebsreglern sowie Struktureigenschaftsanalysen mittels Modalanalyse.

- **Gekoppelte Simulation von FE-Strukturmodellen und Achsregelkreisen:** Das höchste Niveau der Modellierung erlaubt direkte Rückschlüsse aus dem simulierten Gesamtsystemverhalten auf detaillierte konstruktive Optimierungspotenziale. Nach ZIRN et al. ist

„[...] der Königsweg – der jedoch mit einem erheblichen Rechenzeitaufwand erkaufte werden muss – [...] die gekoppelte Simulation von FE-Strukturmodell und Achsregelung“ [ZW06, S. 34].

ZIRN et al. sprechen von einem vierten Niveau, wenn der Einfluss von Bearbeitungsprozessen in eine gekoppelte Simulation integriert werden könnte. Eine solche Simulation erfordere jedoch einen hohen Modellierungsaufwand und sei, zum Zeitpunkt der Veröffentlichung, über die Grenzen der Universitäten hinaus noch nicht umsetzbar.

Modellstufen zur Schwingungsanalyse von Antriebssystemen nach DRESIG

In der Modellierung von Antriebssystemen gibt es nach DRESIG zur Schwingungsanalyse drei Hauptstufen von Berechnungsmodellen, zu denen weitere Abstufungen existieren. **Starrkörpersysteme** bilden die erste, **zwangserregte Schwingungssysteme** die zweite und **selbsterregte Systeme** die dritte Hauptstufe. Tabelle 2-3 zeigt die einzelnen Modellstufen vom Einfachen zum Komplizierten mit der jeweiligen Form der Modellgleichung.

Die Wahl der jeweiligen Modellstufe ist abhängig vom Ziel der Schwingungsanalyse und den konkreten Belastungs- und Bewegungsverhältnissen. DRESIG unterscheidet bei den Parametern zwischen gegebenen und berechenbaren Größen. Typische gegebene Parameter der ersten Modellierungsstufe sind geometrische Abmessungen, Masseparameter, kinematische Bewegungsabläufe und/oder Antriebskraftgrößen. Mithilfe eines Modells der ersten Stufe und der gegebenen Parameter können Größen wie das reduzierte Massenträgheitsmoment, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Starrkörper, Gelenk- und Lagerkräfte sowie Antriebsmomente berechnet werden. Aus Modellen der zweiten Stufe mit gegebenen Größen wie z. B. Längs- und Drehfederkonstanten, Längs- und Biegesteifigkeiten und Längs- und Drehdämpferkonstanten lassen sich u. a. Eigenfrequenzen und Eigenformen bestimmen. In der letzten Stufe gehören beispielsweise geschwindigkeitsabhängige Lagerdaten (Ölfilmeinfluss) oder Reibwerte zu den gegebenen Größen. Mithilfe der Modelle dieser Stufe lassen sich Grenzyklen, nichtlineare Schwingungen etc. berechnen. Weitere Anwendungsfälle sind in [Dre06, S. 20] aufgeführt.

Tabelle 2-3: Drei Stufen von Berechnungsmodellen nach DRESIG [Dre06, S. 17]

Modellstufe	Typ des Systems	Form der Modellgleichungen
1	Starrkörpersystem („starre Maschine“)	
1a	Gegebene Antriebsbewegungen	$q = q_0(t)$
1b	Gegebene Antriebskraftgrößen	$M\ddot{q} + F(\dot{q}) = f(t)$
2	Zwangserregte Schwingungssysteme	
2a	Lineares Schwingungssystem mit konstanten Koeffizienten	$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = f(t)$
2b	Lineares Schwingungssystem mit zeitvariablen Koeffizienten	$M(t)\ddot{q} + D(t)\dot{q} + K(t)q = f(t)$
2c	Nichtlineares Schwingungssystem mit zeitvariablen Koeffizienten	$M(t, q)\ddot{q} + D(t, q, \dot{q})\dot{q} + K(t)q = f(t)$
3	Selbsterregte Systeme	$f(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0$

2.5.4 Bewertung der recherchierten Ansätze

Ein zentraler Bestandteil moderner Entwicklungsmethodiken für mechatronische Systeme ist ein durchgängiger modellbasierter Entwurf. Die Schwierigkeit besteht in der teilweise sehr aufwändigen Modellerstellung. Aufbau und Art der Modellierung sind nicht formal beschrieben und daher sehr stark vom Ersteller des Modells abhängig. Eine große Herausforderung stellt hier die Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe dar, damit ein Modell die geforderten Modellierungsziele effizient erfüllt. Für die Umsetzung einer solchen Methode zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe sind folgende Anforderungen zu erfüllen. Anhand dieser Anforderungen sollen die recherchierten Ansätze bewertet werden.

- **A2.1 Disziplinübergreifende Gültigkeit:** Die Methode soll übergreifend für alle Disziplinen gelten, die einen Einfluss auf die Dynamik des

Systems haben. Hierzu müssen die Modelltypen zur Beschreibung der Systemdynamik untersucht werden. Das setzt eine Einteilungsmöglichkeit von Modelltypen voraus.

- **A2.2 Klassifikation der Modellierungstiefe:** Die Feststellung etwa „einer hohen“ oder „geringen“ Modellierungstiefe hilft dem Entwickler i. d. R. nicht weiter. Es sind daher aussagekräftige Ebenen zur Klassifikation der Modellierungstiefe erforderlich. Hierzu werden Merkmale gefordert, nach denen Modelle einer bestimmten Ebene der Modellierungstiefe zugeordnet werden können.
- **A2.3 Auswahlkriterien für Anwendungsszenarien:** Anhand der Klassifikation der Modellierungstiefe werden Kriterien gefordert, nach denen dem Entwickler eine bestimmte Ebene der Modellierungstiefe vorgeschlagen wird. Ziel ist es, ein Modell zu erstellen, das die definierten Modellierungsziele effizient erfüllt. Es soll weder eine zu hohe noch eine zu geringe Modellierungstiefe aufweisen. Darüber hinaus müssen solche Kriterien überprüfbar sein.
- **A2.4 Systematische Vorgehensweise:** Dem Entwickler muss zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe in den einzelnen Modellierungsphasen des Entwurfsprozesses eine Vorgehensweise an die Hand gegeben werden, die durch den Auswahlprozess der Modellierungstiefe führt. Dies kann beispielsweise in Form eines Vorgehensmodells umgesetzt werden.

Tabelle 2-4 zeigt einen Vergleich der recherchierten Ansätze mit den gestellten Anforderungen. Im Folgenden sollen die drei Gruppen von Ansätzen den einzelnen Anforderungen an die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe gegenübergestellt werden.

A2.1 Disziplinübergreifende Gültigkeit

Eine disziplinübergreifende Gültigkeit im Sinne der Systemdynamik wird im Wesentlichen von den Einteilungsmöglichkeiten aus der Modellbildung erreicht. In [Hah99] und [VDI04] wird die Entwicklung mechatronischer Systeme betrachtet, die eine disziplinübergreifende Darstellung der Systemdynamik voraussetzt. KUFNER bezieht alle Bereiche einer Montagemaschine in ihre Betrachtung mit ein, so dass hier ebenfalls von einer disziplinübergreifenden Gültigkeit gesprochen werden kann, wenn auch nur in einem bestimmten Bereich technischer Systeme. Die Ansätze des Top-Down-Entwurfs betrachten ein System aus der Sicht aller Disziplinen; allerdings steht bei diesen Ansätzen die Modellierung eines Systemmodells zur vollständigen Repräsentation des Systems im Fokus, das zwar Modelle der Systemdynamik enthält, jedoch werden diese nur verallgemeinert beschrieben.

Tabelle 2-4: Ansätze zur Klassifikation und Wahl der Modellierungstiefe

	<i>Anforderungen</i>			
<i>Einteilungsmöglichkeiten aus der Modellbildung</i>	A2.1	A2.2	A2.3	A2.4
Ebenen der Modellierungstiefe nach KUFNER	●	◐	◑	○
Vier Ebenen der Mechatronikmodellbildung nach HAHN	●	◐	○	○
Modellabstraktionsebenen im Modellierungsprozess nach der VDI-Richtlinie 2206	●	○	○	○
Abstraktionsebenen bei der Modellierung heterogener Systeme nach LÜDECKE	●	●	○	○
<i>Einteilungsmöglichkeiten aus dem Top-Down-Entwurf</i>				
AFLP-/RFLP-Ansatz	◐	○	◑	○
Vier Schritte des Systems Engineering nach KOSSIAKOFF et al.	◐	○	○	○
Hierarchische Modellierung technischer Systeme nach EHRENSPIEL	○	○	◑	○
Das Münchener Produktkonkretisierungsmodell nach PONN et al.	○	○	◑	○
<i>Praxisnahe Einteilungsmöglichkeiten der Modellierungstiefe</i>				
Modellierungsniveaus hochdynamischer Fertigungssysteme nach ZIRN et al.	○	◐	●	○
Modellstufen für Antriebssysteme nach DRESIG	○	◐	●	○

Legende

● vollständig erfüllt ◐ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

ZIRN et al. und DRESIG verwenden in ihren Ansätzen speziell für ihren Anwendungsfall entwickelte Klassen der Modellierungstiefe. Für eine allgemeingültige Verwendung müssten diese Klassen überarbeitet und vervollständigt werden.

A2.2 Klassifikation der Modellierungstiefe

Eine Klassifikation der Modellierungstiefe bzgl. der Systemdynamik erfolgt lediglich in vier der recherchierten Ansätze. KUFNER unterteilt die Modellierungstiefe in fünf Ebenen, die vorwiegend zur Beschreibung von Montagemaschinen entwickelt wurden und nur eine Teilmenge mechatronischer Systeme darstellen. Diese Ebenen sind nicht ohne Weiteres auf mechatronische Systeme im Allgemeinen übertragbar. In [Dre06] und [ZW06] werden ebenfalls Stufen zur Beschreibung eingeführt, die wiederum nur für eine Teilmenge mechatronischer Systeme gelten. Einen sehr interessanten Ansatz zur Klassifikation der Modellierungstiefe zeigt LÜDECKE. Er verfolgt einen mathematischen Ansatz und eine klare Trennung. Besonders bei den letzten beiden Abstraktionsebenen ist eine solche Trennung durch die Angabe von konkreten Gleichungstypen gegeben, die diese Ebene repräsentieren.

A2.3 Auswahlkriterien für Anwendungsszenarien

In [Kuf12] wird eine gute Übersicht zu den einzelnen Anwendungsmöglichkeiten der jeweiligen Modellierungstiefe gegeben. Bei den Ansätzen aus dem Top-Down-Entwurf existieren grobe Anwendungsszenarien für die jeweilige Klasse, die allerdings aus der Vorgehensweise der zugrunde gelegten Entwurfsmethodik resultieren. Konkrete und wirklich detaillierte Anwendungsszenarien für die einzelnen Ebenen oder Stufen der Modellierungstiefe existieren in [Dre06] und [ZW06]. Es wird sehr detailliert beschrieben, wozu Modelle dieser Ebenen verwendet werden können.

A2.4 Systematische Vorgehensweise

Eine systematische Vorgehensweise bei der Wahl der Modellierungstiefe existiert in keinem der recherchierten Ansätze. Allerdings handelt es sich in den meisten Fällen auch nicht um Ansätze zur Wahl der Modellierungstiefe. Vielmehr werden die einzelnen Meilensteine der Entwicklung technischer Systeme mithilfe von Modellen repräsentiert. Vor allem bei den Einteilungsmöglichkeiten aus dem Top-down-Entwurf wird das sehr deutlich. Bei HAHN und der VDI-Richtlinie werden hingegen verschiedene Stufen eines mechatronischen Modells gezeigt. Das Ziel ist es, ein mechatronisches System durch ein numerisches Modell zu beschreiben und mithilfe von Simulationen Rückschlüsse auf das reale Verhalten des Systems ziehen zu können, ohne anzugeben, wie detailliert einzelne Systemelemente für bestimmte Modellierungsziele abgebildet werden müssen.

2.6 Fazit und Handlungsbedarf

Im folgenden Abschnitt werden zunächst ein Fazit gezogen und anschließend der Handlungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet.

Fazit

Die Recherche hat gezeigt, dass die Entwicklung mechatronischer Systeme, speziell der Entwurfsprozess, den Entwickler vor viele Herausforderungen stellt und zugleich eine Vielzahl an Verbesserungspotenzialen bietet. Keine der Vorgehensmodelle der recherchierten Entwurfsmethodiken erfüllen alle gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.4.6). Das V-Modell eignet sich sehr gut dazu, den gesamten modellbasierten Entwurf abzubilden. Die ENTIME-Entwurfssystematik und die mechatronische Komposition zeigen Ansätze bei der disziplinübergreifenden Betrachtung der Systemdynamik. Die Forderungen nach einer Vorgabe von Detaillierungsstufen im Entwurfsprozess und ein detaillierter Modellierungsprozess, aus dem ersichtlich wird, an welchen Stellen die Modellierungstiefe festzulegen ist, werden nicht erfüllt. Der Literaturüberblick zur Klassifikation und zur Wahl der Modellierungstiefe hat gezeigt, dass die gestellten Anforderungen von keinem existierenden Ansatz hinreichend erfüllt werden (vgl. Abschnitt 2.5.4). Allerdings bieten einige Klassifikationen sehr interessante Ansätze bzgl. der Einteilungskriterien der Modellierungstiefe.

ALVAREZ CABRERA et al. geben in [ACFT⁺10] einen Überblick über weitere Herausforderungen im Entwurf und in der Entwicklung mechatronischer Systeme, die sie aus Industrie und Wissenschaft zusammengetragen haben. Sie sehen die multidisziplinäre Modellierung als eine große Herausforderung im Entwurf mechatronischer Systeme an. Gleichzeitig identifizieren sie einen Mangel an geeigneten Werkzeugen und Methoden für den disziplinübergreifenden Entwurf solcher Systeme.

In [aca13, S. 93-95] wird bei den *“Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“*¹⁷ eine Methodik zur disziplinübergreifenden Zusammenarbeit gefordert, die eine zielgerichtete Nutzung von Modellen im Entwurfsprozess gewährleistet. Gerade in den frühen Phasen sollen Modelle eingesetzt werden. Weiterhin werden u. a. die interdisziplinäre Simulation, die Modularisierung und die Wiederverwendung sowie eine durchgängige Werkzeugunterstützung als wichtige Aspekte aufgeführt.

¹⁷*“Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration von CPS (Cyber-Physical Systems) in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation“ [aca13, S. 18].*

Im Rahmen einer Studie zum Thema *“Systems Engineering in der industriellen Praxis“* wurden Unternehmen aus den verschiedensten Bereichen zu den Herausforderungen zukünftiger Produkte befragt [GDS⁺13]. Die Unternehmen nennen die wachsende Interdisziplinarität und in diesem Zusammenhang auch die steigende Komplexität zukünftiger Produkte als große Herausforderungen für die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Es werden durchgängige Werkzeugketten, die Kompatibilität neuer Methoden in die bisherige Entwicklungswelt und frühzeitige Funktionstests gefordert. Zukünftige Produkte können nicht mehr nur aus dem Blickwinkel einer einzelnen Fachdisziplin betrachtet und somit auch nicht mit deren spezifischer Entwurfsmethodik allein entwickelt werden. Es wird eine Lücke zwischen der Leistungsfähigkeit etablierter, meist fachdisziplinspezifischer Entwurfsmethodiken und der notwendigen Leistungsfähigkeit einer geeigneten Entwurfsmethodik prognostiziert. Diese notwendige Leistungsfähigkeit resultiert aus der vorausgesagten Komplexitätssteigerung der Produkte. Diese Lücke gilt es mithilfe von disziplinübergreifenden Entwurfsmethodiken zu schließen [GDS⁺13, S. 17].

Die Verbände BITKOM, VDMA und ZVEI haben in einem gemeinsamen Projekt *“Plattform Industrie 4.0“* Forschungs- und Innovationsinhalte im Zusammenhang mit Industrie 4.0 zusammengefasst. Hierzu wurden Umsetzungsstrategien [BIT15a] und Themen für Forschung und Entwicklung [BIT15b] mit Vertretern aus Industrie und Wissenschaft erarbeitet. Einen Schwerpunkt stellt die Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus dar und in diesem Zusammenhang die Integration von realer und virtueller Welt. Zur Erreichung und Umsetzung eines durchgängigen Engineerings werden in [BIT15b, S. 14-17] einige angestrebte Ziele für Forschung und Innovation genannt. Hierzu gehören:

- *“Definition des Begriffs Modell, um sowohl disziplinspezifisch als auch disziplinübergreifend ein einheitliches Verständnis des Modellbegriffs zu schaffen.“*
- *“Modelle ermöglichen, die kreative Wertschöpfung von Ingenieuren transparent zu machen, und schaffen damit die Grundlage, komplexe Systeme überhaupt erstellen zu können.“*
- *“Über Auswertungsmöglichkeiten von Modellen können komplexe Systeme analysiert bzw. Entwurfsentscheidungen von Ingenieuren validiert werden.“*
- *“Skalierbare Modellierungstiefen in Abhängigkeit des Reifegrads im Produktlebenszyklus.“*
- *“Sicherstellung der Konsistenz zwischen allen erstellten Modellen.“*
- *“Verwendung von Lösungsmustern im Sinne von wiederverwendbaren Modellen bzw. Teilmodellen entlang der Kaskade von Komponenten (Teilsystemen) bis zum Gesamtsystem. Hierzu müssen parametrierbare Modelle in*

unterschiedlichen Modellierungstiefen erstellt und in Bibliotheken standardisiert zur Verfügung gestellt werden“ [BIT15b, S. 15].

Handlungsbedarf

Ein wichtiger Aspekt moderner Entwurfsmethodiken ist der Einsatz von Modellen im gesamten Entwurfsprozess. Bereits in den frühen Entwicklungsphasen werden Modelle zur Definition von Anforderungen an das spätere Produkt eingesetzt. Ein entscheidender Schritt im modellbasierten Entwurf stellt die Wahl der Modellierungstiefe dar. Genau an dieser Stelle fehlt es jedoch an einer Methode zu deren systematischer Wahl.

Die Literatur bietet sehr interessante Ansätze zur Einteilung der Modellierungstiefe, die jedoch nur Teilaspekte des Gesamtproblems berücksichtigen (siehe Tabelle 2-4, S. 55). Disziplinübergreifende Gültigkeit besitzen die Einteilungsmöglichkeiten aus der Modellbildung (vgl. Abschnitt 2.5.1, S. 46). Der mathematische Ansatz nach LÜDECKE ist besonders hervorzuheben, da versucht wird, anhand der Gleichungsarten, mit denen das System beschrieben wird, eine Skalierung der Modellierungstiefe vorzunehmen. Geeignete Auswahlkriterien für Anwendungsszenarien der Modelle in Abhängigkeit der Modellierungstiefe bieten die praxisnahen Einteilungsmöglichkeiten von ZIRN et al. und DRESIG (vgl. Abschnitt 2.5.3, S. 51). Eine systematische Vorgehensweise bei der Wahl der Modellierungstiefe existiert in keinem der recherchierten Ansätze.

In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, wie mithilfe einer Methode zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe der Handlungsbedarf gedeckt werden kann. Zunächst erfolgen in Kapitel 3 auf Basis der recherchierten Entwurfsmethodiken (vgl. Tabelle 2-2, S. 44) die Detaillierung und die Ausarbeitung eines Vorgehensmodells für die modellbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme. Als Ausgangspunkt dient das sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie etablierte V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04]. Ergänzt wird das Vorgehensmodell durch die ENTIME-Entwurfssystematik [GTS14]. Sie beinhaltet u. a. die von GAUSEMEIER et al. entwickelte Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. [GFD⁺08a], [GFD⁺08b]) sowie die mechatronische Komposition nach LÜCKEL et al. [LKS00]. Anhand der Entwurfsmethodik wird in Kapitel 4 die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme vorgestellt. Anschließend erfolgt in den weiteren Kapiteln die Beschreibung einer praxisnahen Anwendung der entwickelten Methoden und einer prototypischen Umsetzung eines IT-Werkzeugs zur Unterstützung im Entwurfsprozess.

3 Modellbasierte Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die mitentwickelte Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme, die den Ausgangspunkt für alle weiteren Kapitel darstellt. Bild 3-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau bzw. die einzelnen Bausteine der modellbasierten Entwurfsmethodik. Gemäß dem Vorgehensmodell gliedert sich die Entwicklung in Phasen, die wiederum in einzelne Prozessschritte unterteilt sind. In jedem Prozessschritt werden Tätigkeiten ausgeführt. Zur Ausführung der Tätigkeiten werden dem Entwickler Methoden an die Hand gegeben, die ihn dabei unterstützen sollen.

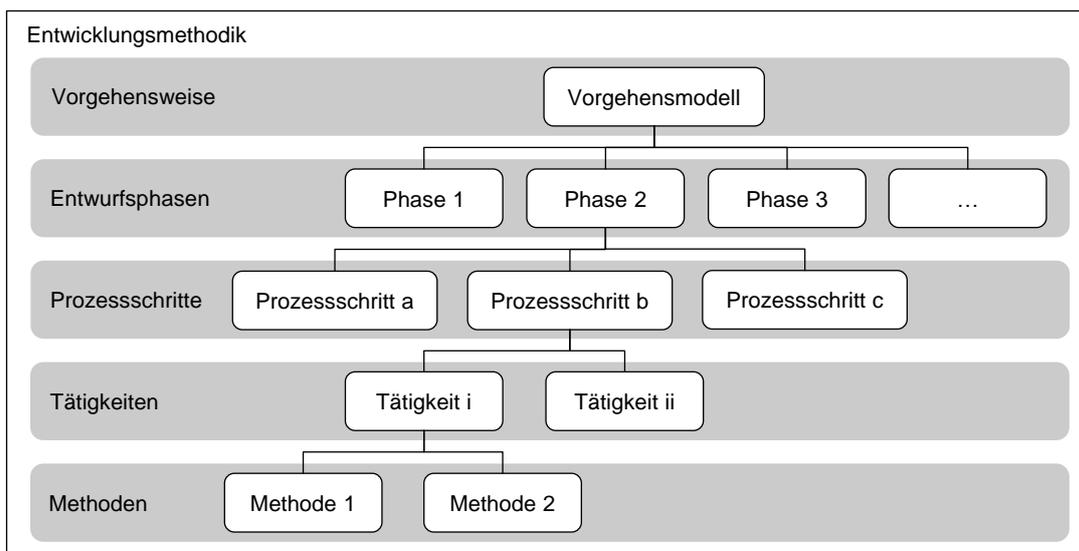


Bild 3-1: Aufbau und Bausteine der modellbasierten Entwurfsmethodik

Wie bereits in Abschnitt 2.4 gezeigt, existieren eine Vielzahl an Methodiken und Vorgehensweisen für den modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. Die entwickelte Methodik (vgl. auch [Oes18], [Kru19]) fasst im Wesentlichen die Stärken des V-Modells der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04] und der ENTIME-Entwurfssystematik [GTS14] zusammen. Diese beinhaltet u. a. die von GAUSEMEIER et al. entwickelte Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. [GFD⁺08a], [GFD⁺08b]) sowie die mechatronische Komposition nach LÜCKEL et al. [LKS00].

Ausgangspunkt der Methodik sind ein Entwicklungsauftrag und Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt. Am Ende des Vorgehensmodells steht als Ergebnis das Produkt. Als Grundgerüst dient das in der Industrie weitestgehend anerkannte V-Modell (siehe Bild 3-2), bestehend aus den Phasen – auch Äste genannt – **Systemkonzipierung**, **disziplinspezifischer Entwurf** und **Systemintegration**. Anhand der ENTIME-Entwurfssystematik werden die ersten beiden Phasen in die Prozessschritte Zielbeschreibung, Synthese und Analyse¹ unterteilt. Ein wichtiger Bestandteil der ENTIME-Entwurfssystematik ist die Wiederverwendung von Lösungswissen, die im Vorgehensmodell berücksichtigt wird. Es findet eine Integration der ENTIME Systematik in das bestehende V-Modell statt. Weiterhin wird die Systemintegrationsphase in die Schritte Zielbeschreibung, Synthese und Analyse strukturiert. Bei mechatronischen Systemen steht i. d. R. die kontrollierte Bewegung als zentrale Funktion im Vordergrund. Aus diesem Grund wird als eine wesentliche Neuerung die **disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik** eingeführt, die während der Entwurfsphasen in den jeweiligen Disziplinen den Informationsaustausch sicherstellt und alle Informationen bzgl. der Dynamik des Systems zusammenträgt. Im Gegensatz zum Dynamikbegriff in der Mechanik, der das Bewegungsverhalten von Starrkörpern beschreibt, umfasst die Systemdynamik sehr viel mehr. Im Rahmen der Systemdynamik wird das Zusammenwirken aller zeitveränderlicher Vorgänge im System berücksichtigt. Aufgrund der wachsenden Interdisziplinarität und der damit einhergehenden, steigenden Schnittstellenvielfalt zukünftiger mechatronischer Systeme leistet diese Phase einen wichtigen Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung. Die disziplinübergreifende Koordination besteht ebenfalls aus den Schritten Zielbeschreibung, Synthese und Analyse. Darüber hinaus sind weitere disziplinübergreifende Koordinationsphasen denkbar, wie beispielsweise eine Koordination des Energiebedarfs. Sie dienen der Konsistenzsicherung in der Ausarbeitung, wenn mehrere Fachdisziplinen parallel an der Erfüllung von Kernfunktionen beteiligt sind.

Die Entwurfsmethodik besteht somit aus den vier Phasen Systemkonzipierung, disziplinspezifischer Entwurf, disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik und Systemintegration. Die Phasen werden begleitet von **Modellbildung und -analyse** (vgl. Abschnitt 2.3). Die Modelle dienen u. a. zum Ableiten von Anforderungen an das System und für den Entwurf. Die **Eigenschaftsabsicherung** ist ein fortlaufender Vorgang über den gesamten Entwurfsprozess. Hierzu

¹Die Synthese steht in der Philosophie für eine Zusammensetzung, Zusammenfassung oder Verknüpfung von Elementen zu einem neuen Ganzen, wohingegen die Analyse eine Zerlegung, Zergliederung oder Auflösung eines Ganzen in seine Bestandteile meint. Nach KLAUS und BUHR ist die Synthese untrennbar verbunden mit dem ihr entgegengesetzten Verfahren der Analyse [KB76].

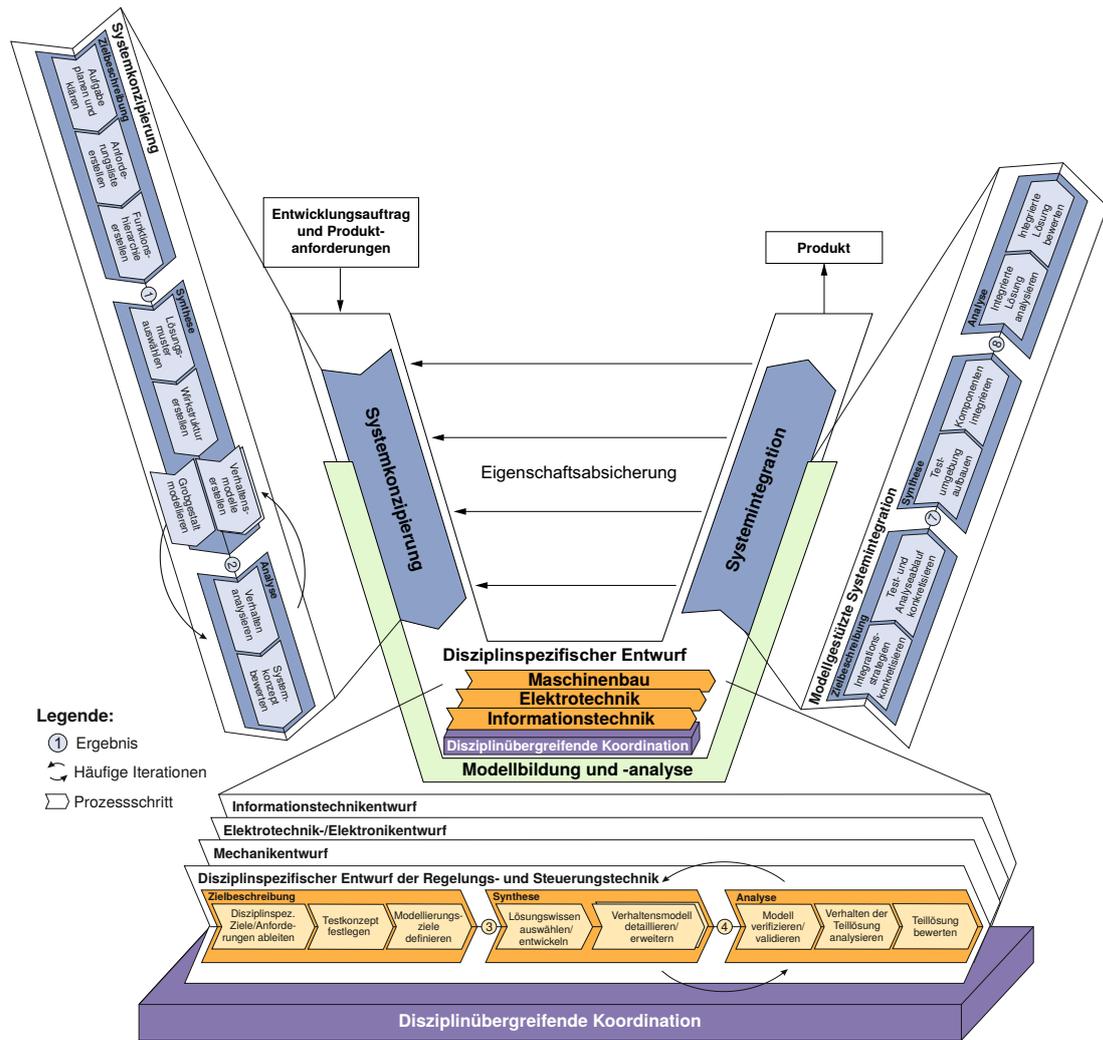


Bild 3-2: Vorgehensmodell zur Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme (vgl. [Oes18], [Kru19])

existieren verschiedene Techniken und Möglichkeiten, die in den einzelnen Abschnitten kurz vorgestellt werden.

In den folgenden Abschnitten werden die vier Entwurfsphasen mit den jeweiligen Prozessschritten dargestellt. Im Fokus stehen dabei Modellbildung und -analyse. Das detaillierte Vorgehensmodell dient als Ausgangspunkt für die weiteren Kapitel. Am Ende des Kapitels wird ein Zwischenfazit gegeben. Basierend auf der vorgestellten Entwurfsmethodik, wird in Kapitel 4 die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe präsentiert.

3.1 Systemkonzipierung

Die Systemkonzipierung umfasst die drei Prozessschritte Zielbeschreibung, Synthese und Analyse, wie in Bild 3-3 dargestellt. Diese Schritte beinhalten verschiedene Tätigkeiten, die im jeweiligen Schritt auszuführen sind. Die Phase beginnt mit dem Entwicklungsauftrag und den Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt (Produktanforderungen). Sie endet mit der Prinziplösung, die aus einem prinzipiell funktionsfähigem Systemkonzept und aus Anforderungen an die einzelnen Teilsysteme und Komponenten besteht. Die einzelnen Schritte der Systemkonzipierung werden disziplinübergreifend durchgeführt. Alle beteiligten Disziplinen erarbeiten gemeinsam die Prinziplösung. Ein wichtiger Bestandteil der disziplinübergreifenden Systemkonzipierung sind die auf der Spezifikationstechnik CONSENS basierenden Partialmodelle (siehe Abschnitt 2.4). Sie dienen zur Spezifikation der Prinziplösung. Mechatronische Systeme zeichnen sich u. a. durch ihr dynamisches Verhalten aus. Deshalb werden bereits in den frühen Phasen des Entwurfs idealisierte Dynamikmodelle eingesetzt, um das dynamische Verhalten des Systems frühzeitig zu analysieren und Anforderungen an die Teilsysteme und die Komponenten ableiten zu können, die im disziplinspezifischen Entwurf in den jeweiligen Disziplinen ausgearbeitet werden.

Zunächst erfolgen in der **Zielbeschreibung** auf Basis des Entwicklungsauftrages das Planen und das Klären der Aufgabenstellung. Hierzu werden die Partialmodelle Umfeld, Anwendungsszenarien, Anforderungsliste und Funktionshierarchie der Spezifikationstechnik CONSENS verwendet (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 36). Beginnend mit der Erstellung eines Umfeldmodells und den Anwendungsszenarien sowie den eingangs festgelegten Produkthanforderungen, erfolgt die Formulierung von Systemanforderungen. Die Systemanforderungen werden in Form einer Anforderungsliste festgehalten. Sie bildet die Grundlage zur Bewertung der Eigenschaften des zu entwickelnden Systems. Die Formulierung und der Umgang mit Anforderungen im Bereich mechatronischer bzw. intelligenter technischer Systeme sind ein weites Forschungsfeld und werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet. Ansätze finden sich in [LLT15a] und [LLO⁺15]. Aus den Anforderungen

werden Funktionen abgeleitet, und mithilfe einer Funktionshierarchie wird das zu entwickelnde System strukturiert. Dabei wird die Gesamtfunktion des Systems solange hierarchisch in Teilfunktionen unterteilt, bis zu den Subfunktionen sinnvolle Lösungsmuster gefunden werden können. Die Formulierung der einzelnen Funktionen erfolgt lösungsneutral. Weiterhin werden in der Zielbeschreibung Testkonzeptionen für die anschließende Synthese und Analyse festgelegt. Es muss geklärt werden, wie die spezifizierten Funktionen und Anforderungen an das zu entwickelnde System abgesichert werden können. Eine Möglichkeit ist die Absicherung mithilfe von Modellen; deshalb werden bereits in der Zielbeschreibung Modellierungsziele festgelegt, d. h. gefragt: An welchen Stellen können Modelle im Rahmen der Entwicklung dieses Systems sinnvoll eingesetzt werden und zu welchem Zweck? In diesem Zusammenhang kann bereits eine Modellierungstiefe abgeschätzt werden, die ggf. im weiteren Verlauf von Zielbeschreibung und Synthese angepasst werden muss. Mit dieser Wahl wird festgelegt, ob und wie detailliert die einzelnen Systemelemente im Modell abzubilden sind. Der Vorgang erfolgt iterativ in Verbindung mit der Synthese, bei der Lösungsmuster zur Erfüllung der zuvor erstellten Funktionshierarchie ausgewählt und mögliche Lösungsvarianten mithilfe von Wirkstrukturen dargestellt werden. An dieser Stelle fehlt es an einer geeigneten Methode zur Wahl der Modellierungstiefe auf Basis der definierten Modellierungsziele.

In der **Synthese** erfolgt zunächst die Auswahl von Lösungsmustern (siehe Abschnitt 2.1, S. 12) zur Erfüllung der einzelnen, zuvor festgelegten (Teil-) Funktionen. Dabei kann ein Lösungsmuster mehrere Funktionen erfüllen. Ziel ist es, sowohl auf bestehende Lösungen zurückgreifen zu können als auch neue Lösungsmuster zu entwickeln. Dies setzt voraus, dass Lösungen nach Abschluss der Entwicklung dementsprechend aufbereitet werden. Eine Methode zur Aufbereitung und Wiederverwendung ist u. a. in [Oes18] dargestellt. Eine gängige Methode zur Kombination verschiedener Lösungsmuster zu einer Gesamtlösung ist beispielsweise ein morphologischer Kasten [PBF⁺05]. Anschließend wird die Wirkstruktur der ausgewählten Lösungsmuster zur Erfüllung der einzelnen Funktionen des Systems erstellt. In dieser Wirkstruktur werden die Systemelemente mit den bekannten Flussarten Information, Energie und Stoff in Beziehung gesetzt [GTS14]. Somit werden alle wichtigen Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemelementen und auch zur Umwelt erfasst. Auf Basis der Wirkstruktur erfolgt die Modellierung der Partialmodelle Verhalten-Zustände, Verhalten-Aktivitäten sowie Gestalt (siehe Abschnitt 2.4). Im Partialmodell Verhalten-Zustände werden die diskreten Zustände und Zustandsübergänge abgebildet, und im Partialmodell Verhalten-Aktivitäten werden die Ablaufprozesse in einem Systemzustand beschrieben [GTS14]. Sie bilden den Ausgangspunkt für die spätere detaillierte Ausarbeitung in der Disziplin Softwaretechnik. Ein erstes grobes Gestaltmodell des zu entwickelnden Systems verbirgt sich hinter dem Partialmodell Gestalt.

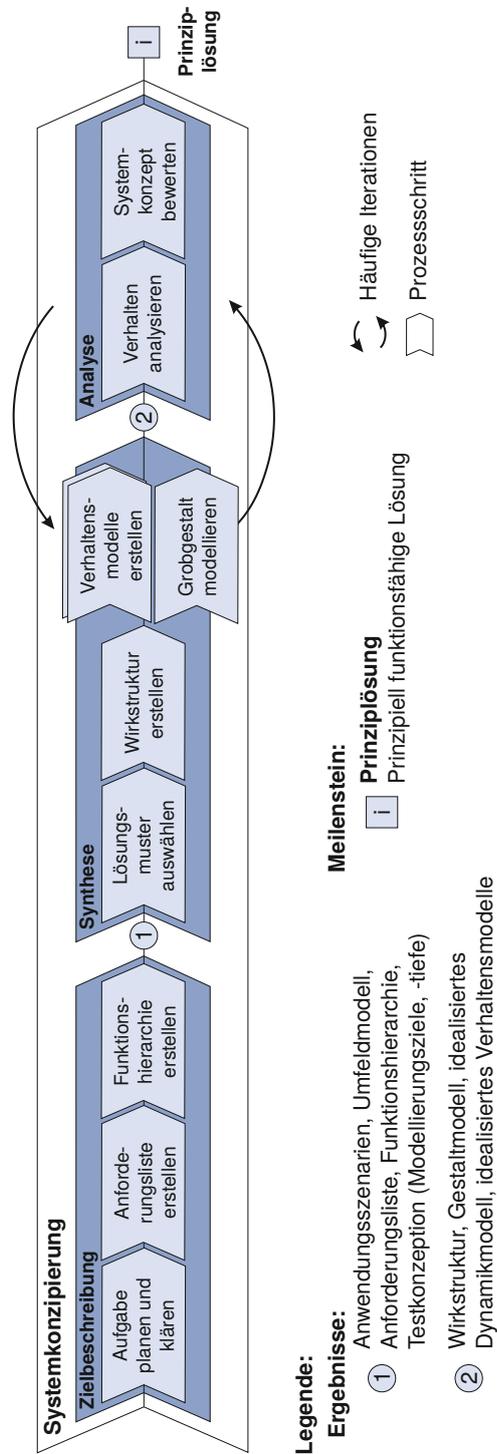


Bild 3-3: Systemkonzipierung (vgl. [Oes18], [Kru19])

Die rechnerunterstützte Modellierung erfolgt mit Hilfe gängiger 3D-CAD-Systeme. Ergänzend zu den Partialmodellen, wird ein erstes idealisiertes Dynamikmodell des Systems erstellt. Idealisierte Dynamikmodelle werden mithilfe von mathematischen Modellen repräsentiert. Sie besitzen in dieser frühen Entwurfsphase eine einfache Struktur und wenige Parameter. Als Grundlage dient die Wirkstruktur, welche die Schnittstellen der einzelnen Systemelemente untereinander und zur Umwelt bereits enthält. Gemäß dem in der Zielbeschreibung festgelegten Modellierungsziel und der Auswahl von Lösungsmustern erfolgt zunächst die Wahl der Modellierungstiefe für die einzelnen Systemelemente. Anschließend werden die einzelnen Systemelemente modelliert. Hierbei kann ggf. auf existierende Lösungsmustermodelle zurückgegriffen werden. Falls keine Modelle in der geforderten Modellierungstiefe vorhanden sind, müssen sie vom Entwickler erstellt werden. Die in Abschnitt 2.3 vorgestellte Vorgehensweise zur Erstellung von Dynamikmodellen kann als Unterstützung herangezogen werden (siehe Bild 2-5, S. 23). Die Schnittstellen zu anderen Systemelementen und zur Umwelt sind aus der Wirkstruktur bekannt, so dass zunächst ein physikalisches Ersatzbild erzeugt werden muss. In den nächsten Schritten erfolgt die Anwendung physikalischer Gesetze zur Erzeugung eines qualitativen mathematischen Modells bis hin zu ersten Simulationen des dynamischen Verhaltens. Mithilfe idealisierter Dynamikmodelle können das System grob ausgelegt, Parametersätze untersucht und erste Regelungs- und Steuerungsstrategien unter idealisierten Randbedingungen getestet werden.

Auf die Synthese folgt die **Analyse**, wobei nach BUHR et al. die Synthese untrennbar mit dem entgegengesetzten Verfahren der Analyse verbunden ist [BK79], was durch die Pfeile (häufige Iterationen) in Bild 3-3 angedeutet ist. In diesem Schritt werden verschiedene entwickelte Lösungsvarianten analysiert, und es erfolgt auf Basis der Analyseergebnisse eine Auswahl der Lösungsvariante. Es findet eine erste Eigenschaftsabsicherung statt, indem die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zu entwickelnden Systems untersucht und anhand eines Vergleichs mit den Systemanforderungen bewertet werden. Die so entstandene Prinziplösung bildet den ersten Meilenstein der modellbasierten Entwurfsmethodik. Sie repräsentiert eine prinzipiell funktionsfähige Lösung und bildet die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen ab. Weiterhin enthält sie die Anforderungen an die Teilsysteme und die Komponenten, die in der nachfolgenden Phase ausgearbeitet werden. Mit diesem Funktionsnachweis und der ersten Grobdimensionierung des Systems geht es in den disziplinspezifischen Entwurf.

3.2 Disziplinspezifischer Entwurf

Im disziplinspezifischen Entwurf wird die Prinziplösung konkretisiert. Die Konkretisierung erfolgt in der Regel parallel in getrennten Fachdisziplinen unter Verwendung spezifischer und bewährter Methoden. Hierzu werden detaillierte Berechnungen und Auslegungen durchgeführt, um insbesondere die Funktionserfüllung kritischer Funktionen sicherzustellen. Die Phase gliedert sich ebenfalls in die drei Schritte Zielbeschreibung, Synthese und Analyse. Das Ergebnis stellt einen virtuellen Prototyp des zu entwickelnden Systems dar. Exemplarisch für eine Disziplin ist in Bild 3-4 der Entwurf der Regelungs- und Steuerungstechnik dargestellt. Weitere Disziplinen, wie z. B. die Informationstechnik, Elektronik/Elektrotechnik und Mechanik, sind im Bild 3-4 angedeutet.

Ausgangspunkt für den disziplinspezifischen Entwurf sind die in der Systemkonzipierung ermittelten Komponentenanforderungen. In der **Zielbeschreibung** werden deshalb zunächst disziplinspezifische Ziele und die entscheidenden Anforderungen an die zu entwickelnde Komponente abgeleitet. Dies sind beispielsweise spezielle Anforderungen an die Konstruktion, die Bandbreite der Regelung oder die Auflösung der Sensorik. Danach werden Testkonzepte zur Eigenschaftsabsicherung in der anschließenden Synthese und Analyse festgelegt. Die Test-, Analyse- und Auswerteverfahren sollen zu Beginn dieser Phase festgelegt werden, damit entsprechende Vorbereitungen bereits parallel zur Entwicklung durchgeführt werden können. Zu den gängigen Verfahren beim Entwurf von Regelungs- und Steuerungssoftware gehören die Untersuchungen im Rahmen von Model-in-the-Loop- (MiL) und Software-in-the-Loop-Simulationen (SiL). Bei der MiL-Simulation wird ein Modell von Regelung und Steuerung gegen ein Modell der Strecke analysiert und getestet. Die SiL-Simulation umfasst die Untersuchung des erzeugten Steuerungscode, wie er auch auf einem realen Steuergerät appliziert werden würde, mit einem Modell der Strecke. Weitere disziplinspezifische Testkonzepte sind z. B. RCP, FEM-Berechnungen und Strömungssimulationen. Je nach Test- und Analyseverfahren müssen unterschiedliche Anforderungen an ein Modell gestellt werden. Gemäß diesen Modellierungszielen kann eine geeignete Modellierungstiefe abgeschätzt werden, die ggf. in der Synthese nach der Auswahl von Lösungswissen angepasst werden muss. Mit dieser Wahl wird festgelegt, ob und wie detailliert die einzelnen Systemelemente im Modell abzubilden sind. Der Vorgang erfolgt iterativ in Verbindung mit der Synthese, bei der die in der Systemkonzipierung ausgewählten Lösungsmuster durch konkreteres Lösungswissen in Form von disziplinspezifischen Lösungselementen oder konkreteren Lösungsmustern ersetzt werden. An dieser Stelle soll die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe auf Basis der definierten Modellierungsziele den Entwickler unterstützen.

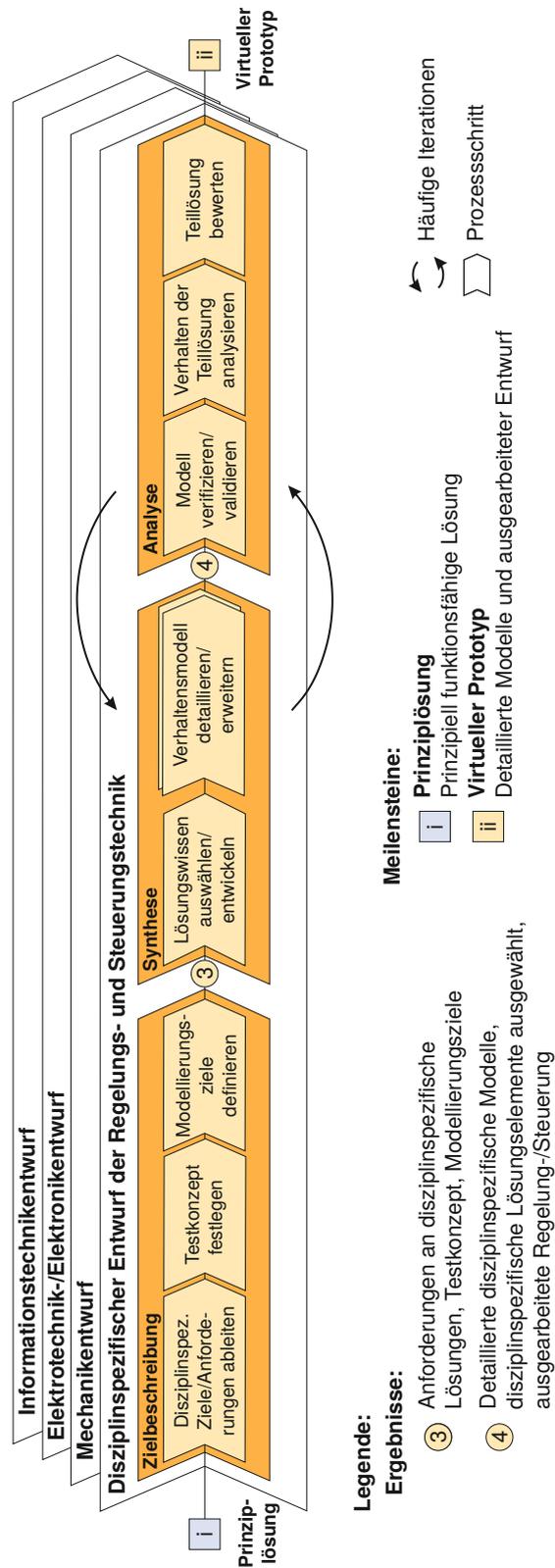


Bild 3-4: Disziplinspezifischer Entwurf (vgl. [Oes18], [Kru19])

Im nächsten Schritt wird in der **Synthese** Lösungswissen in Form von Lösungselementen oder disziplinspezifischen Lösungsmustern ausgewählt. Diese ersetzen die in der Systemkonzipierung gewählten Lösungsmuster und konkretisieren somit die Lösung. Für den Entwurf der Regelungs- und Steuerungstechnik kann ein konkretes Lösungsmuster beispielsweise ein Zustandsschätzer sein. Auch in diesem Fall sollen sowohl auf bereits vorhandenes Lösungswissen zurückgegriffen als auch neue Lösungen entwickelt werden. Eine Methode zur Wiederverwendung und Aufbereitung von Lösungswissen wird in [Oes18] und [OJT⁺12] vorgestellt. Ausgehend von dem in der Zielbeschreibung festgelegten Modellierungsziel und der Auswahl von Lösungswissen, erfolgt zunächst die Wahl der Modellierungstiefe für die einzelnen Systemelemente. Je nach gewählter Modellierungstiefe müssen die idealisierten Lösungsmustermodelle detailliert und erweitert werden. Hierbei kann ggf. auf existierende Lösungselementmodelle zurückgegriffen werden. Lösungselementmodelle besitzen gegenüber den Lösungsmustermodellen eine detailliertere Struktur und benötigen eine größere Anzahl an Parametern. Falls keine Modelle in der geforderten Modellierungstiefe vorhanden sind, müssen sie vom Entwickler erstellt werden. Hierzu kann ebenfalls die in Abschnitt 2.3 vorgestellte Vorgehensweise zur Erstellung von Dynamikmodellen als Unterstützung herangezogen werden (siehe Bild 2-5, S. 23). Mithilfe detaillierterer Modelle können das System feiner ausgearbeitet und kritische Funktionen abgesichert werden. Weiterhin erlauben detaillierte Dynamikmodelle in diesem Fall eine genauere Auslegung von Regelungs- und Steuerungsstrategien.

In der anschließenden **Analyse** muss das Modell zunächst verifiziert und validiert werden. Ohne Verifikation und Validierung ist keine zuverlässige Modellanalyse möglich. Die *Verifikation* ist der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und aussagekräftigen Referenzdaten. Hierzu eignen sich Erkenntnisse, die über analytische Betrachtungen der zugrunde liegenden mathematischen Modelle gewonnen werden können. Beispiele sind das stationäre Verhalten über Grenzwertsätze der LAPLACE-Transformation, das eingeschwungene Verhalten bei harmonischer Anregung mittels Frequenzgang sowie die Drall- und die Impulserhaltung bei konservativen mechanischen Systemen (vgl. [Jan10]). Die *Validierung* erfolgt mithilfe von Messungen an Prüfmustern, Prüfständen oder bereits vorhandenen und validierten Modellen. Ggf. erfolgt eine Identifikation fehlender Parameter. Methoden zur Parameteridentifikation und Validierung finden sich in [Kee11], [IM11], [Nel01], [GW08], [PS12] und [Kru19]. Des Weiteren wird das Verhalten der Teillösungen analysiert und bewertet (siehe Bild 3-4). Auch in dieser Phase finden häufige Iterationen zwischen Synthese und Analyse statt. Am Ende des disziplinspezifischen Entwurfs entsteht der virtuelle Prototyp, der durch detailliertere Modelle bzw. konkretere Erkenntnisse und einen ausgearbeiteten Entwurf repräsentiert wird. Er stellt den zweiten Meilenstein der Entwurfsmethodik dar.

Der virtuelle Prototyp, bestehend aus verschiedenen Modellen zur Beschreibung des zu entwickelnden Produktes, ist darüber hinaus ein Bestandteil des sogenannten *digitalen Zwilling*s. GRIEVES beschreibt den digitalen Zwilling als:

“[...] the Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level“ [GV17, S. 94].

Er stellt ein virtuelles Abbild in einer virtuellen Umgebung dar, welches alle Informationen eines (potentiellen) physischen Produkts besitzt und dieses innerhalb des gesamten Produktlebenszyklus spiegelt. Der digitale Zwilling entsteht bereits in der Entwurfsphase eines Produktes und wird - im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise beim modellbasierten Entwickeln - über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes weiterentwickelt und verwendet. Es sei an dieser Stelle u. a. auf [BR16], [MP15] und [GV17] verwiesen.

3.3 Disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik

Bei mechatronischen Systemen steht die kontrollierte Bewegung als eine zentrale Kernfunktion im Vordergrund. Diese Funktion wird durch das Zusammenspiel zahlreicher Komponenten aus verschiedensten Disziplinen erfüllt. Hierzu ist es erforderlich, das dynamische Verhalten des zu entwickelnden Systems stets im Blick zu behalten, um die Konsistenz und den ständigen Informationsaustausch zwischen den Disziplinen sicherzustellen. Diese Aufgabe wird mithilfe der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik umgesetzt (siehe Bild 3-5). Sie erfolgt parallel zu Konkretisierung und Ausarbeitung in den jeweiligen Disziplinen. Werden beispielsweise in der Konstruktion Massen oder Steifigkeiten verändert, kann dies einen Einfluss auf den Regelungs- und den Steuerungsentwurf haben. Die disziplinübergreifende Koordination stellt den Informationsaustausch zwischen den jeweiligen Disziplinen sicher. Zur frühzeitigen Überwachung der Kernfunktion werden in dieser Phase Integrationsstrategien bzgl. der Zusammenführung von Teilmodellen im Rahmen von MiL- oder SiL-Simulationen ausgearbeitet. Es handelt sich dabei um eine virtuelle Systemintegration von Komponenten, welche die Funktion des kontrollierten Bewegens beeinflussen. Weiterhin werden auch Strategien für die anschließende modellgestützte Systemintegration (z. B. HiL-Prüfstände) erarbeitet. Hierzu müssen Analyseumgebungen aufgebaut und ganzheitliche Systemanalysen durchgeführt werden, um den entstehenden virtuellen Prototyp hinsichtlich der dynamischen Eigenschaften abzusichern.

JUST weist diese Aufgaben dem „Mechatroniker“ zu [JT14a]. In [ANR12] wird ebenfalls eine koordinationsähnliche Phase eingeführt. ANDERL et al. bezeichnen

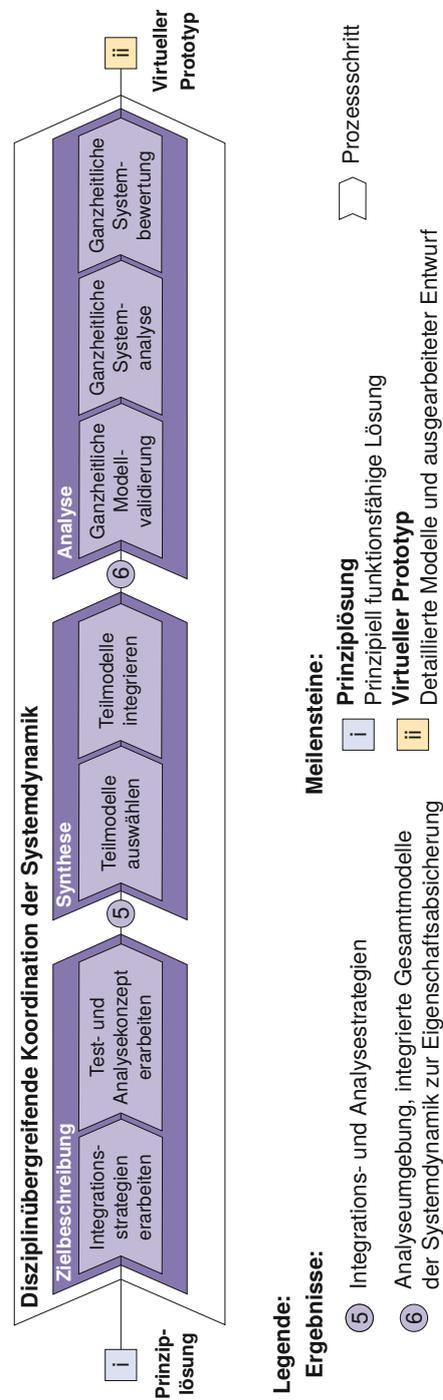


Bild 3-5: Disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik (vgl. [Oes18], [Kru19])

sie als virtuelle Systemintegrationsphase. In dieser Phase werden die disziplinspezifischen Modelle zusammengeführt, analysiert und ggf. detailliert, um die Systemeigenschaften abzusichern, bevor die physische Systemintegration erfolgt. Die einzelnen Prozessschritte der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik sind in Bild 3-5 dargestellt. Die Phase baut auf der Prinziplösung auf und endet mit einem virtuellen Prototyp des zu entwickelnden Systems.

Die **Zielbeschreibung** bei der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik beginnt mit der Erarbeitung von virtuellen Systemintegrationsstrategien zur Eigenschaftsabsicherung und von Strategien für die anschließende modellgestützte Systemintegration. Zunächst werden die virtuellen Systemintegrationsstrategien ausgearbeitet, d. h. festgestellt, welche Teilmodelle sich sinnvoll kombinieren lassen und im Rahmen von MiL-Simulationen einen Beitrag zur Entwicklung des virtuellen Prototyps leisten. Darüber hinaus muss festgelegt werden, ob z. B. HiL-Prüfstände zur schrittweise modellgestützten Systemintegration benötigt werden. Hierzu müssen ggf. echtzeitfähige Modelle einzelner Systemelemente von der verantwortlichen Disziplin angefertigt werden. An dieser Stelle spielt die Modellierungstiefe der einzelnen Teilmodelle eine wichtige, ja entscheidende Rolle. Auf Basis der erarbeiteten Integrationsstrategien werden im nächsten Schritt Test- und Analysekonzepte festgelegt.

In der **Synthese** werden anhand der festgelegten Integrationsstrategien die in den einzelnen Disziplinen entwickelten Teilmodelle ausgewählt und zu einem Gesamtmodell integriert. Bei der Wahl der Teilmodelle spielt die Modellierungstiefe der einzelnen Modelle eine entscheidende Rolle. Es muss entschieden werden, welches Teilmodell wie detailliert benötigt wird und wie es mit anderen Teilmodellen kombiniert werden kann. Falls Modelle nicht in einer geforderten Modellierungstiefe vorhanden sind, müssen die verantwortlichen Disziplinen die entsprechenden Modelle nachliefern. Es entsteht eine Analyseumgebung, in der das integrierte Gesamtmodell der Systemdynamik zur Absicherung der Eigenschaften analysiert werden kann. Die Analyse entspricht der ganzheitlichen Komposition nach ILLG (siehe Abschnitt 2.4.1).

Die **Analyse** beginnt mit einer ganzheitlichen Modellvalidierung des aus den Teilmodellen zusammengesetzten Modells. Die Teilmodelle sind bereits in der disziplinspezifischen Entwurfsphase verifiziert und validiert worden (siehe Abschnitt 3.2), allerdings ist allein dadurch noch keine Übertragung auf das zusammengesetzte Modell möglich. Deshalb muss eine Validierung dieses Modells erfolgen. Anschließend werden die ganzheitliche Systemanalyse und die Systembewertung durchgeführt. Das Ergebnis der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik ist ein vollständig validierter und abgesicherter virtueller Prototyp des zu entwickelnden Systems auf der einen Seite sowie gegebenenfalls benötigte

Teilmodelle für die folgende modellgestützte Systemintegration auf der anderen Seite.

3.4 Modellgestützte Systemintegration

Anhand des zuvor entwickelten virtuellen Prototyps erfolgt in der modellgestützten Systemintegration die schrittweise Umsetzung des virtuellen Prototyps in die Realität. In Bild 3-6 sind die einzelnen Schritte zur Umsetzung dargestellt. Die Phase gliedert sich in Zielbeschreibung, Synthese und Analyse. Das Ergebnis dieser Phase ist eine vollständig integrierte Gesamtlösung.

Zunächst werden in der **Zielbeschreibung** die bereits in der disziplinübergreifenden Koordination festgelegten Integrationsstrategien sowie der Test- und Analyseablauf konkretisiert. Anschließend werden in der **Synthese** die erforderlichen Testumgebungen aufgebaut und die Komponenten integriert. Testumgebungen zur Eigenschaftsabsicherung sind z. B. HiL-Prüfstände. Dabei kann neben dem klassischen Steuergeräte-HiL auch ein Komponenten-HiL eingesetzt werden. Beim klassischen Steuergeräte-HiL wird das Steuergerät als realer Baustein aufgebaut und gegen ein Modell der Strecke sowie der Aktorik und der Sensorik getestet. Der Begriff Komponenten-HiL beschreibt die Eigenschaftsabsicherung einer realen Komponente, wie z. B. eines real aufgebauten Aktors, der in einer Schleife mit dem Strecken- und dem Steuerungsmodell getestet wird. Im Anschluss an die Synthese erfolgt wie gewohnt die **Analyse**. An dieser Stelle wird die integrierte Lösung analysiert und bewertet, womit der dritte Meilenstein der Entwurfsmethodik erreicht ist. Dieser stellt die konkrete Lösung, d. h. die vollständig integrierte Gesamtlösung des zu entwickelnden Systems dar. Im Anschluss an die modellgestützte Systemintegration erfolgen die reale Integration von Teilsystemen und Komponenten sowie die Inbetriebnahme.

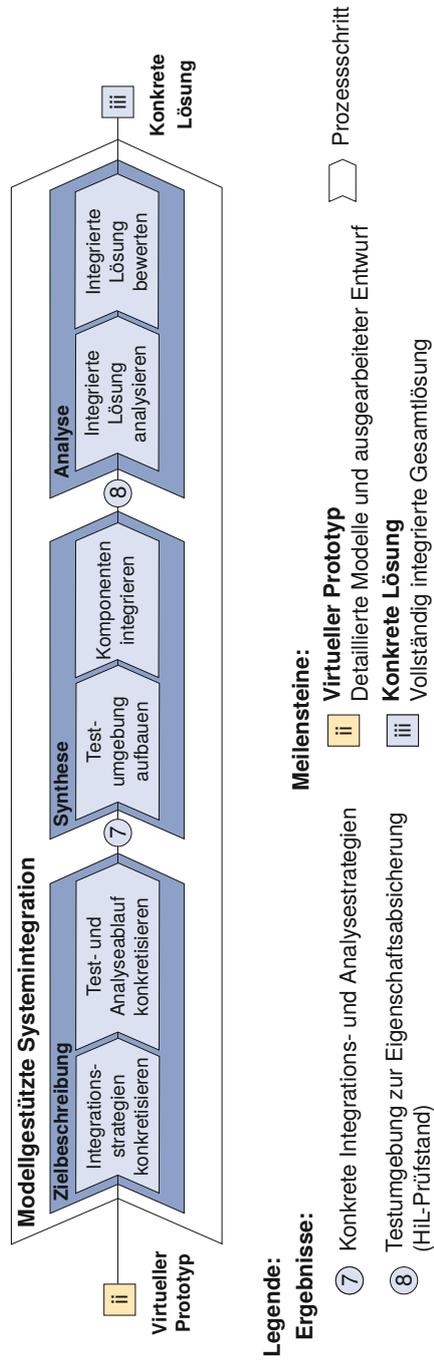


Bild 3-6: Modellgestützte Systemintegration (vgl. [Oes18], [Kru19])

3.5 Zwischenfazit

Abschließend wird im Folgenden das mitentwickelte Vorgehensmodell hinsichtlich der gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.4.6, S. 42) diskutiert.

Das Vorgehensmodell der modellbasierten Entwurfsmethodik umfasst den gesamten Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Ausgehend von einem Entwicklungsauftrag, wird die Lösung von Phase zu Phase konkretisiert und gegenüber den spezifizierten Anforderungen und Eigenschaften abgesichert. Am Ende der Entwurfsmethodik entsteht eine konkrete Lösung in Form eines Produktes. Somit ist die Anforderung A1.1, den gesamten Entwurfsprozess zu umfassen, erfüllt.

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch das Zusammenspiel verschiedener Disziplinen zur Funktionserfüllung aus, was sich auch in der Systemdynamik widerspiegelt. Es können einzelne Systemelemente und/oder Teilsysteme verschiedener Disziplinen die Systemdynamik beeinflussen. Hierzu ist es erforderlich, das dynamische Verhalten des zu entwickelnden Systems stets im Blick zu behalten. Um die Konsistenz und den ständigen Informationsaustausch zwischen den Disziplinen sicherzustellen, ist die disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik eingeführt worden. Zur frühzeitigen Überwachung der Kernfunktion werden in dieser Phase virtuelle Systemintegrationsstrategien erarbeitet und ausgeführt. Darüber hinaus werden hier Strategien für die spätere modellgestützte Systemintegration festgelegt.

Für die Entwicklung einer Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe ist es zwingend erforderlich, den Modellierungsprozess entsprechend detailliert darzustellen, um mögliche Einsatzstellen der Methode zu identifizieren. Wie die vorherigen Abschnitte zeigen, zieht sich die Wahl der Modellierungstiefe durch den gesamten Entwurfsprozess. In der Systemkonzipierung werden für einen Funktionsnachweis oder zur groben Auslegung eines ersten Regelungs- und Steuerungsentwurfs idealisierte Dynamikmodelle verwendet. Diese Modelle bilden die wesentlichen physikalischen und logischen Eigenschaften des zu entwickelnden Systems ab. Der Entwickler muss entscheiden, ob und wie detailliert die einzelnen Systemelemente zu modellieren sind. Anschließend wird im disziplinspezifischen Entwurf die Prinziplösung konkretisiert. Die Konkretisierung ist häufig mit einer Detaillierung der Modelle verbunden. In dieser Phase steht der Entwickler wieder vor der Frage, wie detailliert die einzelnen Systemelemente zur Eigenschaftsabsicherung zu modellieren sind. Das Ergebnis des disziplinspezifischen Entwurfs ist ein virtueller Prototyp, der durch detailliertere Modelle bzw. konkretere Erkenntnisse und einem ausgearbeiteten Entwurf repräsentiert wird. In der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik werden Integrationsstrategien festgelegt, und es muss entschieden werden, wie detailliert bestimmte Teilmodelle abzubilden sind. Im Rahmen der modellgestützten Integration werden ggf. HiL-

Prüfstände aufgebaut. Dadurch entstehen neue Anforderungen an Teilmodelle, wie z. B. Echtzeitfähigkeit.

Die Entwurfsmethodik enthält eine grobe Aufteilung nach Detaillierungsstufen. Während in der Konzipierung ausschließlich idealisierte Modelle eingesetzt werden sollen, werden im disziplinspezifischen Entwurf detaillierte Modelle zur Eigenschaftsabsicherung verwendet. Diese grobe, qualitative Strukturierung wird im folgenden Kapitel als Ausgangspunkt für die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe verwendet.

Zusammenfassend betrachtet, erfüllt die Entwurfsmethodik die gestellten Anforderungen. Das Vorgehensmodell bietet beste Voraussetzungen für die Integration einer Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe. Weiterhin müssen u. a. die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Was sind mögliche Modellierungsziele in den jeweiligen Entwurfsphasen?
- Welche Modellierungstiefe ist zu wählen?
- Welche Kriterien können zur Unterscheidung von Modellierungstiefen verwendet werden?

4 Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Die Methode leistet einen Beitrag zur Verbesserung des Entwurfs mechatronischer Systeme und unterstützt den Entwickler bei der Wahl der Modellierungstiefe in den entscheidenden Phasen des modellbasierten Entwurfsprozesses. Nachdem in Kapitel 3 der Entwurfsprozess für mechatronische Systeme detailliert vorgestellt und definiert wurde, wird im folgenden Kapitel die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe präsentiert, um somit den in Abschnitt 2.6 (siehe S. 57) gezeigten Handlungsbedarf zu decken.

Zunächst werden in Abschnitt 4.1 die Eigenschaften Modellierungstiefe und Modellkomplexität von Dynamikmodellen aufgegriffen (vgl. Abschnitt 2.1, S. 15) und einander im Hinblick auf die Methode gegenübergestellt. In Abschnitt 4.2 wird als Leitfaden dieses Kapitels ein Vorgehen bei Modellbildung und -analyse von Dynamikmodellen anhand der Ergebnisse aus Kapitel 3 vorgestellt. Dieses Vorgehen unterteilt sich in vier Phasen: **Zielbestimmung**, **Modellsynthese**, **Modellanalyse** und **Modelldokumentation**. Im Fokus dieses Kapitels steht die Zielbestimmung, in der u. a. Modellierungsziele und die Modellierungstiefe festgelegt werden. Die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe ist somit ein Bestandteil der Zielbestimmung beim Vorgehen zu Modellbildung und -analyse.

Ein wichtiger Bestandteil der Modellbildung sind Modellierungsziele. Der Entwickler sollte sich fragen, zu welchem Zweck ein Modell eingesetzt wird. Daher werden in Abschnitt 4.3 einige Modellierungsziele im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme gezeigt. Anschließend werden vier Ebenen der Modellierungstiefe definiert, mit denen sich die Modellierungstiefen von Dynamikmodellen im Entwurf mechatronischer Systeme beschreiben lassen (siehe Abschnitt 4.4). Zur Wahl der verschiedenen Ebenen der Modellierungstiefe werden in Abschnitt 4.5 Kriterien definiert. Diese sollen den Entwickler bei der Wahl unterstützen.

Mit dem Ziel, die Modellauswahl in der Modellsynthese zu vereinfachen, werden in Abschnitt 4.6 Methoden zur Quantifizierung von Modellierungstiefe und Modellkomplexität vorgestellt. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.7 die Anwendung der Methode am Beispiel kooperierender Delta-Roboter.

4.1 Modellierungstiefe und Modellkomplexität von Dynamikmodellen

Dynamikmodelle bilden das dynamische Verhalten von Systemen mithilfe mathematischer Beschreibungen ab. Sie spielen insbesondere beim Entwurf mechatronischer Systeme eine entscheidende Rolle. Bei der Modellierung der Dynamik bestehen viele verschiedene Möglichkeiten, diese geeignet abzubilden (vgl. Abschnitt 2.3, S. 22). Doch was bedeutet „geeignet“, und wann ist ein Modell „geeignet“ bzw. „ungeeignet“? Der allgemein bekannte Leitsatz der Modellbildung sagt: Modelle müssen so genau wie nötig und so einfach wie möglich sein. Aber wann ist ein Modell so genau wie nötig und so einfach wie möglich? Um diese Frage zu beantworten, werden im ersten Schritt zwei Modelleigenschaften herangezogen: die Modellierungstiefe und die Modellkomplexität. BROOKS et al. bezeichnen diese Begriffe als häufig verwendete Modelleigenschaften zum Vergleich von Modellen.

“The most common attributes used to compare alternative models are level of detail and complexity although these terms are used in a number of different ways“ [BT96, S. 1].

In Kapitel 2 wurden die Begriffe bereits ausführlich hergeleitet und definiert. An dieser Stelle werden sie kurz aufgegriffen und die Merkmale sowie der Unterschied im Hinblick auf die Methode zur Wahl einer Modellierungstiefe dargestellt. Zunächst wird der Begriff Modellierungstiefe behandelt.

Modellierungstiefe: *Der Begriff Modellierungstiefe beschreibt, wie detailliert ein Effekt und seine Wechselwirkungen in einem Modell abgebildet sind. Der Begriff Detaillierungsgrad kann synonym zum Begriff Modellierungstiefe verwendet werden.*

Ein Modell mit einer hohen Modellierungstiefe bildet einen oder mehrere Effekte sehr detailliert ab und besitzt meist zahlreiche Parameter. Im Gegensatz hierzu beruht ein Modell mit einer geringen Modellierungstiefe häufig auf vielen Vereinfachungen und Annahmen. Weiterhin besitzt es nur eine eher geringe Anzahl an Parametern. Daher erhöht sich mit steigender Modellierungstiefe auch die Anzahl an Parametern, die benötigt werden, und es steigt i. d. R. auch die Anzahl an berücksichtigten (Neben-)Effekten. Der Begriff Modellierungstiefe beschreibt hingegen nicht die Genauigkeit eines Modells. Wäre dies der Fall, so würde sich die Modellierungstiefe eines Modells während einer Parameteridentifikation oder Validierung ändern. Allerdings besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Modellierungstiefe und der Modellgenauigkeit.

Modellgenauigkeit: *Die Genauigkeit eines Modells bzw. die Modellgenauigkeit beschreibt die Abweichung zwischen den Ergebnissen eines Experimentes mit einem Modell und den Ergebnissen eines Experimentes in der Realität. Sie ist so-*

wohl abhängig von der Modellbildung als auch von der Simulationstechnik. Es ist stets eine Referenz erforderlich, um die Modellgenauigkeit bestimmen zu können.

Fehlerquellen der Modellbildung mit negativem Einfluss auf die Modellgenauigkeit sind laut JANSCHKE z. B. Einschränkungen, Systemabgrenzungen, Vereinfachungen und Parameterunsicherheiten. Abweichungen, die durch die Simulation des Modells entstehen können, sind z. B. Werkzeugeinschränkungen, Algorithmenfehler, Zahlendarstellung und Rechengenauigkeit (vgl. [Jan10]). Wie genau ein Modell bzw. eine Simulation sein muss, hängt vom Anwendungsfall des Modells ab und somit von den Modellierungszielen.

Die Erhöhung der Modellierungstiefe ist beispielsweise erforderlich, falls ein Effekt mit höherer Modellgenauigkeit beschrieben werden soll. Ein detailliertes Modell besitzt i. d. R. eine höhere Modellgenauigkeit, aber nicht jedes genaue Modell muss zwangsläufig eine hohe Modellierungstiefe haben. Ob ein Modell ausreichend genau ist bzw. die Simulationsergebnisse, hängt vom Anwendungsfall ab, der sich wiederum in den definierten Modellierungszielen widerspiegelt.

Wenn eine geeignete Modellierungstiefe gefunden wurde und der Leitsatz der Modellbildung nicht eingehalten wird, sondern eine weitere Erhöhung der Modellierungstiefe erfolgt (also genauer als nötig), können im Zusammenhang mit den definierten Modellierungszielen zwei Effekte auftreten:

- Der Erfüllungsgrad des Modellierungsziels bleibt annähernd konstant, jedoch steigen der Aufwand und die Kosten aufgrund der detaillierteren Modellierung (siehe Bild 4-1, Variante 1).
- Der Erfüllungsgrad des Modellierungsziels kann sogar abnehmen (z. B. Forderung nach Echtzeitfähigkeit), und das Modell kann zur Untersuchung der gewünschten Aspekte nicht mehr herangezogen werden (Variante 2).

In Bild 4-1 sind die beiden Effekte graphisch dargestellt. Die Wahl der Modellierungstiefe spielt somit eine entscheidende Rolle in der Modellbildung und innerhalb des gesamten modellbasierten Entwurfs. Es besteht die Notwendigkeit der Entwicklung einer Methode, welche die Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme systematisiert und die Wahl erleichtern soll. Der Entwickler soll mithilfe der Methode unterstützt werden, ein System nicht so genau wie möglich abzubilden, sondern nur so genau, wie es zur Zielerfüllung erforderlich ist.

Die zweite wichtige Eigenschaft von Dynamikmodellen ist ihre Komplexität.

Modellkomplexität: *Die Modellkomplexität (kurz: Komplexität) eines Modells ist eine strukturelle Eigenschaft. Sie gibt Auskunft über die Anzahl an Systemelementen, Wechselwirkungen und Zuständen.*

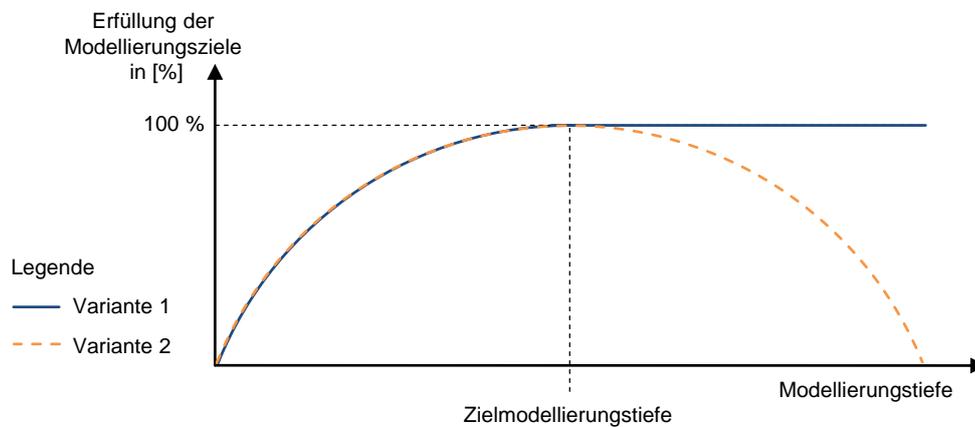


Bild 4-1: Modellierungsziele vs. Modellierungstiefe (in Anlehnung an [Rob08, S. 287] und [CBP00, S. 451])

Ein Modell mit hoher Komplexität besteht aus einer großen Anzahl an Elementen und Wechselwirkungen. Im Gegensatz dazu besteht ein Modell mit einer geringen Komplexität aus wenigen Elementen. Mithilfe der Modellkomplexität lässt sich keine direkte Aussage über die Modellierungstiefe und die Modellgenauigkeit ableiten. Jedoch besteht ein detailliertes Modell i. d. R. aus einer Vielzahl an Elementen und Wechselwirkungen. Eine hohe Modellkomplexität ist daher lediglich ein Indiz für eine hohe Modellierungstiefe.

Um ein effizientes Modell zu erhalten, das die Modellierungsziele ausreichend genau erfüllt, sollte man bei der Modellierung Folgendes beachten: Die Modellierungstiefe und die Komplexität sind so zu wählen, dass die notwendigen Modellierungsziele erfüllt werden, und sie sollten so gering wie möglich gehalten werden.

Zum Vergleich zweier Modelle mit unterschiedlicher Modellierungstiefe oder Komplexität sind Beschreibungen wie „hoch“ und „gering“ ungeeignet. Auch bei der Suche nach einem geeigneten Modell aus einem Wissensspeicher sind diese Beschreibungen der Modelleigenschaften nicht sehr hilfreich. Deshalb wird in diesem Kapitel ein Ansatz zur Quantifizierung der Modellierungstiefe und der Komplexität vorgestellt. Zunächst folgt jedoch das Vorgehen bei Modellbildung und Modellanalyse.

4.2 Vorgehen bei der Modellbildung und der Modellanalyse

Modellbildung und Modellanalyse gliedern sich in vier Phasen und Meilensteine. Um bestimmte Resultate zu erreichen, sind verschiedene Aufgaben zu lösen und Tätigkeiten auszuführen. Die Vorgehensweise bei Modellbildung und -analyse ist in Bild 4-2 dargestellt.

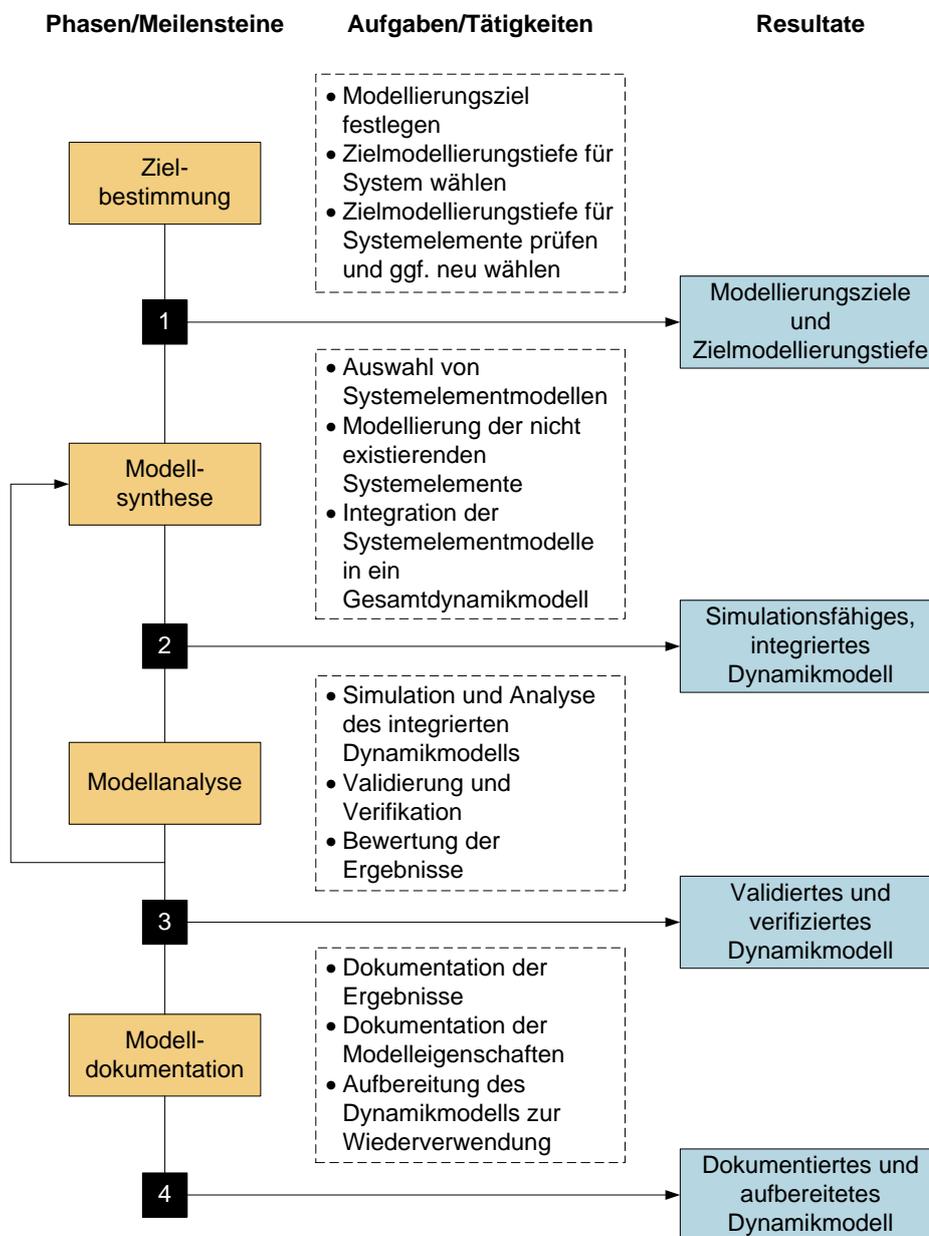


Bild 4-2: Vorgehen bei Modellbildung und -analyse von Dynamikmodellen

Zunächst erfolgt die Zielbestimmung. In dieser Phase müssen Modellierungsziele festgelegt werden: Zu welchem Zweck soll das Modell eines Systems eingesetzt werden, und welche Erkenntnisse sollen aus der Analyse gezogen werden können? Anhand der Festlegung der Modellierungsziele wird eine Zielmodellierungstiefe für das System gewählt. Wie genau die Zielmodellierungstiefe gewählt werden

kann, wird in Abschnitt 4.4 gezeigt. Dieser Schritt dient zur groben Abschätzung der Modellierungstiefe auf der Systemebene. Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung der Modellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente mit der zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelne Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Wichtig ist, dass die zur Untersuchung des festgelegten Modellierungsziels entscheidenden Systemelemente ausreichend abgebildet werden. Die einzelnen Schritte von der Festlegung der Modellierungsziele bis hin zur Wahl der Modellierungstiefe werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläutert. Das Ergebnis der Phase sind festgelegte Modellierungsziele, eine Zielmodellierungstiefe für das System sowie eine Modellierungstiefe für die einzelnen Systemelemente.

In der Modellsynthese erfolgt die Auswahl von Systemelementmodellen in der geforderten Modellierungstiefe. Wie bereits in Kapitel 3 gezeigt, sollte hierzu ein Wissensspeicher existieren. In diesem Wissensspeicher sind bereits entwickelte Modelle von Systemen und Systemelementen zur Wiederverwendung abgelegt und dokumentiert (vgl. auch [GTS14], [Oes18]). Für den Fall, dass noch kein Modell eines Systemelementes in der gewünschten Modellierungstiefe existiert, muss ein geeignetes Modell erstellt werden. Hierzu kann die in Abschnitt 2.3 (Bild 2-5, S. 23) vorgestellte Vorgehensweise bei der Erstellung von Dynamikmodellen herangezogen werden. Abschließend werden die jeweiligen Systemelementmodelle in ein Gesamtdynamikmodell integriert. Das Ergebnis der Phase ist ein simulationsfähiges und integriertes Dynamikmodell, das die geforderten Effekte in einer geeigneten Modellierungstiefe abbildet.

Die Modellanalyse ist eng verzahnt mit der Modellsynthese. Beide Phasen enthalten häufige Iterationen. In der Modellanalyse erfolgen die Simulation des Dynamikmodells sowie die Analyse der Simulationsergebnisse. Das Dynamikmodell muss i. d. R. verifiziert und validiert werden. Abschließend werden die Ergebnisse bewertet. Das Resultat dieser Phase sind ein validiertes und verifiziertes Modell sowie bewertbare Ergebnisse.

Sind die Analyseergebnisse zufriedenstellend, werden in der letzten Phase die Ergebnisse und die Modelleigenschaften dokumentiert, etwa die Modellierungstiefe, die Modellkomplexität, Parameterwerte etc. Das sind wichtige Schritte für eine spätere Interpretation der Ergebnisse und für die Möglichkeit, Modelle auch später noch nachzuvollziehen und zu nutzen. Bietet sich ein Modell zur Wiederverwendung in Folgeprojekten an, lohnt sich eine Aufbereitung dieser Modelle. Das Modell kann somit in der Modellsynthesephase aus dem Wissensspeicher ausgewählt werden. Ergebnis der Phase ist ein dokumentiertes und aufbereitetes Dynamikmodell.

4.3 Modellierungsziele im Entwurfsprozess

Es existieren viele Gründe, die den Entwickler dazu bewegen, sich für die Erstellung eines Modells zu entscheiden. In diesem Abschnitt wird eine kleine Auswahl an häufig verwendeten Zielen für die Modellierung vorgestellt. Auf Basis der Modellierungsziele werden im anschließenden Abschnitt vier Ebenen der Modellierungstiefe definiert.

In [HL11, S. 75 ff.] werden einige Beispiele von Modellierungszielen in der mathematischen Modellierung aufgeführt, die das breite Spektrum deutlich machen sollen:

- Entscheidungsfindung: Ein mathematisches Modell dient der Auswahl einer geeigneten Lösungsmöglichkeit aus einem Lösungsraum.
- Prognose, Vorhersage: Um das zukünftige Verhalten eines Systems aus den gegebenen Informationen zu berechnen, muss man in einigen Fällen auf ein Modell zurückgreifen. Oft ist es nicht möglich, Zustände mithilfe von Sensoren zu erfassen. Hierzu werden beispielsweise Zustandsschätzer eingesetzt, die auf Basis eines mathematischen Modells das zukünftige Verhalten berechnen/schätzen.
- Optimierung: Einsatz von Modellen, um ein System in Bezug auf festgelegte Kriterien zu optimieren.
- Steuerung, Kontrolle, Regelung: Regelungen und Steuerungen beruhen in der Regel auf mathematischen Modellen.
- Virtueller Prototyp: Bei der Entwicklung werden heutzutage möglichst viele Planungsschritte von Produkten mithilfe computergestützter Modelle durchgeführt, bevor aufwändige Versuche an realen Prototypen erfolgen.
- Mustererkennung: Computergestützte Mustererkennung ist in zahlreichen Anwendungen sehr wichtig, z. B. bei der Prüfung von Geldnoten auf ihre Echtheit.
- Konzeptionelles Verständnis: Ziel ist es, entscheidende Eigenschaften und Wirkzusammenhänge eines Systems oder den Einfluss der Größe gewisser Parameter auf das Verhalten des Systems besser verstehen zu können. Hierzu werden relativ einfach zu überblickende Modelle eingesetzt, die das qualitative Systemverhalten richtig abbilden. Es wird ggf. bewusst auf eine genaue quantitative Richtigkeit der Modellvorhersagen verzichtet.
- Validierung oder Falsifizierung: Mathematische Modelle können auch zur Bestätigung oder Widerlegung einer naturwissenschaftlichen Hypothese eingesetzt werden. Die Simulationsergebnisse können anschließend mit Messungen an realen Systemen oder Prüfständen verglichen werden und führen

entweder zu einer Bestätigung oder Falsifizierung des Modells und entsprechend der Ausgangshypothese.

- Weitere Modellierungsziele sind die Einsparung von Entwicklungskosten und -zeit, eine frühzeitige Entscheidungsfindung sowie eine frühe Absicherung von Eigenschaften und die frühe Auslegung des Systemkonzeptes. Auch die Verwendung eines Modells im Rahmen einer modellgestützten Systemintegration, etwa einer HiL-Simulation, gehört zu den Modellierungszielen.

Diese Modellierungsziele der mathematischen Modellierung lassen sich direkt auf die Dynamikmodelle im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme übertragen. In Kapitel 3 wurden bereits einige Modellierungsziele in den jeweiligen Entwurfsphasen mechatronischer Systeme gezeigt, die mit den aufgeführten Zielen übereinstimmen. Dabei lässt sich ein Unterschied zwischen den Modellierungszielen in der Systemintegration und im anschließenden disziplinspezifischen Entwurf feststellen. Die Dynamikmodelle der jeweiligen Phase können daher in Bezug auf die Modellierungstiefe sehr stark abweichen. Während beispielsweise in der Systemkonzipierung physikalische Effekte eher idealisiert angenommen werden, reicht eine idealisierte Betrachtung im disziplinspezifischen Entwurf häufig nicht aus, um die geforderten Modellierungsziele zu erreichen. Im Folgenden werden die Modellierungsziele von Dynamikmodellen in den jeweiligen Entwurfsphasen zusammengefasst.

In der Systemkonzipierung werden u. a. Dynamikmodelle zur Erreichung folgender Modellierungsziele eingesetzt:

- Prinzipieller Funktionsnachweis unter idealisierten Randbedingungen,
- Grobdimensionierung: Abschätzung von Parametergrößen, Sicherheitsreserven, Leistungsgrenzen, Aufdeckung von Schwachstellen,
- Erarbeitung erster Regelungs- und Steuerungskonzepte: Zustände, auf die man Einfluss nehmen kann,
- Bewertungskriterium zur Auswahl einer geeigneten Lösung,
- Konkretisierung von Anforderungen für die Auswahl von Lösungselementen im disziplinspezifischen Entwurf,
- Vorgaben für den disziplinspezifischen Entwurf: Welche Elemente, Wechselwirkungen oder Zusammenhänge müssen genauer betrachtet werden?

Im disziplinspezifischen Entwurf und in der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik werden häufig die folgenden Modellierungsziele verfolgt:

- Detaillierter Funktionsnachweis (z. B. kritische Funktionen),
- Feindimensionierung der Systemelemente,

- Detaillierte Reglerauslegung,
- Untersuchung von Materialeigenschaften,
- Nachweis von Sicherheitsgrenzen,
- Entwicklung und Überprüfung von Notfallstrategien,
- Identifikation und Untersuchung von Störgrößen,
- Optimierung: zielgerichtete Verbesserung, z. B. Reduzierung von Bauteilkosten und Einsparung von Ressourcen, Material und Gewicht,
- Modellbasierte Integration der entwickelten Teilsysteme zum Test des Zusammenwirkens von Systemkomponenten,
- Echtzeitfähigkeit der Modelle, damit sie in der modellgestützten Systemintegration im Rahmen von HiL-Simulationen eingesetzt werden können.

Die Auflistung der Modellierungsziele zeigt, wie breit das Spektrum des Einsatzes von Dynamikmodellen in der Entwicklung ist. Es zeigt ebenfalls, dass je nach Modellierungsziel unterschiedliche Anforderungen an ein Dynamikmodell gestellt werden und damit die Modellierungstiefe sehr stark variieren kann. Die genannten Modellierungsziele stellen nur eine geringe Auswahl an möglichen Zielen im Entwurfsprozess dar. Sie sollen im folgenden Abschnitt zur Skalierung der Modellierungstiefe mithilfe von Ebenen genutzt werden.

4.4 Die vier Ebenen der Modellierungstiefe

Die Modellierungstiefe beschreibt, wie detailliert Effekte in einem Modell abgebildet sind. Im Wesentlichen existieren jedoch nur Adjektive wie „hoch“ oder „gering“, um den Grad dieser Modelleigenschaft zu spezifizieren und zu quantifizieren. Solche Angaben sind nicht sehr aussagekräftig und für den Entwickler nicht hilfreich. Damit die Modellierungstiefe genauer spezifiziert werden kann, werden in diesem Abschnitt vier Ebenen eingeführt. Mithilfe der vier Ebenen soll es möglich sein, allein durch die Angabe der Ebene bereits Rückschlüsse auf den Einsatzbereich ziehen zu können und ein besseres Gefühl für den Grad der Abbildung von physikalischen Effekten zu erhalten. Darüber hinaus wird für jede Ebene der Modellierungstiefe eine Handlungsempfehlung bzgl. der Wahl der mathematischen Modellklasse zur Beschreibung der Effekte gegeben (vgl. Abschnitt 2.3.2, S. 28). Die Ebenen heißen mit steigender Modellierungstiefe: *ideale Funktion*, *prinzipielle Machbarkeit*, *systemspezifisches Verhalten* und *Bauteiloptimierung*. Sie sind aus dem Entwurfsprozess mechatronischer Systeme abgeleitet (siehe auch [LSB⁺12],[SLB⁺13],[LOT14] und [LLT⁺15b]). Im Folgenden werden die vier Ebenen der Modellierungstiefe definiert.

Ebene 1: Ideale Funktion

Die Modelle der ersten Ebene besitzen die geringste Modellierungstiefe und somit den höchsten Abstraktionsgrad. Die zu untersuchenden Funktionen des Systems werden im Modell logisch abgebildet, und nur die wichtigsten Zustände werden modelliert. Das zeitkontinuierliche Systemverhalten zwischen den Zuständen wird nicht berücksichtigt, sondern die Zustandsänderungen sind wertdiskret.

Mithilfe dieser Modelle können Aktoren, Sensoren oder Getriebe ideal dargestellt werden, wenn beispielsweise das dynamische Verhalten vernachlässigt werden kann. Zu den Modellen zur Beschreibung der idealen Funktion gehören ereignisdiskrete Zustandsautomaten¹ oder Flussdiagramme.

Neben den ereignisdiskreten Zustandsautomaten eignet sich beispielsweise auch die abschnittsweise definierte Heaviside-Funktion (auch Sprungfunktion) [KS15, S. 589 ff.] mit

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & \text{für } t \leq 0 \\ 1, & \text{für } t > 0 \end{cases}. \quad (4-1)$$

Weiterhin können algebraische Gleichungen zur Beschreibung der idealen Funktion verwendet werden, etwa zur Modellierung von Übersetzungsverhältnissen (Hebelgesetz, Getriebeübersetzung). Auch das aus der Regelungstechnik bekannte Proportionalglied (P-Glied) gehört hierzu. Die Funktionalbeziehung zwischen dem Eingang $u(t)$ und dem Ausgang $y(t)$ lautet bei einem P-Glied [Föl08]:

$$y(t) = K \cdot u(t), \quad K > 0. \quad (4-2)$$

Ebene 2: Prinzipielle Machbarkeit

In der Ebene der prinzipiellen Machbarkeit bilden die Modelle auch das Zeitverhalten idealisiert ab und können auf Basis von physikalischen Gesetzen modelliert werden. Nebeneffekte werden vernachlässigt oder auf eine einfache Art und Weise berücksichtigt. Die Modelle beschreiben Lösungsmuster, die durch erste idealisierte dynamische Verhaltensmodelle repräsentiert werden. Modelle dieser Ebene dienen einem ersten Funktionsnachweis unter Betrachtung der Dynamik des Systems. Zur Beschreibung von Modellen der prinzipiellen Machbarkeit werden u. a. algebraische Gleichungen, lineare, gewöhnliche Differentialgleichungen (ODE) und differential-algebraische Gleichungssysteme (DAE) mit einer relativ

¹Ein Zustandsautomat (engl. state machine, statechart) beschreibt das Verhalten einer Komponente mithilfe von Zuständen, Zustandsübergängen und Aktionen [HM08, S. 95 ff.]. Die graphische Darstellung wird als Zustandsdiagramm bezeichnet.

geringen Anzahl an Parametern verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.2, S. 28). Hierzu eignen sich die Bauteilgleichungen der in Abschnitt 2.3 vorgestellten reduzierten Lösungselemente. Zu den reduzierten Lösungselementen zählen beispielsweise die Energiespeicher mechanische Masse, hydraulische und elektrische Induktivität sowie die Energiespeicher mechanische Feder, hydraulische und elektrische Kapazität. Des Weiteren gehören die Energieverbraucher mechanischer Dämpfer, Drossel (hydr. Widerstand) und der elektrische Widerstand zu den reduzierten Lösungselementen. Aus der Kombination dieser Elemente werden u. a. elektrische Netzwerke und Masse-Feder-Dämpfer-Systeme erstellt. Zur Beschreibung mechanischer Vorgänge können im Rahmen der prinzipiellen Machbarkeit auch erste Mehrkörpersysteme eingesetzt werden.

Weiterhin sind auch die aus der Regelungstechnik stammenden Verzögerungsglieder, vorwiegend 1. und 2. Ordnung, geeignete Mittel zur Beschreibung der prinzipiellen Machbarkeit. Hierzu gehört das Verzögerungsglied 1. Ordnung (auch PT1-Glied genannt), das durch die Differentialgleichung

$$T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t), \text{ mit } K, T > 0, \quad (4-3)$$

definiert ist. Hierbei bezeichnet K den Verstärkungsfaktor und T die Zeitkonstante [Föl08]. Es wird häufig zur Beschreibung von RC-Gliedern in der Elektrotechnik eingesetzt. Das Verzögerungsglied 2. Ordnung (PT2-Glied) ist durch die Differentialgleichung

$$T^2 \cdot \ddot{y}(t) + 2 \cdot D \cdot T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t), \text{ mit } K, T, D > 0, \quad (4-4)$$

definiert. Hierbei bezeichnet K ebenfalls den Verstärkungsfaktor, T die Zeitkonstante und D die dimensionslose Dämpfung [Föl08]. Ein Beispiel für ein PT2-Glied ist eine Masse, die mit einem parallelen Feder-Dämpferpaar verbunden ist.

Ebene 3: Systemspezifisches Verhalten

Die Modelle dieser Ebene basieren auf physikalischen Effekten und beinhalten ein detaillierteres dynamisches Verhalten der produktspezifischen Eigenschaften als Modelle der Ebene 2. Nebeneffekte werden an dieser Stelle bei der Modellierung mitberücksichtigt. Beispiele für Nebeneffekte sind Reibung, Wärmeverluste etc. Die Lösungsmustermodelle aus Ebene 2 werden durch Lösungselementmodelle ersetzt. Die Modelle dieser Ebene eignen sich für eine detaillierte Reglerauslegung oder zur Verifikation und Analyse des systemspezifischen dynamischen Verhaltens.

Zur Beschreibung des systemspezifischen Verhaltens werden im Unterschied zu Modellen der zweiten Ebene der Modellierungstiefe auch nichtlineare ODEs und

DAEs eingesetzt. Beispiele für Nichtlinearitäten sind Hysterese, Totzone, Begrenzungen etc. Weitere nichtlineare Effekte sind in [Föl14] und [MPS08] aufgeführt. Die Modelle dieser Ebene besitzen häufig auch eine höhere Anzahl an Parametern als Modelle der prinzipiellen Machbarkeit.

Ein Beispiel für ein Modell dieser Ebene ist die nichtlineare, algebraische Gleichung zur Berechnung des Reibmoments in einem Elektromotor mit der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ [Nol09][S. 63]:

$$M_R(t) = d_{reib} \cdot \dot{\varphi}(t) + (M_{tr} + M_{str} \cdot e^{-|K \cdot \dot{\varphi}(t)|}) \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}(t)). \quad (4-5)$$

Ebene 4: Bauteiloptimierung

Die Modelle der Bauteiloptimierung beschreiben physikalische Effekte und besitzen die höchste Modellierungstiefe. Diese werden häufig aber nicht ausschließlich zur Optimierung verwendet. Alle wichtigen Effekte und Nebeneffekte werden sehr detailliert abgebildet. Es handelt sich um fachdisziplinspezifische Modelle mit einer Vielzahl an Parametern. Sie eignen sich zur Optimierung von Systemen oder Systemelementen bzgl. der Reduzierung von Kosten und der Einsparung von Ressourcen. Sie werden häufig zur Analyse von Teilsystemen oder Systemelementen eingesetzt und nicht zur Untersuchung von großen Gesamtsystemen, da die Simulation solcher Modelle eine sehr hohe Rechenkapazität in Anspruch nimmt. Darüber hinaus können sie zur Erstellung, zur Analyse und zur Validierung von Modellen mit einer geringeren Modellierungstiefe eingesetzt werden. Die Modelle eignen sich auch zur Erzeugung von Kennlinien², die beispielsweise genutzt werden, um die Rechenzeit bei der Simulation zu verringern.

In dieser Ebene werden u. a. partielle Differentialgleichungen (PDE) zur Beschreibung der Effekte eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.3.2, S. 28). Es existieren verschiedene PDEs in den einzelnen Disziplinen. Die Maxwell-Gleichungen bilden den Zusammenhang von elektrischen und magnetischen Feldern mit elektrischen Ladungen und elektrischem Strom ab. In der Fluidodynamik wird mithilfe der Navier-Stokes-Gleichungen ein instationärer Fluss eines inkompressiblen, viskosen Fluids beschrieben. Weiterhin findet in dieser Ebene der Modellierungstiefe die Finite-Elemente-Methode Verwendung. FE-Modelle werden in der Elastodynamik zur Beschreibung von Bauteilschwingungen oder zur Beschreibung instationärer Wärmeleitungen verwendet. Außerdem werden mithilfe von FE-Modellen Spannungsverläufe und lokale Verschiebungen in Bauteilen analysiert.

²Kennlinien können einen Effekt sehr genau abbilden, jedoch fehlt i. d. R. der physikalische Zusammenhang.

Einordnung in den Entwurfsprozess

Die vier Ebenen sind aus dem Entwurfsprozess mechatronischer Systeme abgeleitet, wie bereits erwähnt. In Bild 4-3 werden die vier Ebenen der Modellierungstiefe den jeweiligen Phasen im Entwurfsprozess zugeordnet. Die Systemkonzipierung enthält die Ebenen ideale Funktion und prinzipielle Machbarkeit (vgl. Abschnitt 3.1, S. 64). In dieser Entwurfsphase sollten nach Möglichkeit Modelle der ersten beiden Ebenen eingesetzt werden. Die Modelle in der Systemkonzipierung dienen u. a. zum prinzipiellen Funktionsnachweis unter idealisierten Randbedingungen, zur Erarbeitung erster Regelungs- und Steuerungskonzepte und zur Grobdimensionierung des zu entwickelnden Systems. Sie dienen außerdem zur Ableitung von Anforderungen an die einzelnen Komponenten, die im disziplinspezifischen Entwurf ausgearbeitet werden. Hierzu reichen Modelle der Ebenen 1 und 2 aus.

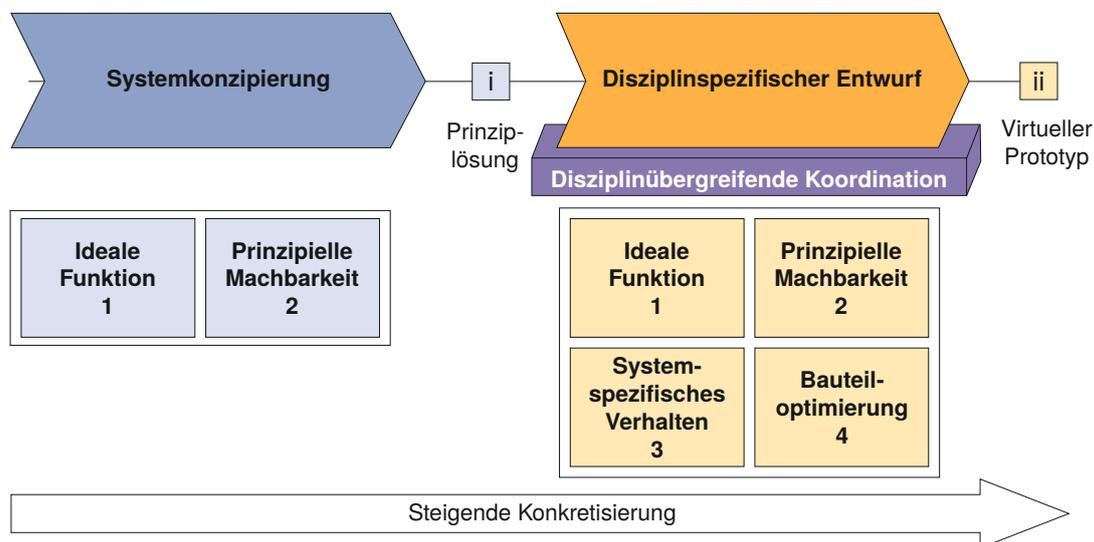


Bild 4-3: Ebenen der Modellierungstiefe von Dynamikmodellen im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme

Die Ebenen systemspezifisches Verhalten und Bauteiloptimierung werden vornehmlich im anschließenden disziplinspezifischen Entwurf eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.2, S. 68). In dieser Entwurfsphase werden Modelle zum detaillierten Funktionsnachweis kritischer Funktionen, zur Feindimensionierung des Systems oder von Systemelementen und zur Optimierung, wie z. B. zur Reduzierung von Bauteilkosten und Einsparung von Ressourcen, eingesetzt. Häufig werden nur einzelne Systemelemente im disziplinspezifischen Entwurf sehr detailliert abgebildet. Andere Systemelemente, die zwar einen Einfluss haben, jedoch nicht detaillierter modelliert werden müssen, können in einer niedrigeren Ebene abgebildet werden. Häufig sind die Parameter genauer bekannt, da konkrete Lösungselemente eines

Herstellers ausgewählt werden und somit genauere Werte aus Datenblättern zur Verfügung stehen. Deshalb können auch Modelle der Ebenen 1 und 2 im disziplinspezifischen Entwurf eingesetzt werden. Sie unterscheiden sich ggf. von den Modellen in der Systemkonzipierung durch eine höhere Konkretisierung, etwa genauere Parameter. Modelle der Ebenen 3 und 4 werden vornehmlich in dieser Phase des Entwurfsprozesses eingesetzt.

In der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik (vgl. Abschnitt 3.3, S. 71), die parallel zum disziplinspezifischen Entwurf erfolgt, werden vorzugsweise Modelle aus den ersten drei Ebenen eingesetzt. Sie dienen beispielsweise zur ganzheitlichen Modellvalidierung oder zur Systemanalyse und zur Systembewertung. Eine ganzheitliche Systemanalyse mit Modellen der Ebene 4 ist nicht zielführend, da die Simulation solcher Modelle eine sehr hohe Rechenkapazität benötigt. Grundsätzlich auszuschließen sind die Modelle der Ebene 4 aber nicht. Bei der modellgestützten Systemintegration (vgl. Abschnitt 3.4, S. 74) werden häufig abstraktere Modelle gefordert. Werden zur Eigenschaftsabsicherung HiL-Prüfstände eingesetzt, müssen die Modelle echtzeitfähig sein. Diese Anforderung kann meist nur mit Modellen der ersten beiden Ebenen sichergestellt werden. Bei Modellen mit einer höheren Ebene der Modellierungstiefe ist eine Echtzeitfähigkeit i. d. R. nicht mehr gegeben.

Gegenüber den Modellen der Systemkonzipierung sind diejenigen, die in der modellgestützten Systemintegration eingesetzt werden, wesentlich konkreter, da die Erkenntnisse aus dem disziplinspezifischen Entwurf bereits eingeflossen sind. In diesem Zusammenhang bezieht sich die Konkretisierung auf das gesteigerte Systemwissen sowie den erhöhten Reifegrad der Systemelemente, die in einem Modell abgebildet sind. In der Systemkonzipierung werden Modelle von Lösungsmustern eingesetzt, die eine abstrakte Darstellung einer Klasse von Lösungselementen repräsentieren. Im Gegensatz dazu werden in der modellgestützten Systemintegration vereinfachte Modelle der ausgewählten Lösungselemente eingesetzt (siehe hierzu auch die Definition zu Lösungsmustern und die Definition zu Lösungselementen in Abschnitt 2.1, S. 12).

Vier Ebenen der Modellierungstiefe am Beispiel eines Elektromotors

Zur Veranschaulichung der definierten Ebenen der Modellierungstiefe wird an dieser Stelle ein Aktor in Form eines Elektromotors betrachtet, der über eine Kopplung eine Last antreibt. Bei dem Motor soll es sich um einen fremderregten Gleichstrommotor handeln. Im Rahmen dieses Beispiels werden der Gleichstrommotor bzw. Teile des Motors in verschiedenen Ebenen der Modellierungstiefe dargestellt. Zunächst sind in Bild 4-4 schematisch der Gleichstrommotor, eine Kopplung (z. B. in Form eines Getriebes oder einer Kupplung) und eine Last,

die vom Motor angetrieben wird, dargestellt. Je nach Modellierungsziel und Detaillierungsgrad müssen und können verschiedene Effekte berücksichtigt werden, wie z. B. die Schallentwicklung $p(t)$, die übertragene Wärme $Q(t)$ oder die auf das Fundament wirkende Belastung z. B. in Form einer Kraft $F(t)$. In Abhängigkeit der Systemgrenzen ergeben sich die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems. Eingangsgrößen könnten eine Spannung $U(t)$ oder ein Lastmoment $M_L(t)$ sein. Ausgangsgrößen sind z. B. das Motormoment $M_M(t)$, die Winkelposition $\varphi_M(t)$ oder die Winkelgeschwindigkeit $\omega_M(t)$.

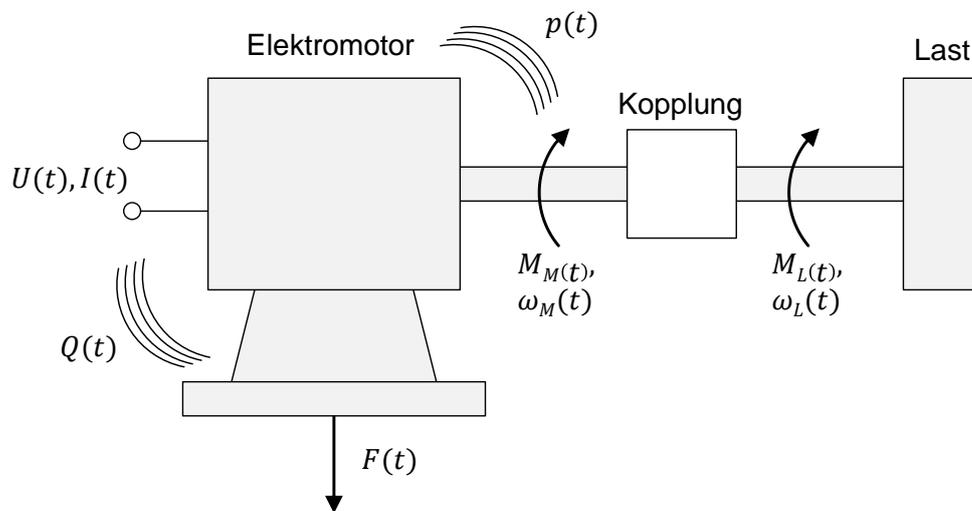


Bild 4-4: Schematische Darstellung eines Elektromotors (in Anlehnung an [Trä15])

Im Folgenden werden der Gleichstrommotor bzw. Teile des Motors in allen vier Ebenen der Modellierungstiefe beschrieben. Die zugehörigen Modellgleichungen, die getroffenen Annahmen und die physikalischen Ersatzbilder sind allgemein bekannt (vgl. [Nol09], [Sch07]).

Ebene 1 – Ideale Funktion: Der Gleichstrommotor wird in der ersten Ebene als ideales Stellglied abgebildet. Das Modell besitzt zwei Betriebsarten: „Motor an“ und „Motor aus“. Es liefert das benötigte Sollmoment M_{soll} . Der Gleichstrommotor wird in Abhängigkeit des Zustands x mithilfe der Heaviside-Funktion

$$M_M(x) = \begin{cases} 0, & \text{für } x = 0 \\ M_{soll}, & \text{für } x = 1, \text{ mit } M_{soll} = const. \end{cases} \quad (4-6)$$

abgebildet. Die Übergänge zwischen den beiden Zuständen sowie andere Effekte, etwa übertragende Wärme und Schallentwicklung, werden vernachlässigt.

Eine weitere Möglichkeit ist die Modellierung des Motors in einem Zustandsautomaten mit den beiden Zuständen „Motor an“ und „Motor aus“. Die Umschaltung zwischen den beiden Zuständen wird durch ein Ereignis ausgelöst.

Ebene 2 – Prinzipielle Machbarkeit: Der fremderregte Gleichstrommotor wird in der zweiten Ebene detaillierter abgebildet. Hierzu stehen u. a. lineare ODEs oder algebraische Gleichungen zur Auswahl. Das System besteht, wie in Bild 4-5 dargestellt, aus einem elektrischen Teilsystem (dem Ankerkreis), einer elektromechanischen Kopplung und einem mechanischen Teilsystem. Bei der Kopplung der Teilsysteme handelt es sich um eine gyratorische Kopplung (vgl. [TSG16] und [PP17]). Hier werden Flussgrößen mit Potentialgrößen verkoppelt³. Der Erregerkreis wird an dieser Stelle vernachlässigt. Der magnetische Fluss wird i. d. R. durch eine nichtlineare Funktion, die vom Erregerstrom abhängig ist, beschrieben [Leo00, S. 52]:

$$\Psi(t) = f(I_E, t). \quad (4-7)$$

In der Ebene der prinzipiellen Machbarkeit wird der magnetische Fluss als konstant angenommen.

Zur Modellierung der Teilsysteme werden reduzierte Lösungselemente (siehe Abschnitt 2.3, S. 22) eingesetzt, wie z. B. ein Widerstand, eine Induktivität oder eine Masse. Die Eingangsgrößen sind die Ankerspannung U_A und das Lastmoment M_L . Eine Ausgangsgröße könnte beispielsweise die Winkelgeschwindigkeit ω_M sein.

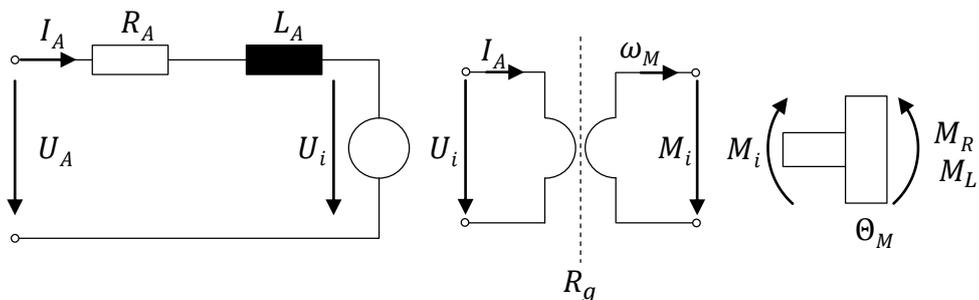


Bild 4-5: Physikalisches Ersatzschaltbild des Motors (vgl. auch [TSG16] und [Nol09])

Das mechanische Teilsystem besteht aus der Massenträgheit Θ_M des Rotors (siehe Bild 4-5). Die Reibung in den Lagern des Elektromotors sowie entstehende

³Im Gegensatz zur gyratorischen Kopplung werden bei der transformatorischen Kopplung Flussgrößen mit Flussgrößen und Potentialgrößen mit Potentialgrößen verkoppelt ([TSG16] und [PP17]). Eine Gegenüberstellung findet man auch in [BPW09, S. 251].

Luftverwirbelungen im Luftspalt werden im linearen, geschwindigkeitsabhängigen Reibmoment M_R vereinfacht zusammengefasst:

$$M_R = d_{reib} \cdot \omega_M. \quad (4-8)$$

Durch die elektromechanische Kopplung entsteht ein induziertes Motormoment M_i , das sich aus einer motorabhängigen Konstante K_M , dem magnetischen Fluss Ψ und dem Ankerstrom I_A berechnet:

$$M_i = K_M \cdot \Psi \cdot I_A, \text{ mit } \Psi = const. \quad (4-9)$$

Daraus ergibt sich für das mechanische Teilsystem die folgende Differentialgleichung:

$$\Theta_M \cdot \dot{\omega}_M = M_i - M_R - M_L. \quad (4-10)$$

Das elektrische Teilsystem besteht, wie in Bild 4-5 dargestellt, aus dem Ohmschen Ankerwiderstand R_A , der Ankerinduktivität L_A und der vom Rotor induzierten Spannung⁴ U_i , die der Ankerspannung entgegengesetzt wirkt:

$$U_i = K_M \cdot \Psi \cdot \omega_M. \quad (4-11)$$

Aus dem 2. KIRCHHOFFSchen Gesetz ergibt sich für das elektrische Teilsystem die folgende Gleichung:

$$U_A = U_R + U_L + U_i \quad (4-12)$$

$$= R_A \cdot I_A + L_A \cdot \dot{I}_A + K_M \cdot \Psi \cdot \omega_M, \text{ mit } \Psi = const. \quad (4-13)$$

Mithilfe der genannten Gleichungen können ein Blockschaltbild des Elektromotors erstellt und beispielsweise eine erste Regelung ausgelegt werden, um einen Nachweis für die prinzipielle Machbarkeit zu liefern. Das Blockschaltbild ist in Bild 4-6 dargestellt.

Ebene 3 – Systemspezifisches Verhalten: In der dritten Ebene müssen je nach Modellierungsziel Nebeneffekte detaillierter in einem Modell abgebildet werden, um beispielsweise einen Regler exakter auslegen zu können. Diese Nebeneffekte werden häufig mithilfe nichtlinearer Zusammenhänge beschrieben. Modelle dieser Ebene werden i. d. R. erst im disziplinspezifischen Entwurf verwendet (vgl. Bild 4-3, S. 91). Des Weiteren stehen dem Entwickler ggf. durch die Auswahl von Lösungselementen eines Herstellers präzisere Daten zum fremderregten Gleichstrommotor zur Verfügung.

⁴Die induzierte Spannung wird auch als elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet [Ise08, S. 208].

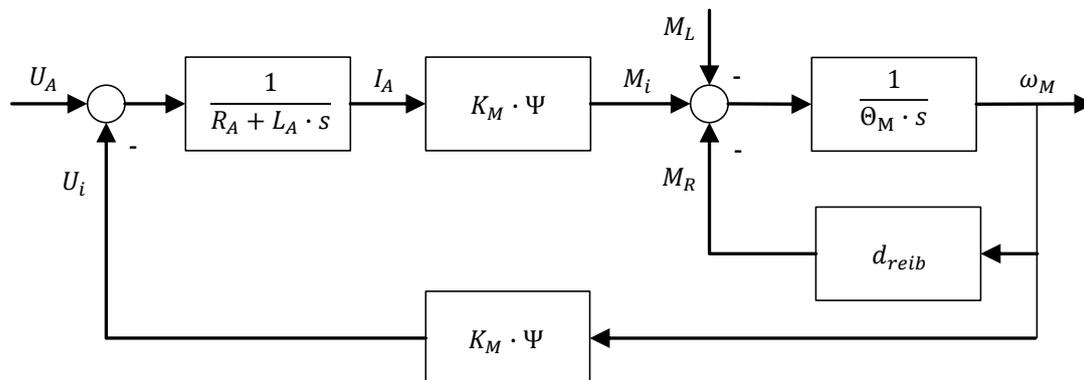


Bild 4-6: Blockschaltbild des Gleichstrommotors mit konstanten magnetischen Fluss

Im Folgenden werden exemplarisch zur Beschreibung des systemspezifischen Verhaltens des fremderregten Gleichstrommotors sowohl im elektrischen als auch im mechanischen Teilsystem Nebeneffekte detaillierter abgebildet. Hierzu gehören im mechanischen Teilsystem die detailliertere Beschreibung der Reibung und im elektrischen Teilsystem die Berücksichtigung von Sättigungseffekten bei der Magnetisierung.

Der Gleichstrommotor beruht auf dem Prinzip, dass sich ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld befindet und so Feldenergie in mechanische Energie umwandelt. Dabei ist die Magnetisierung, also die Ausrichtung sogenannter WEISSscher Bezirke in einem Werkstoff, entscheidend [KEQ⁺12]. Ist die Ausrichtung abgeschlossen, so ist der Werkstoff gesättigt. Hierdurch nimmt die magnetische Leitfähigkeit stark ab und damit auch der Wirkungsgrad des Gleichstrommotors. Dieser Effekt ist nichtlinear aufgrund der Materialeigenschaften ferromagnetischer Stoffe⁵, wie sie in Gleichstrommotoren i. d. R. eingesetzt werden (z. B. Eisen). Dadurch ist der in Gleichung 4-7 gezeigte Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss Ψ und dem Erregerstrom I_E ebenfalls nichtlinear. Dies ist ein wichtiger Zusammenhang für die weitere Betrachtung. Eine detaillierte Beschreibung der physikalischen Effekte in einem Gleichstrommotor ist in [Sch07] zu finden.

Bei einem fremderregten Gleichstrommotor gibt es zwei Betriebsarten, die als Ankerstell- und Feldschwächbereich bezeichnet werden. Im Ankerstellbereich ist die Drehwinkelgeschwindigkeit proportional zur Ankerspannung und der magnetische Fluss ist näherungsweise konstant, wie im Modell der Ebene 2 angenommen. Im Feldschwächbereich kann durch das Verringern des magnetischen Flusses bei konstanter Ankerspannung die Drehzahl über die Grenzdrehzahl des Ankerstellbereichs hinaus erhöht werden. Bild 4-7 zeigt exemplarisch die beiden Betriebsar-

⁵Grundlagen zu den Eigenschaften magnetischer Werkstoffe sind in [KEQ⁺12] zu finden.

ten mit den zugehörigen Verläufen ausgewählter Systemgrößen aufgetragen über der Drehgeschwindigkeit.

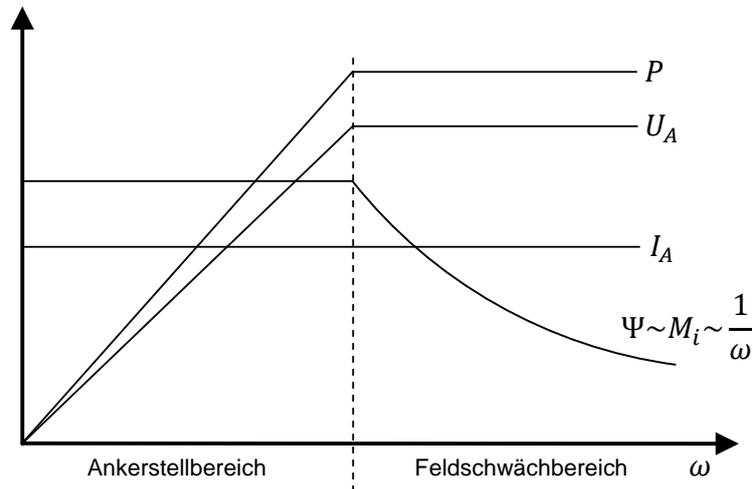


Bild 4-7: Betriebsarten eines Gleichstrommotors [Sch09, S. 255]

Ein typischer Anwendungsfall⁶ für fremderregte Gleichstrommotoren im Feldschwächbereich sind Werkzeugmaschinen bei Eilgangbewegungen, d. h. für schnelle Positionierbewegungen ohne Werkzeugeingriff. Für den Motor bedeutet dies, höhere Drehzahlen bei gleichzeitig geringerem Lastmoment zu stellen [ZW06, S. 105].

Um eine Regelung des Gleichstrommotors im Ankerstell- und Feldschwächbereich auszulegen, muss im Gegensatz zum Modell der Ebene 2 auch der Erreger- / Feldkreis modelliert werden. Das physikalische Ersatzschaltbild des Erregerkreises ist in Bild 4-8 dargestellt. Es besteht aus der Erregerspannung U_E als Eingangsgröße, einem Widerstand R_E sowie einer vom Erregerstrom I_E abhängigen Induktion L_E .

Für die Erregerspannung U_E ergibt sich die folgende Gleichungen:

$$U_E = R_E \cdot I_E + L_E(I_E) \cdot \dot{I}_E. \quad (4-14)$$

Zwischen dem magnetischen Fluss und dem Erregerstrom besteht folgender Zusammenhang (siehe [Sch07, S. 159]):

$$\Psi = L_E(I_E) \cdot I_E. \quad (4-15)$$

⁶Weitere Anwendungsfälle sind in [Ise08, S. 216] und in [Leo00, S. 58 ff.] beschrieben.

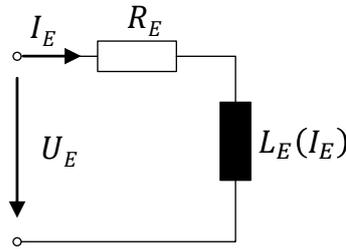


Bild 4-8: Physikalisches Ersatzschaltbild des Erregerkreises des Gleichstrommotors

Durch das Einsetzen der Gleichung 4-15 in die Gleichung 4-14 kann die Erregerspannung in Abhängigkeit der Ableitung des magnetischen Flusses dargestellt werden:

$$U_E = R_E \cdot I_E + \dot{\Psi}. \quad (4-16)$$

Der magnetische Fluss wird, wie in Gleichung 4-7 angegeben, durch eine Funktion, die vom Erregerstrom abhängig ist, beschrieben. Bildet man die inverse Funktion, so erhält man den folgenden Zusammenhang zwischen Erregerstrom und magnetischem Fluss. Diese Funktion wird auch als inverse Magnetisierungskennlinie bezeichnet [Leo00, S. 53]:

$$I_E(t) = f^{-1}(\Psi, t). \quad (4-17)$$

Die inverse Magnetisierungskennlinie wird mithilfe eines nichtlinearen algebraischen Funktionsblocks modelliert [Leo00, S. 54]. Aus den Gleichungen 4-16 und 4-17 entsteht das in Bild 4-9 dargestellte Blockschaltbild des Erregerkreises mit der Erregerspannung als Eingangs- und dem magnetischen Fluss als Ausgangsgröße.

Für die Auslegung einer Regelung im Feldschwächbereich muss das Modell des Ankerkreises (siehe Bild 4-6) mit dem Modell des Erregerkreises zusammengeführt werden. Hierdurch erhält das Gesamtmodell mit dem magnetischen Fluss Ψ eine zusätzliche Zustandsgröße. An dieser Stelle wird nicht näher auf die Regelungskonzepte eines fremderregten Gleichstrommotors im Ankerstell- und Feldschwächbereich eingegangen. LEONHARD und SCHRÖDER geben in [Leo00] und in [Sch09] eine Übersicht zu den verschiedenen Regelungsstrategien. Durch eine Regelung des Gleichstrommotors werden weitere Nichtlinearitäten in Form von Stellgrößenbeschränkungen (Drehzahl, Strom und Spannung) im Modell abgebildet werden müssen.

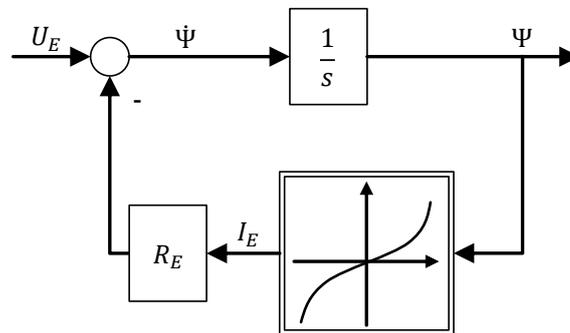


Bild 4-9: Blockschaltbild des Erregerkreises mit nichtlinearer inverser Magnetisierungskennlinie (vgl. [Pfa94, S. 34])

Im mechanischen Teilsystem kann es notwendig sein, Reibungseffekte detaillierter betrachten zu müssen. Wie in der zweiten Ebene gezeigt, kann die Reibung durch einen vereinfachten, linearen Zusammenhang berücksichtigt werden. Diese Annahme ist gültig, wenn der Gleichstrommotor mit einer Winkelgeschwindigkeit $|\omega(t)| \gg 0$ betrieben wird. Bei kleineren Drehgeschwindigkeiten oder beim Anfahren und Abbremsen setzen weitere Reibungseffekte ein.

Zur detaillierteren Modellierung der Reibungseffekte im Gleichstrommotor existieren in der Wissenschaft eine Vielzahl an Ansätzen (vgl. [DWOA⁺95, S. 61 ff.], [Nol09]). ISERMANN verwendet einen nichtlinearen Ansatz zur Berechnung der Reibung in einem Motor, bei dem sich das Reibmoment M_R aus einem trockenen Teil M_{tr} und einem viskosen Teil M_{fl} zusammensetzt [Ise08, S. 210 ff.]:

$$M_R(t) = M_{tr} \cdot \text{sign}(\omega(t)) + M_{fl} \quad (4-18)$$

$$= M_{R0} \cdot \text{sign}(\omega(t)) + d_{reib} \cdot \omega(t). \quad (4-19)$$

Ein weiterer nichtlinearer Ansatz ist auf die STRIBECK-Kurve zurückzuführen. Diese Kurve ist im Wesentlichen eine Kennlinie, die den Verlauf der Reibkraft bzw. des -moments in Abhängigkeit der (Winkel-)Geschwindigkeit beschreibt. Es wird zusätzlich die Mischreibung, die den Übergang von der Trocken- zur Flüssigkeitsreibung darstellt, berücksichtigt. Das Reibmoment ist somit durch die folgende nichtlineare algebraische Gleichung definiert (vgl. [Nol09][S. 63]):

$$M_R(t) = d_{reib} \cdot \omega(t) + (M_{tr} + M_{str} \cdot e^{-|K \cdot \omega(t)|}) \cdot \text{sign}(\omega(t)). \quad (4-20)$$

Mithilfe dieser Gleichung lassen sich die Reibungseffekte detaillierter darstellen. Daher besitzt das Modell im Vergleich zum Modell der Ebene 2, bei dem die Reibung linear angenommen wurde, eine höhere Modellierungstiefe. An dieser

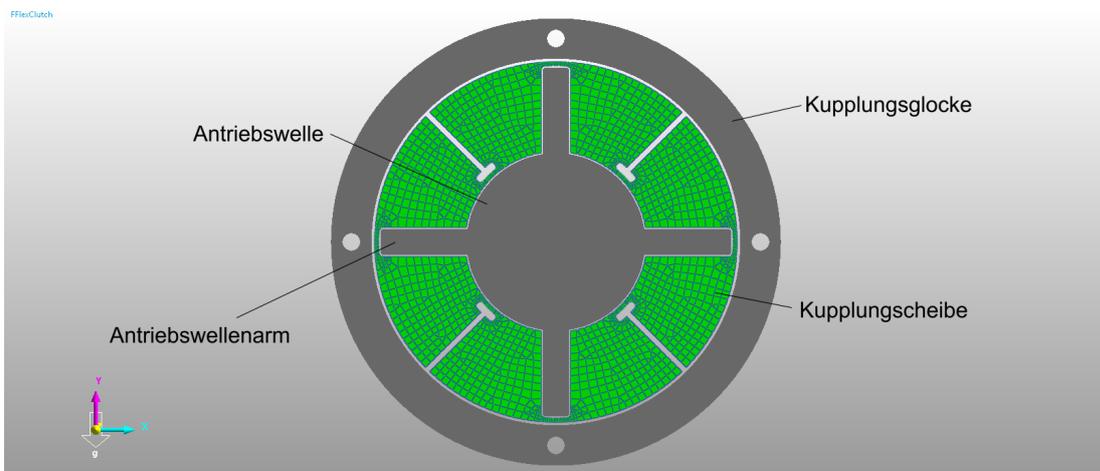
Stelle wird nicht näher auf die Terme eingegangen. Sie können in [Ise08, S. 181 ff.] sowie in [Nol09, S. 61 ff.] nachgelesen werden.

Ebene 4 – Bauteiloptimierung: In der vierten Modellierungstiefebene werden i. d. R. nur einzelne Elemente eines Systems (bzw. die Effekte dieser) sehr detailliert abgebildet.

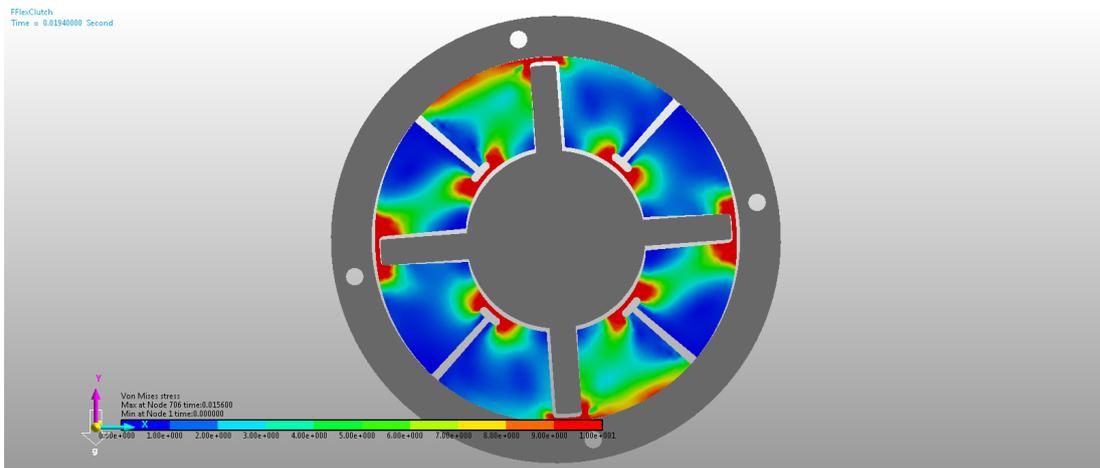
Zur Veranschaulichung wird in diesem Beispiel angenommen, dass der Gleichstrommotor über eine Kupplung mit einer Last verbunden ist. Es soll sich an dieser Stelle um eine Fliehkraftkupplung handeln. Die drehzahlabhängige Momentenübertragung erfolgt mit Kraftschluss durch Reibung zwischen der antriebsseitigen Kupplungsscheibe und der abtriebsseitigen Kupplungsglocke (vgl. [MWJ⁺07, S. 410 ff.]). In Bild 4-10 sind die einzelnen Komponenten dargestellt.

Wenn sich die Antriebswelle dreht, werden die vier Arme der Antriebswelle an die Kupplungsscheibe gedrückt, wodurch die Kupplungsscheibe auch zu drehen beginnt. Mit zunehmender Drehzahl zieht die Fliehkraft die Kupplungsscheibe radial nach außen bis sie mit der Kupplungsglocke in Kontakt kommt. Mithilfe des Kontakts erfolgt die Momentenübertragung und die Last dreht sich.

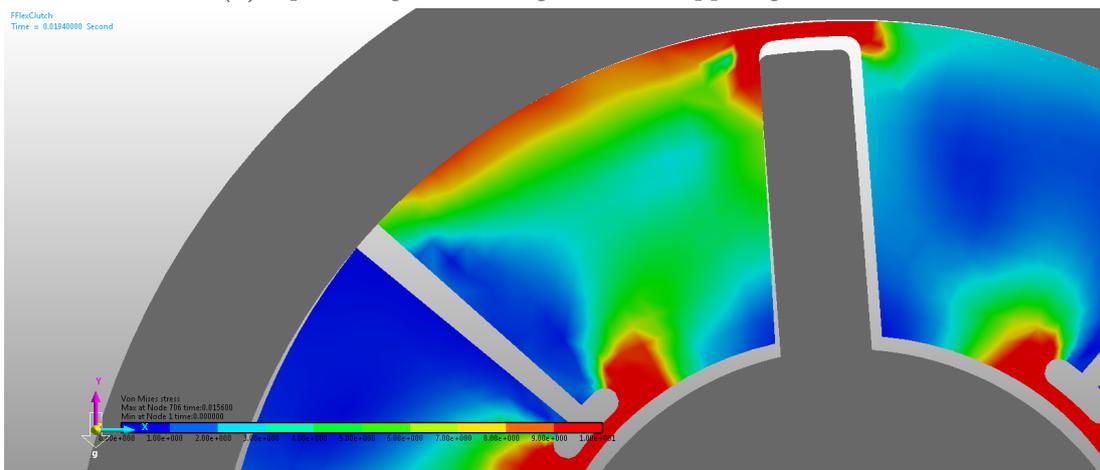
Das Ziel ist es, die Kupplungsscheibe so auszulegen, dass sie den auftretenden Spannungen standhält. Hierzu wird ein Modell im Simulationsprogramm *RecurDyn* erstellt. Die Antriebswelle und die Kupplungsglocke sind als Starrkörper modelliert. Die Kupplungsscheibe ist als flexibler FE-Körper abgebildet, der aus 2024 Elementen mit 4576 Knoten besteht. Es werden 184 Solid6- und 1840 Solid8-Elemente mit jeweils sechs bzw. acht Knotenpunkten verwendet. Jedes Element besitzt an seinen Knotenpunkten drei Freiheitsgrade in x-, y- und z-Richtung. Zwischen der Kupplungsscheibe und der Antriebswelle sowie zwischen der Kupplungsscheibe und der Kupplungsglocke sind Kontaktkräfte modelliert. Bild 4-10 zeigt das parametrierbare Modell und die Simulationsergebnisse. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, an welchen Stellen die höchsten Spannungen im Bauteil auftreten. Hierdurch lassen sich die Anforderungen an die Kupplungsscheibe genauer spezifizieren.



(a) Übersicht der modellierten Systemelemente



(b) Spannungsverteilung in der Kupplungscheibe



(c) Detailansicht der Spannungsverteilung

Bild 4-10: Finite-Elemente-Modell einer Fliehkraftkupplung

4.5 Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe

Nachdem die Modellierungstiefe in vier Ebenen unterteilt wurde, werden in diesem Abschnitt Kriterien zur Wahl der verschiedenen Ebenen definiert. Sie sollen den Entwickler bei der Wahl einer geeigneten Modellierungstiefe unterstützen, wenn er aus dem Modellierungsziel (vgl. Abschnitt 4.3) keine eindeutige Ebene der Modellierungstiefe ableiten kann. Bild 4-11 zeigt die Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe in Abhängigkeit der beiden Entwurfsphasen Systemkonzipierung und disziplinspezifischer Entwurf.

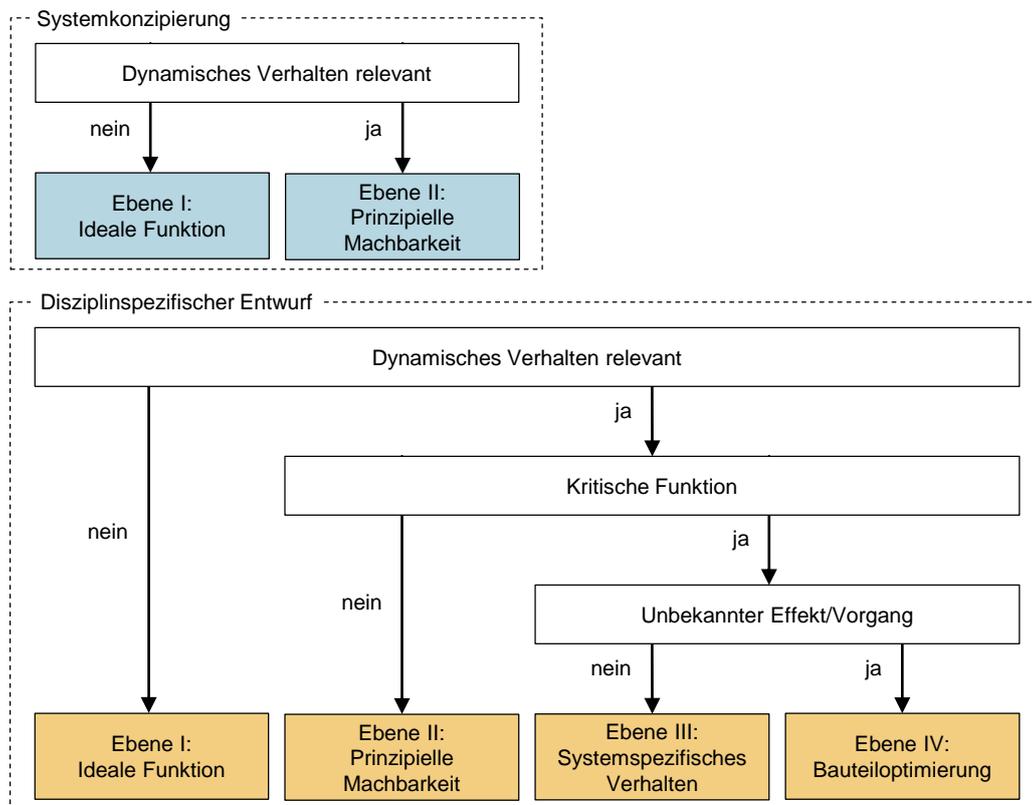


Bild 4-11: Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe in Abhängigkeit der Entwurfsphase

Systemkonzipierung

In der Systemkonzipierung werden vornehmlich die Ebenen ideale Funktion und prinzipielle Machbarkeit zur Modellierung der idealisierten Dynamikmodelle verwendet. Mithilfe der Modelle werden u. a. prinzipielle Funktionsnachweise und Grobdimensionierungen durchgeführt oder erste Regelungs- und Steuerungskonzepte erarbeitet. Der Entwickler muss in dieser Phase lediglich entscheiden, ob

das dynamische Verhalten eines Systems oder eines Systemelementes für die geplante Modellanalyse relevant ist. Ist das dynamische Verhalten relevant, sollte die Ebene der prinzipiellen Machbarkeit zur Abbildung der Dynamik des Systems oder des Systemelementes gewählt werden. Wie bereits definiert, sind algebraische Gleichungen, lineare ODEs oder DAEs mathematische Modelle zur Beschreibung der prinzipiellen Machbarkeit. Beeinflusst ein System oder Systemelement das dynamische Verhalten nicht, so reicht die Ebene der idealen Funktion aus. Modelle aus der Ebene 1 werden u. a. durch die Heaviside-Funktion oder algebraische Gleichungen repräsentiert.

Disziplinspezifischer Entwurf

Im disziplinspezifischen Entwurf werden die Systemkomponenten detaillierter betrachtet. Zu den Modellierungszielen gehören u. a. ein detaillierter Funktionsnachweis (z. B. kritischer Funktionen), die Feindimensionierung der Systemelemente oder die detaillierte Auslegung von Reglern oder Regelungsstrategien. Zur Modellierung der Systemelemente können je nach Modellierungsziel alle vier Ebenen der Modellierungstiefe verwendet werden. Zuerst muss entschieden werden, ob das dynamische Verhalten eines Systems oder eines Systemelementes für die Fragestellung relevant ist (siehe Bild 4-11). Ist dies nicht der Fall, so kann das System oder Systemelement in der Ebene der idealen Funktion abgebildet werden oder man bildet es gar nicht ab. Wenn das dynamische Verhalten der Komponente für die Untersuchung relevant ist, stehen die Ebenen 2 bis 4 zur Auswahl. Im nächsten Schritt muss geprüft werden, ob es sich um eine kritische Funktion handelt. Ist die Funktion unkritisch, kann sie durch idealisierte dynamische Verhaltensmodelle repräsentiert werden (Ebene 2: prinzipielle Machbarkeit). Das letzte Kriterium entscheidet über die Ebenen systemspezifisches Verhalten und Bauteiloptimierung. Handelt es sich um einen für die Untersuchung wesentlichen Effekt oder Vorgang, der dem Entwickler unbekannt ist, so wird diesem nahegelegt, die höchste Ebene der Modellierungstiefe (Ebene 4) zu wählen (vgl. auch [Jus14, S. 22 ff.]). Bei geringer Systemkenntnis wird empfohlen, eine höhere Modellierungstiefe zu wählen. Diese kann selbstverständlich nur geschehen, wenn ausreichendes Wissen bzgl. der Fachdisziplin vorhanden ist. Exemplarische Modelle der Ebene 4 sind u. a. partielle Differentialgleichungen und FE-Modelle. Ist der Effekt bekannt, kann Ebene 3 gewählt werden. Zur Beschreibung des systemspezifischen Verhaltens werden im Unterschied zu Modellen der zweiten Ebene der Modellierungstiefe auch nicht-lineare ODEs und DAEs eingesetzt. Die Modelle dieser Ebene können darüber hinaus auch eine höhere Anzahl an Parametern gegenüber Modellen der prinzipiellen Machbarkeit besitzen. Ein weiteres Indiz zur Verwendung der höchsten Ebene der Modellierungstiefe ist, wenn ein Modell zur Optimierung (z. B. Reduzierung von Bauteilkosten oder Einsparung von Ressourcen) genutzt werden soll.

JUST zeigt in [Jus14, S. 22 ff.] einige Einflussfaktoren auf die Wahl der Modellierungstiefe. Hierzu gehören u. a. auch die Systemkenntnis und die Produktreife sowie die Art der Aufgabenstellung, wie z. B. eine Weiter- oder Neuentwicklung.

Mit Blick auf die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Vorgehensweise zu Modellbildung und -analyse sind die Aufgaben der Zielbestimmung vollständig definiert (siehe Bild 4-2, S. 83). Mithilfe der entwickelten Methode wird systematisch eine Modellierungstiefe ausgewählt. Zunächst erfolgt die Festlegung der Modellierungsziele. Anschließend stehen vier Ebenen der Modellierungstiefe zur Auswahl, die mittels der definierten Kriterien ausgewählt werden können.

4.6 Quantifizierung von Modelleigenschaften

In der Modellsynthese (siehe Bild 4-2, S. 83) werden Modelle erstellt oder es können bereits vorhandene Modelle wiederverwendet werden. Um eine manuelle oder sogar eine automatisierte Auswahl mithilfe von Suchmaschinen aus Datenbanken nach bestimmten Kriterien und Merkmalen zu ermöglichen, müssen Modelle vergleichbar sein. Dieser Vergleich wird durch die Beteiligung verschiedener Disziplinen erschwert.

Die Modelleigenschaften Modellierungstiefe und Modellkomplexität sind zwei wesentliche Merkmale, die sich für einen Vergleich von Dynamikmodellen eignen [BT96, S. 1]. Hierzu ist eine Quantifizierung der beiden Eigenschaften erforderlich. Ziel ist es, die Modellauswahl mithilfe der quantifizierten Eigenschaften zu vereinfachen. Zur Quantifizierung der Modellierungstiefe wurden bereits vier Ebenen definiert. Allerdings werden in Modellen häufig Systemelementmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefe miteinander kombiniert, d. h. es muss eine Gesamtmodellierungstiefe quantifiziert werden. In diesem Abschnitt werden erste pragmatische Ansätze zur Quantifizierung der Modellkomplexität sowie der Modellierungstiefe zusammengesetzter Modelle vorgestellt und anhand von Beispielen diskutiert.

Quantifizierung der Modellkomplexität

Die Modellkomplexität ist eine strukturelle Eigenschaft. Wie bereits erwähnt, besteht ein Modell hoher Komplexität aus vielen Elementen und Wechselwirkungen. Eine Möglichkeit, die Modellkomplexität zu quantifizieren, besteht darin, die Anzahl der Elemente oder Wechselwirkungen zu zählen. Das gestaltet sich gerade beim Zusammenwirken von Systemelementmodellen aus verschiedenen Disziplinen in einem Modell schwierig. Charakteristisch für ein disziplinübergreifendes Dynamikmodell sind seine physikalischen Zustände. Aus diesem Grund werden

zur Quantifizierung der Komplexität eines Dynamikmodells die Zustände herangezogen. Die Komplexität K eines Dynamikmodells ist somit gleich der Anzahl n der modellierten Zustände. Für ein zusammengesetztes Modell gilt dementsprechend:

$$K_{ges} = \sum_{i=1}^k n_i, \text{ mit } i, k \in \mathbb{N}. \quad (4-21)$$

Die Modellkomplexität gibt somit an, wie viele Zustände modelliert sind. Der Parameter k stellt die Anzahl der Teilmodelle dar. Darüber hinaus können Abschätzungen zum Rechenaufwand bei der Simulation des Modells gemacht werden. Beispielsweise ist eine große Anzahl an Zuständen ein Indiz für einen steigenden Rechenaufwand.

Die Quantifizierung der Modellkomplexität mittels physikalischer Zustände funktioniert für die Modelle der Ebenen 2 bis 4 sehr gut. Jedoch gestaltet sich die Übertragung dieser Berechnungsweise auf Modelle der ersten Ebene schwierig. Modelle der idealen Funktion beruhen nicht zwingend auf der Modellierung physikalischer Zustände und besitzen dadurch keine Zustände, somit ist deren Komplexität immer $K = 0$.

Quantifizierung der Modellierungstiefe zusammengesetzter Modelle

Mithilfe der vier Ebenen der Modellierungstiefe lassen sich bereits Modelle bzgl. dieser Eigenschaft miteinander vergleichen, wenn ihnen eine eindeutige Ebene zugeordnet werden kann. Häufig bestehen Modelle aus mehreren Teilmodellen, die nicht zwingend in der gleichen Ebene der Modellierungstiefe abgebildet werden müssen. Um die Modellierungstiefe solcher Modelle bestimmen zu können, wird in diesem Abschnitt ein Ansatz zur Berechnung der Gesamtmodellierungstiefe Γ_{ges} zusammengesetzter Modelle vorgestellt.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Gesamtmodellierungstiefe könnte die Angabe des Minimums oder des Maximums der Γ_i sein. In beiden Fällen entsteht ein falscher Eindruck, wenn das Gesamtmodell viele Teilmodelle mit der gleichen Modellierungstiefe enthält und es ein Teilmodell mit einer besonders geringen oder besonders hohen Modellierungstiefe besitzt.

Die Berechnung der Modellierungstiefe eines Modells sollte unabhängig von jeglicher Modularisierung sein. Aus diesem Grund wurden in [LOT14] Gewichtungsfaktoren γ eingeführt. Die Gesamtmodellierungstiefe eines zusammengesetzten Modells, das aus mehreren Teilmodellen mit unterschiedlicher Modellierungstiefe Γ_i besteht, wird somit wie folgt berechnet:

$$\Gamma_{ges} = \sum_{i=1}^k \gamma_i \cdot \Gamma_i. \quad (4-22)$$

An den Gewichtungsfaktor γ_i werden die folgenden Anforderungen gestellt (vgl. auch [Oes18, S. 91]):

1. Normierung der Gewichtungsfaktoren: $\sum_{i=1}^k \gamma_i \stackrel{!}{=} 1$, mit $\gamma_i \in \mathbb{R}^{>0}$,
2. Gültigkeit der Berechnung für alle vier Ebenen der Modellierungstiefe,
3. Unabhängigkeit der berechneten Gesamtmodellierungstiefe von gewählter Modularisierung bzw. Aufteilung der Zustände in Teilmodelle und
4. Vernachlässigung der für die geforderte Modellierungstiefe unnötigen Zustände.

Beim Formulieren von Differentialgleichungen zur Beschreibung eines Systems oder Systemelements kann je nach Verfahren die Anzahl an Zuständen variieren. Um solche evtl. ungünstigen Formulierungen zu berücksichtigen (siehe Anforderung 4), sollen nur die Zustände $n_{min, i}$ berücksichtigt werden, die zur Erfüllung eines Modellierungsziels mindestens erforderlich sind. In der Regelungstechnik wird dies als Minimalrealisierung bezeichnet [NE77]. NOUR ELDIN beschreibt die Dimension n der Minimalrealisierung als die kleinste Dimension einer beobachtbaren oder steuerbaren Realisierung. In der Mechanik entsprechen häufig die generalisierten Koordinaten den Zuständen einer Minimalrealisierung (vgl. [Fre11, S. 107 ff.]).

Um Anforderung 1 und Anforderung 2 zu erfüllen, wird jeweils eine Eins addiert. Dies ist erforderlich, damit die Berechnung des Gewichtungsfaktors auch für Modelle der ersten Ebene mit $K = 0$ gültig ist. Für den Gewichtungsfaktor γ_i ergibt sich folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{1 + n_{min, i} - n_{gesperrt, i} - n_{doppelt, i}}{\sum_{j=1}^k (1 + n_{min, j} - n_{gesperrt, j} - n_{doppelt, j})} \\ &= \frac{1 + n_{min, i} - n_{gesperrt, i} - n_{doppelt, i}}{k + \sum_{j=1}^k (n_{min, j} - n_{gesperrt, j} - n_{doppelt, j})}, \text{ mit } i, j, k \in \mathbb{N}. \end{aligned} \tag{4-23}$$

Die Anzahl an Minimalzuständen aller Teilmodelle muss nicht zwingend der Anzahl an Minimalzuständen des Gesamtmodells entsprechen, da gelegentlich Teilmodelle die gleichen Zustandsvariablen besitzen können. Bei einer Kopplung von Teilmodellen müssen deshalb die doppelten Zustände $n_{doppelt, i}$ abgezogen werden, um die Minimalzustände des Gesamtmodells zu bestimmen.

Die Zustände $n_{gesperrt, i}$ werden von den Minimalzuständen bei der Berechnung des Gewichtungsfaktors ebenfalls abgezogen. Gesperrte Zustände sind beispielsweise

Zustände, deren Veränderung durch Gelenke verhindert wird, wie z. B. durch algebraische Zwangsbedingungen. Da ein gesperrter Zustand die Modellierungstiefe nicht unnötig erhöhen soll (siehe Anforderung 4), geht er negativ in die Berechnung des Gewichtungsfaktors ein.

Durch eine Kopplung von Teilmodellen können also doppelte Zustände entstehen. Weiterhin können in einem Modell gesperrte Zustände existieren. Beide Gruppen von Zuständen müssen zunächst identifiziert werden, bevor die Gesamtmodellierungstiefe Γ_{ges} eines zusammengesetzten Modells bestimmt werden kann. Voraussetzung hierfür ist, dass die minimalen Zustände der Teilmodelle bekannt sind.

Möglichkeiten der Kopplung von Teilmodellen

Im Folgenden sollen die Auswirkungen verschiedener Kopplungsmöglichkeiten von Teilmodellen auf die Modellierungstiefe Γ_{ges} und die Modellkomplexität K_{ges} eines Gesamtmodells gezeigt werden. Hierzu werden in drei Beispielen jeweils zwei Teilmodelle mit unterschiedlichen Kopplungsarten betrachtet (siehe Bild 4-12).

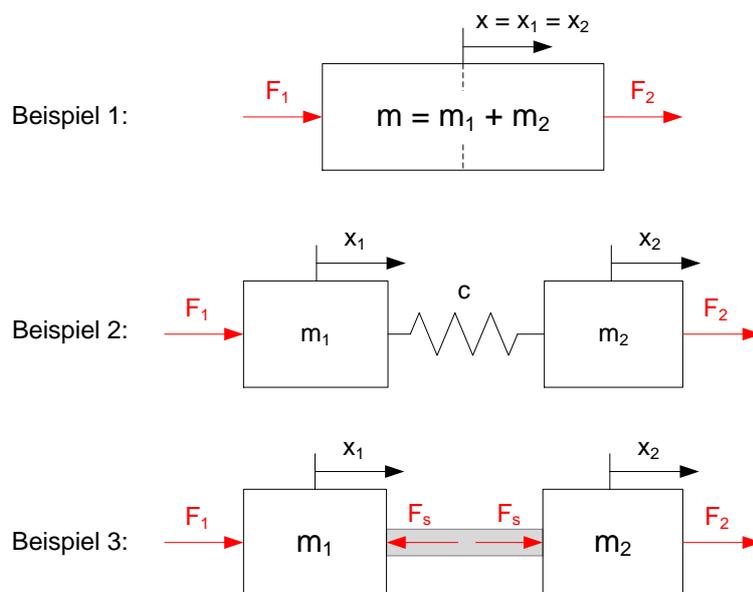


Bild 4-12: Drei Beispiele verschiedener Kopplungen zwischen zwei Teilmodellen (vgl. auch [Oes18, S. 197ff.])

Die beiden identischen Teilmodelle bestehen aus jeweils einer Masse m_1 bzw. m_2 . Auf jede Masse wirkt eine äußere Kraft F_1 bzw. F_2 . Im ersten Beispiel werden die Massen ideal zu einer Gesamtmasse $m = m_1 + m_2$ miteinander verbunden. In Beispiel 2 werden die Massen durch eine Elastizität c miteinander gekoppelt.

Im dritten Beispiel werden die beiden Teilsysteme durch eine Koppelstange starr miteinander verbunden.

Die Modellierungstiefe der Teilmodelle ist mit $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 2$ identisch und demnach ist auch die Modellierungstiefe des zusammengesetzten Modells $\Gamma_{ges} = 2$. Die Anzahl an Minimalzuständen des jeweiligen Teilmodells ist in allen drei Beispielen $n_{min,1} = n_{min,2} = 2$. Aus diesem Grund sind auch die Gewichtungsfaktoren $\gamma_{1,2} = (1 + 2)/(2 + 2 + 2) = 1/2$ identisch. Die Modellkomplexität wird mithilfe der Gleichung 4-21 aus der Summe der modellierten Zustände bestimmt. Um die Modellkomplexität für das Gesamtmodell zu bestimmen, müssen zunächst die Modellgleichungen näher betrachtet werden. Zur Vergleichbarkeit der drei Beispiele werden die Modellgleichungen in der Zustandsraumdarstellung gezeigt (siehe [Föl08, S. 416 ff.]):

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}(t) &= \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{B} \cdot \underline{u}(t), \\ \underline{y}(t) &= \underline{C} \cdot \underline{x}(t) + \underline{D} \cdot \underline{u}(t).\end{aligned}$$

In Beispiel 1 werden die beiden Massen ideal miteinander verbunden, d. h. die Eigenschaften einer Kopplung werden vernachlässigt. Dies führt zu folgender Zustandsraumdarstellung⁷:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/m & 1/m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (4-24)$$

Die modellierten Zustände sind die Position x und die Geschwindigkeit \dot{x} , so dass die Modellkomplexität $K_{ges} = 2$ ist.

Beispiel 2 besitzt eine elastische Kopplung zwischen den beiden Teilmodellen bzw. Massen und die Zustandsraumdarstellung lautet:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c/m_1 & 0 & c/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ c/m_2 & 0 & -c/m_2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/m_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1/m_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (4-25)$$

Der Zustandsvektor $\underline{x}(t)$ besitzt mit den beiden Positionen x_1 und x_2 sowie den zugehörigen Geschwindigkeiten \dot{x}_1 und \dot{x}_2 vier Einträge. Die Gesamtmodellkomplexität beträgt daher $K_{ges} = 4$. Damit ist die Modellkomplexität doppelt so groß, wie die Modellkomplexität des ersten Beispiels.

⁷Auf die Darstellung des Ausgangsvektors $\underline{y}(t)$ wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Im Unterschied zu den ersten beiden Beispielen, bei denen die Gesamtmodelle durch reine ODE-Systeme beschrieben werden, wird das dritte Beispiel durch ein DAE-System der Form

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(t, x(t), y(t)), \\ 0 &= g(t, x(t), y(t)),\end{aligned}$$

dargestellt. Der Grund hierfür ist die durch die Kraft F_s repräsentierte starre Kopplung zwischen den beiden Massen und der dadurch entstehenden Zwangsbedingung $x_2 - x_1 = 0$. Mithilfe einer Indexreduktion lässt sich jedoch das DAE-System durch dreifaches Differenzieren der algebraischen Zwangsbedingung in ein ODE-System überführen. Ziel ist es, eine gewöhnliche Differentialgleichung für die Zwangskraft F_s zu erhalten (vgl. [Jan10, S. 139 ff.]). Das so entstehende ODE-System besitzt die folgende Form:

$$\underline{E} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/m_2 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \\ F_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/m_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/m_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (4-26)$$

mit

$$\underline{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Zur Bestimmung der Modellkomplexität für Deskriptorsysteme⁸ wird an dieser Stelle vorgeschlagen, die Dimension des Deskriptors bzw. die Ordnung des indexreduzierten Systems zu verwenden (siehe auch [Oes18, S. 198]). Die Modellkomplexität ist in diesem Fall $K_{ges} = 5$.

In allen drei Fällen sind die Modellierungstiefe des Gesamtmodells sowie die Gewichtungsfaktoren $\gamma_{1,2}$ der Teilmodelle identisch. Der Unterschied liegt in der Modellkomplexität. Dies kräftigt die am Anfang des Kapitels getroffene Aussage, dass eine hohe Modellkomplexität lediglich ein Indiz für eine hohe Modellierungstiefe ist (Abschnitt 4.1, S. 80). Die Modellkomplexität kann an dieser Stelle jedoch Aufschluss über den zu erwartenden Rechenaufwand geben. Der Rechenaufwand ist im zweiten Beispiel aufgrund der elastischen Kopplung und der i. d. R. hohen Steifigkeit deutlich höher als der Rechenaufwand im ersten Beispiel.

⁸DAE-Systeme sind in der Regelungstechnik auch als Deskriptorsysteme bekannt. Dieser Begriff wurde u. a. durch LUENBERGER geprägt [Lue77].

Beispiel zur Quantifizierung der Modelleigenschaften

Im Folgenden werden am Beispiel eines Greifmechanismus die Gesamtmodellkomplexität und die Gesamtmodellierungstiefe eines aus verschiedenen Modellierungstiefenebenen bestehenden Gesamtmodells quantifiziert. Bild 4-13 zeigt die stark vereinfachte Wirkstruktur eines Greifmechanismus, der Bestandteil eines Greifroboters zur Positionierung von Werkstücken ist.

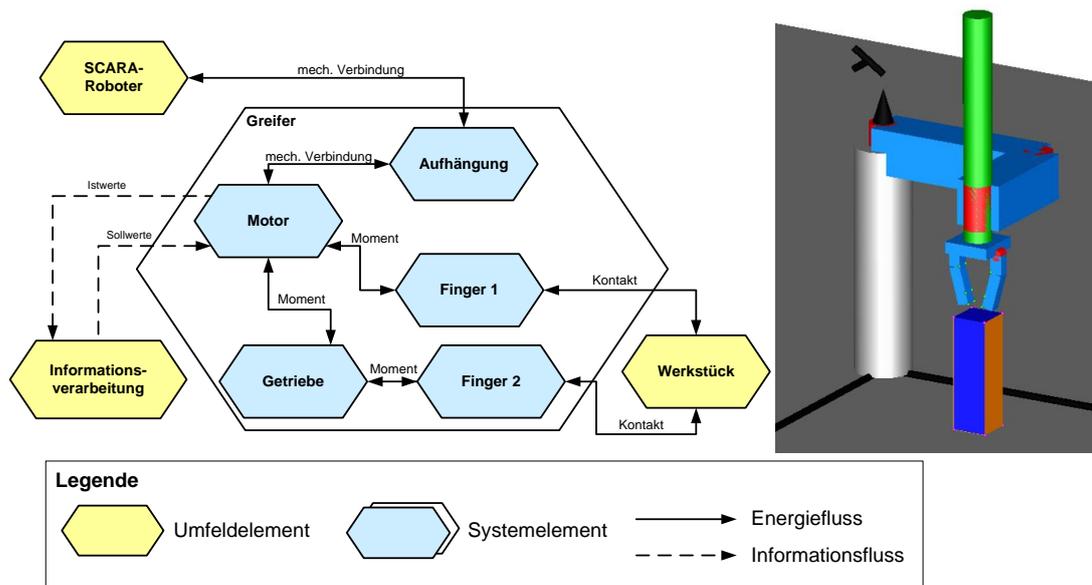


Bild 4-13: Wirkstruktur des Greifmechanismus eines Greifroboters

Der Greifmechanismus (auch als Greifer bezeichnet) besitzt Schnittstellen zu den Umfedelementen SCARA-Roboter⁹, Informationsverarbeitung und Werkstück. Er ist über eine mechanische Verbindung am SCARA-Roboter befestigt, besitzt einen Soll-/Istwerteaustausch mit der Informationsverarbeitung und tritt in Kontakt mit dem Werkstück. Im Folgenden wird ausschließlich der Greifmechanismus betrachtet. Dieser besteht aus den fünf Systemelementen Aufhängung, Motor, Getriebe sowie Finger 1 und Finger 2 (siehe Bild 4-13). Die Aufhängung verbindet den Greifer mit dem SCARA-Roboter. Außerdem ist der Motor, der die Finger antreibt, an der Aufhängung über eine mechanische Verbindung befestigt. Zwischen Finger 2 und dem Motor ist ein Getriebe angebracht. Das Werkstück besitzt eine Wechselwirkung in Form eines Kontaktes zu den beiden Fingern.

Ausgangspunkt des Beispiels ist eine bereits entwickelte Prinziplösung des Greifers. Es wird angenommen, dass der Entwickler anhand der Prinziplösung des

⁹Englische Abkürzung für Selective Compliance Assembly Robot Arm. Der SCARA-Roboter wird auch als Horizontal-Knickarmroboter bezeichnet [Kie07, S. 342 ff.].

Greifers einen bestimmten Elektromotor auswählt, um das produktspezifische Verhalten zu analysieren und ggf. eine Regelung des Motor detailliert auszulegen. Weiterhin wird angenommen, dass die Modellierungstiefe des Motormodells $\Gamma_{Motor} = 3$ beträgt. Das Motormodell besteht aus einem elektrischen und einem mechanischen Teilsystem (vgl. hierzu das Bsp. aus Abschnitt 4.4). Die Zustände sind der Strom i sowie der Rotorwinkel φ und die Rotorgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$.

Die Modelle der Finger und der Aufhängung sind in der Ebene prinzipielle Machbarkeit ($\Gamma_{Fing1,2} = \Gamma_{Aufh} = 2$) modelliert. Das Fingermodell besteht aus einem Starrkörper mit einem Rotationsgelenk und besitzt einen rotatorischen Freiheitsgrad (zwei Zustände). Die Aufhängung ist als Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden abgebildet (drei rotatorische und drei translatorische), und das Modell besitzt 12 Zustände. Das Getriebemodell besteht lediglich aus einem Übersetzungsverhältnis $i_{Getriebe}$ und besitzt die Modellierungstiefe $\Gamma_{Getriebe} = 1$. Aus diesem Grund besitzt das Teilmodell keine Zustände.

Die Tabelle 4-1 fasst die Modelleigenschaften der einzelnen Systemelemente des Greifers zusammen. Die Komplexität der Teilmodelle ergibt sich aus der Anzahl der modellierten Zustände. In diesem Beispiel entsprechen die modellierten Zustände der Teilmodelle auch den Minimalzuständen.

Tabelle 4-1: Systemelemente des Greifmechanismus

Systemelemente	Eigenschaften	
	Modellierungstiefe Γ_i	Komplexität K_i
Motor	3	3
Finger 1	2	2
Finger 2	2	2
Aufhängung	2	12
Getriebe	1	0

Aus den Modellkomplexitäten der Teilmodelle ergibt sich nach Gleichung 4-21 eine Gesamtkomplexität von:

$$K_{ges} = 3 + 2 + 2 + 12 + 0 = 19. \quad (4-27)$$

Fügt man das Teilmodell des Motors mit den beiden Teilmodellen der Finger zusammen, so entstehen doppelte Zustände, da der Rotorwinkel und die Rotorgeschwindigkeit dem Winkel und der Winkelgeschwindigkeit der Finger ent-

sprechen. Weiterhin besitzt die Aufhängung 12 Zustände, die gesperrt sind. Der Gewichtungsfaktor beträgt daher:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= \frac{1 + n_{min, i} - n_{gesperrt, i} - n_{doppelt, i}}{5 + \sum(19 - 12 - 2 - 2)}, \\ &= \frac{1 + n_{min, i} - n_{gesperrt, i} - n_{doppelt, i}}{8}.\end{aligned}\tag{4-28}$$

Die Gewichtungsfaktoren für die jeweiligen Teilmodelle lauten somit:

$$\begin{aligned}\gamma_{Motor} &= \frac{1 + 3 - 0 - 0}{8} = \frac{4}{8}, \\ \gamma_{Fing1} &= \frac{1 + 2 - 0 - 2}{8} = \frac{1}{8}, \\ \gamma_{Fing2} &= \frac{1 + 2 - 0 - 2}{8} = \frac{1}{8}, \\ \gamma_{Getr} &= \frac{1 + 0 - 0 - 0}{8} = \frac{1}{8}, \\ \gamma_{Aufh} &= \frac{1 + 12 - 12 - 0}{8} = \frac{1}{8}.\end{aligned}$$

Die Modellierungstiefe des Greifermodells berechnet sich nach den Gleichungen 4-22 und 4-23 wie folgt:

$$\begin{aligned}\Gamma_{Greifer} &= \gamma_{Motor} \cdot \Gamma_{Motor} + 2 \cdot \gamma_{Fing} \cdot \Gamma_{Fing} + \gamma_{Getr} \cdot \Gamma_{Getr} + \gamma_{Aufh} \cdot \Gamma_{Aufh} \\ &= \frac{4}{8} \cdot 3 + 2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 2 + \frac{1}{8} \cdot 1 + \frac{1}{8} \cdot 2 \\ &= 2,375 \text{ mit } \gamma_{Fing} = \gamma_{Fing1} = \gamma_{Fing2} \text{ und } \Gamma_{Fing} = \Gamma_{Fing1} = \Gamma_{Fing2}.\end{aligned}$$

Diese Modelleigenschaften werden nun dokumentiert und beispielsweise in einer Datenbank für das neue Modell „Greifer“ hinterlegt, so dass bei einer erneuten Entwicklung mithilfe der Modelleigenschaften nach diesem Modell gesucht werden kann.

Anhand der hier gezeigten Vorgehensweise lassen sich nun auch die Gesamtmodellierungstiefe zusammengesetzter Modelle sowie die Gesamtmodellkomplexität quantifizieren. Voraussetzung hierfür ist die Bestimmung der Minimalzustände von Teilmodellen. Die Quantifizierung dieser Modelleigenschaften wird dann hilfreich sein, wenn Modelle wiederverwendet werden und eine Modelldatenbank mit einer Vielzahl an Modellen vorhanden ist. Dieser Ansatz bietet weiteres Forschungspotenzial.

4.7 Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel kooperierender Delta-Roboter

Im folgenden Abschnitt wird die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel kooperierender Delta-Roboter angewendet und validiert. Die Validierung der Methode erfolgt an bereits bestehenden Modellen, bevor sie in Kapitel 5 auf eine neue Problemstellung angewendet wird. Die kooperierenden Delta-Roboter wurden im Rahmen des Forschungsprojektes ENTIME entwickelt. Sie dienen als Demonstrator für die gleichnamige Entwicklungssystematik. Die im Folgenden gezeigten Ergebnisse und Modelle stammen aus Arbeiten, die im Rahmen des Projekts entstanden sind. In [GTS14] sind die Projektergebnisse zusammengefasst.

Der Entwurf der kooperierenden Delta-Roboter erfolgte vollständig modellbasiert nach der ENTIME Entwicklungssystematik (siehe Abschnitt 2.4.4, S. 38). TEICHRIB et al. zeigen in [TJD⁺12] den modellbasierten Entwurf der Delta-Roboter als durchgehendes Beispiel der Entwicklungssystematik. Die Vorgehensweise beim modellbasierten Entwurf, insbesondere bei der Modellierung in den einzelnen Entwurfsphasen, und die eingesetzten Modelle eignen sich besonders gut für einen Vergleich mit der entwickelten Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe.

Für den Vergleich werden im ersten Schritt die definierten Modellierungsziele beim Entwurf der Delta-Roboter erfasst. Auf dieser Grundlage kann aus den Modellierungszielen mithilfe der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe eine Zielmodellierungstiefe definiert werden. Anschließend erfolgen die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Systemelementebene und die Definition von Ebenen der Modellierungstiefe für die relevanten Systemelemente. Dem gegenübergestellt werden die im Rahmen von [TJD⁺12] und [GTS14] erstellten Modelle. Hierzu ist den einzelnen Modellen die entsprechende Ebene der Modellierungstiefe zuzuordnen. Im letzten Schritt erfolgt der Vergleich zwischen der Modellierungstiefe, die auf Basis der Methode gewählt wird, und der Modellierungstiefe der Modelle, die beim modellbasierten Entwurf der Delta-Roboter eingesetzt wurden. Ziel ist es, die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe an diesem Beispiel zu validieren. In einem ersten Schritt werden Dynamikmodelle aus der Systemkonzipierung betrachtet. Anschließend erfolgt die Untersuchung von Dynamikmodellen aus dem disziplinspezifischen Entwurf.

Zunächst werden der Demonstrator und die Komponenten der kooperierenden Delta-Roboter näher erläutert. Bei der Suche nach einem geeigneten Demonstrator für dieses Forschungsprojekt wurden u. a. die folgenden Kriterien berücksichtigt [GTS14, S. 71]:

- Verwendung möglichst vieler am Markt verfügbarer Lösungselemente,

- dynamisch anspruchsvolle Aufgabe,
- Einsatz einer präzisen dynamischen Bahnverfolgung,
- Verwendung einer sensiblen Kraftregelung,
- rege Kommunikation zwischen den Teilsystemen.

Daraus entstand die Idee der kooperierenden Delta-Roboter, die einander einen Ball zuspielen. Die Besonderheit ist, dass der Demonstrator ohne die Verwendung eines optischen Trackingsystems zur Erfassung der Ballflugbahn auskommt, wie z. B. einer Kamera, eines Lasersystems oder Lichtschranken. Bild 4-14 zeigt den Demonstrator und die verwendeten Komponenten.

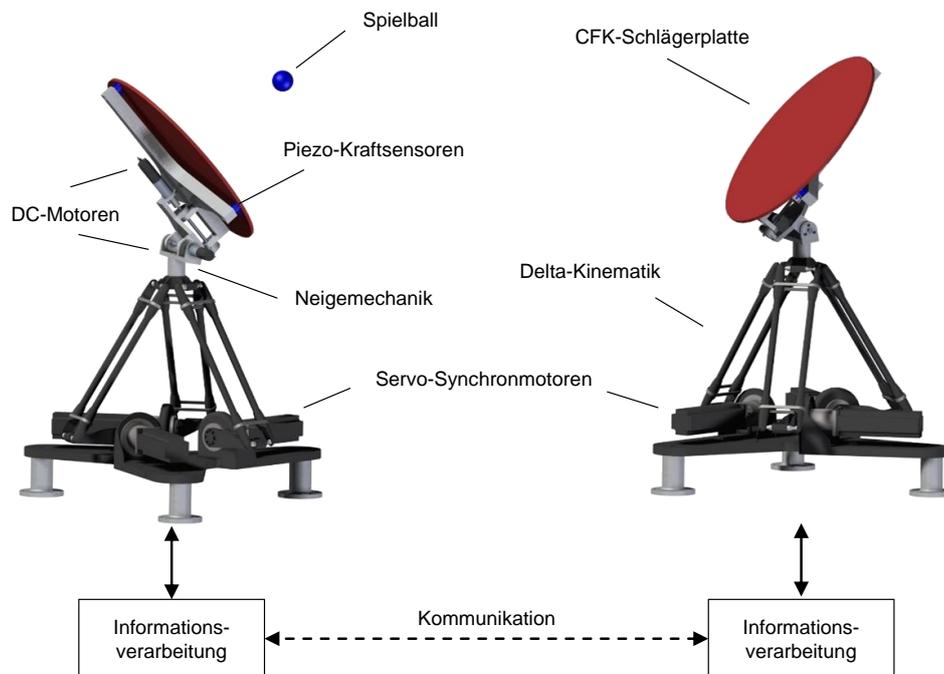


Bild 4-14: Kooperierende Delta-Roboter (vom Autor verändert, vgl. [DJS⁺ 13], [ODB⁺ 12])

Er besteht aus zwei Delta-Robotern und einem Spielball. Die Roboter sind identisch und besitzen eine lokale Informationsverarbeitung zum Einlesen der Sensorsignale und zum Berechnen der Stellgrößen für die Aktorik. Da kein optisches System zur Erfassung der Ballflugbahn verwendet wird, ist eine intensive Kommunikation zwischen den lokalen Informationsverarbeitungen der beiden Delta-Roboter erforderlich.

Der Delta-Roboter besteht aus der namensgebenden Delta-Kinematik, die das Gestell mit der Arbeitsplattform verbindet. Sie ist eine spezielle Form der Parallelkinematik¹⁰. Die Kinematik wird von drei Servo-Synchronmotoren bewegt. Auf der Arbeitsplattform sind zur Neigung der CFK¹¹-Schlägerplatte zwei DC¹²-Motoren befestigt. Sie ermöglichen die Drehung des Schlägers um zwei Achsen. Zur Ermittlung der Ball-Aufschlagposition werden drei Piezo-Kraftsensoren unterhalb der Schlägerplatte eingesetzt.

4.7.1 Idealisierte Dynamikmodelle in der Systemkonzipierung

In der Systemkonzipierung erfolgt der Entwurf der kooperierenden Delta-Roboter. Ziel ist es, einen Funktionsnachweis unter idealisierten Randbedingungen zu erbringen und eine Machbarkeitsanalyse durchzuführen. Hierzu werden Dynamikmodelle eingesetzt. Anhand dieser Modelle werden das Lösungskonzept grob dimensioniert und erste Regelungsstrategien erarbeitet. Aus der daraus entstehenden Prinziplösung werden Anforderungen an den disziplinspezifischen Entwurf definiert.

Nach der vorgestellten Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe stehen in der Systemkonzipierung die ersten beiden Ebenen zur Auswahl, die sich aus der Definition der Modellierungsziele ergeben. Bei der Konzipierung der kooperierenden Delta-Roboter sind u. a. für die folgenden Modellierungsziele Dynamikmodelle eingesetzt worden:

- idealisierte Auslegung des Grundsystems,
- Entwurf des Regelungskonzeptes unter idealisierten Randbedingungen und
- Auslegung der idealisierten Lösung.

Exemplarisch wird im Folgenden die idealisierte Auslegung des Grundsystems näher betrachtet. Zur idealisierten Auslegung des Grundsystems werden die Informationsverarbeitung sowie die Sensorik und die Aktorik vernachlässigt. Ziel ist es, in einem ersten Schritt das Grundsystem modellbasiert zu analysieren und die Systemdynamik grob und unter idealisierten Randbedingungen auszulegen. Dieses Modellierungsziel entspricht der Definition der Ebene prinzipielle Machbarkeit ($\Gamma = 2$). Die Modelle der Ebene beschreiben Lösungsmuster, die durch erste idealisierte dynamische Verhaltensmodelle repräsentiert werden (siehe Abschnitt 4.4, S. 87). Aus diesem Grund ist nach der vorgestellten Methode ein Modell mit der Zielmodellierungstiefe $\Gamma_{Ziel} = 2$ erforderlich.

¹⁰Nähere Informationen zu parallelkinematischen Maschinen sind in [Neu06] zu finden.

¹¹CFK ist ein carbonfaserverstärkter Kunststoff.

¹²Gleichstrommotor (DC: *Direct Current*)

Nach der Wahl der Lösungsmuster erfolgt die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente mit der zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelne Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Die zu betrachtenden Systemelemente zur idealisierten Auslegung des Grundsystems sind die beiden Schlägerplatten, der Spielball und der Energiefluss zwischen der Schlägerplatte und dem Ball (vgl. [GTS14, S. 180 ff.]). Für sie muss nach den in Bild 4-11 dargestellten Kriterien die Modellierungstiefe festgelegt werden (vgl. Abschnitt 4.5, S. 102). In diesem Fall ist das dynamische Verhalten der Schläger und des Spielballs für die idealisierte Auslegung relevant, so dass sie in der Ebene 2 der Modellierungstiefe (prinzipielle Machbarkeit) abgebildet werden sollten. Ein weiterer und wichtiger Bestandteil bei dieser Betrachtung ist die Kontaktberechnung, d. h. der Energiefluss zwischen den Schlägern und dem Ball. Sie ist ebenfalls für die idealisierte Auslegung des Grundsystems dynamisch relevant und muss in der Ebene der prinzipiellen Machbarkeit modelliert werden.

Bild 4-15 zeigt ein MKS-Modell des Grundsystems in dem Simulationsprogramm *Dymola*. Sowohl die Schlägerplatten als auch der Spielball werden mithilfe eines Starrkörpers dargestellt. Die Schläger können sich in x- und y-Richtung translatorisch bewegen und um die z-Achse neigen (siehe Inertialsystem in Bild 4-15). Eingänge des Modells sind die Schlägergeschwindigkeiten v_1 und v_2 sowie die Neigungswinkel der Schläger φ_1 und φ_2 . Die beiden Schläger und der Spielball sind durch ein Kontaktmodell miteinander verbunden. Der Kontakt wird mittels eines linearen Feder-Dämpfer-Paares abgebildet. Die Kontaktkraft ist u. a. von der Eindringtiefe δ und der Eindringgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ zwischen Spielball und Schläger abhängig. Daraus ergibt sich für die Normalkraft die folgende lineare ODE (vgl. hierzu [Oes18] und [OWT14]):

$$F_N = c_{kon} \cdot \delta + d_{kon} \cdot \dot{\delta}. \quad (4-29)$$

Das Modell bildet das dynamische Verhalten während des Schlagvorgangs idealisiert ab. Nebeneffekte wie z. B. die Verformung der Körper werden vereinfacht durch das Kontaktmodell abgebildet. Die Delta-Kinematik wird auf eine Bewegung in der xy-Ebene beschränkt. Sowohl die Starrkörpermodelle der Schläger und des Balls als auch das lineare Kontaktmodell sind nach der Definition (vgl. Abschnitt 4.4, S. 87) der Ebene der Modellierungstiefe $\Gamma = 2$ zugeordnet. Da alle Systemelemente in der Ebene der prinzipiellen Machbarkeit abgebildet sind, kann die Zielmodellierungstiefe ebenfalls mit $\Gamma_{Ziel} = 2$ definiert werden.

Im letzten Schritt erfolgt der Vergleich zwischen den aus der Methode definierten Ebenen mit denjenigen, die aus den bestehenden Modellen abgeleitet wurden.

Nicht nur die Zielmodellierungstiefe, sondern auch die Ebenen der Modellierungstiefe für die einzelnen Systemelemente stimmen in beiden Fällen überein.

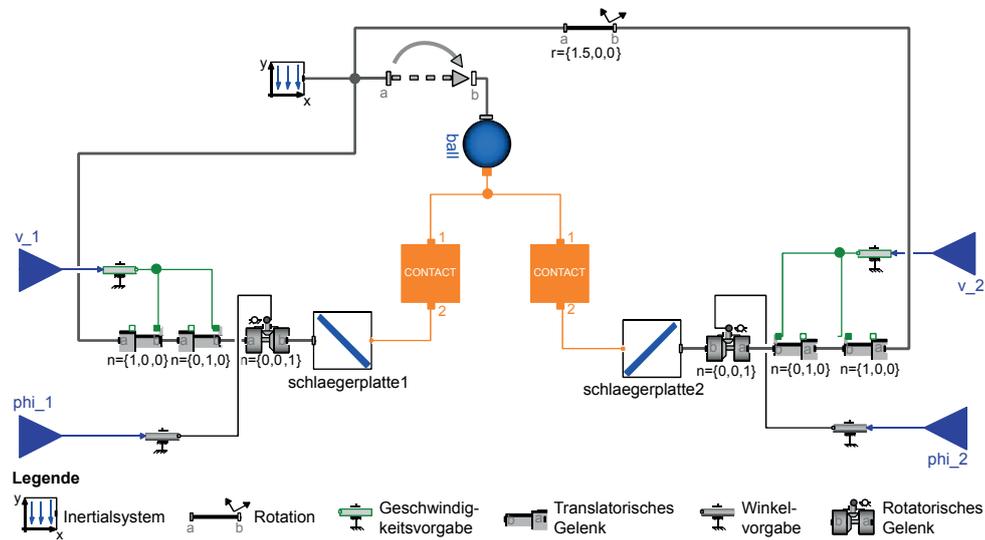


Bild 4-15: Idealisiertes Modell des Grundsystems in Dymola [GTS14, S. 182]

4.7.2 Detaillierte Dynamikmodelle im disziplinspezifischen Entwurf

Im disziplinspezifischen Entwurf wird die Prinziplösung der kooperierenden Delta-Roboter u. a. durch die Wahl von Lösungswissen konkretisiert. In dieser Entwurfsphase werden alle vier Ebenen der Modellierungstiefe eingesetzt (vgl. Bild 4-3, S. 91). Im ersten Schritt wird anhand der Modellierungsziele die erforderliche Zielmodellierungstiefe gewählt. Hierzu werden nach der vorgestellten Methode die definierten Ebenen der Modellierungstiefe verwendet (siehe Abschnitt 4.4, S. 87). Ist keine eindeutige Zuordnung eines Modellierungsziels zu einer der vier Ebenen der Modellierungstiefe möglich, können die in Abschnitt 4.5 vorgestellten Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe herangezogen werden (siehe Bild 4-11, S. 102).

Ein wichtiges Modellierungsziel im disziplinspezifischen Entwurf der kooperierenden Delta-Roboter bestand in Ausarbeitung und Analyse der Regelung. In der Systemkonzipierung wurde zunächst ein Regelungskonzept entworfen, dessen Auslegung auf idealisierter Aktorik und Sensorik basiert. Für den Funktionsnachweis der Prinziplösung unter idealisierten Randbedingungen ist dies ausreichend. Eine detaillierte Ausarbeitung und Analyse der Regelung erfordert jedoch, dass das jeweilige systemspezifische Verhalten der Aktorik und der Sensorik abgebildet werden. Das zur Ausarbeitung des Regelungskonzeptes eingesetzte Streckenmodell ist als Animationsansicht in Bild 4-16 dargestellt. Die detaillierte Strecke

enthält – neben Schläger-, Ball- und Kontaktmodell – u. a. Kraftsensormodelle, DC-Motormodelle für den Neigemechanismus der Schläger sowie Modelle der Servoantriebe der Delta-Roboter. Das Gesamtmodell besitzt verschiedene Eingänge, wie z. B. die Sollwinkel $\underline{\Theta}_{M,soll}(t)$ der drei Servoantriebe des Delta-Roboters oder die dazugehörigen Istwinkel $\underline{\Theta}_M(t)$ als Ausgänge.

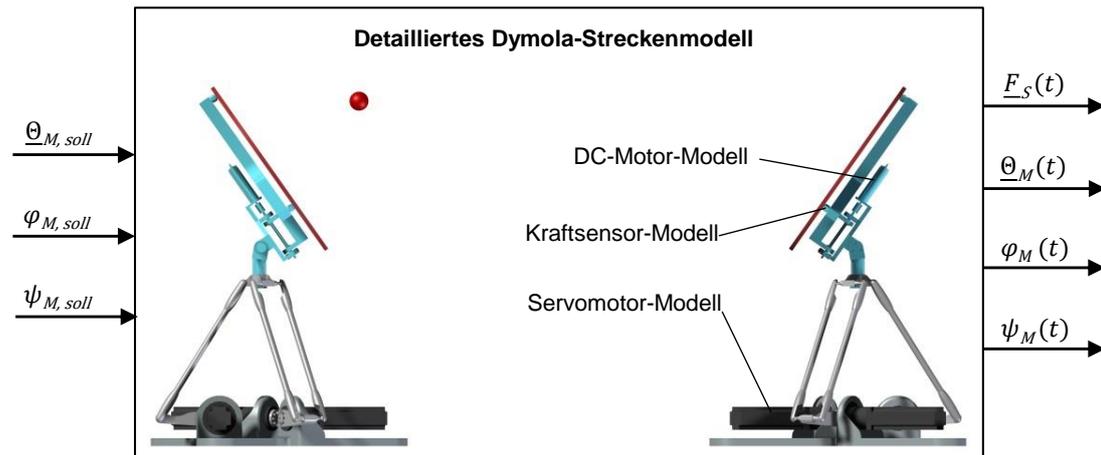


Bild 4-16: Animationsansicht des detaillierten Streckenmodells [GTS14, S. 206]

Exemplarisch wird im Folgenden ein Servoantrieb des Delta-Roboters näher betrachtet. Ziel ist es, den Servoantrieb für eine detaillierte Ausarbeitung und Analyse der Regelung zu verwenden. Hierzu ist es erforderlich, das produktspezifische Verhalten des Antriebs abzubilden. Dieses Modellierungsziel entspricht der Definition der Ebene des systemspezifischen Verhaltens ($\Gamma = 3$). Die Modelle der Ebene beschreiben u. a. Lösungselemente und beinhalten ein detailliertes dynamisches Verhalten der produktspezifischen Eigenschaften (siehe Abschnitt 4.4, S. 87). Aus diesem Grund ist nach der vorgestellten Methode ein Modell mit der Zielmodellierungstiefe $\Gamma_{Ziel} = 3$ erforderlich. Da es sich bei dem Servoantrieb um eine Komponente handelt, erfolgt an dieser Stelle nicht die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Systemelementebene, anders als bei der Auslegung des Grundsystems im Abschnitt zuvor. In Bild 4-17 ist das Modell des Servoantriebs im Simulationsprogramm *Dymola* dargestellt.

Das mechanische Teilsystem (mechanical part) berücksichtigt die Motorträgheit und die im Motor auftretende Reibung. Das elektrische Teilsystem (electrical part) besteht aus einer Induktivität und einem Widerstand. Weiterhin besitzt das Modell eine in der Antriebstechnik übliche Kaskadenregelung. Sie beinhaltet eine Regelung des Stroms (current control), der Winkelgeschwindigkeit (omega control) mit PI(D)-Anti-WindUp-Reglern und des Winkels mit einem P-Regler (phi control). Die Verwendung einer Momentenvorsteuerung zusätzlich zur internen

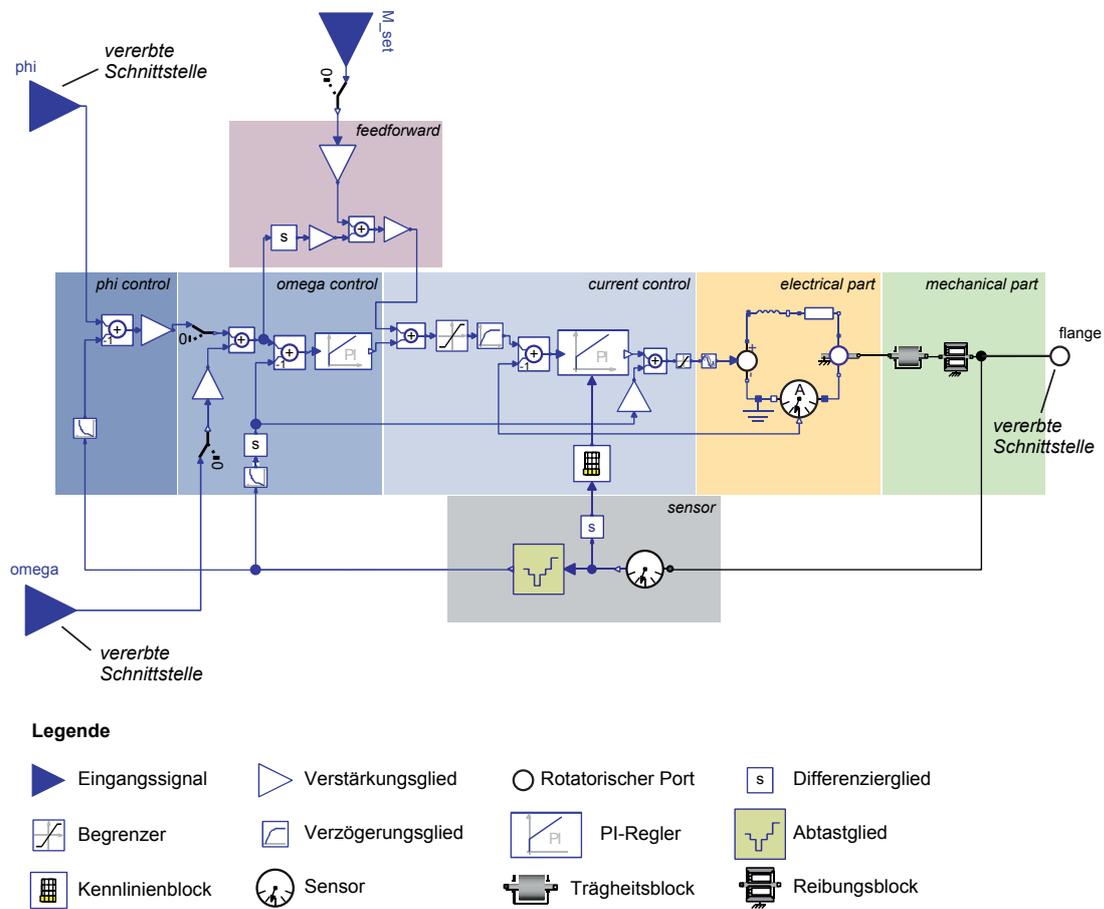


Bild 4-17: Detailliertes Modell eines Servoantriebs in Dymola [GTS14, S. 105] (vgl. auch [Oes18])

Vorsteuerung der Rotorträgheit wird durch einen weiteren Eingang ermöglicht. Das Modell des Servoantriebs besitzt eine motorspezifische Kennlinie und verschiedene Regelparameter, wie sie später auf dem Umrichter eingestellt werden können. Dadurch bildet das Modell das produktspezifische dynamische Verhalten ab. Nebeneffekte wie die Reibung im Motor sind in diesem Modell berücksichtigt.

Das gezeigte Servomotormodell ist aufgrund seiner Eigenschaften und der Darstellungsart nach der Definition (vgl. Abschnitt 4.4, S. 87) der Ebene der Modellierungstiefe $\Gamma = 3$ zuzuordnen. Daher stimmt die Ebene der Modellierungstiefe mit der nach der Methode gewählten Zielmodellierungstiefe $\Gamma_{Ziel} = 3$ überein.

4.8 Zusammenfassung

Im Folgenden wird die zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe entwickelte Methode hinsichtlich der in Abschnitt 2.5.4 gestellten Anforderungen (siehe S. 53) diskutiert.

Die Klassifikation der Modellierungstiefe erfolgt auf Basis der definierten Modellierungsziele im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme in vier Ebenen:

- Ebene 1 – ideale Funktion,
- Ebene 2 – prinzipielle Machbarkeit,
- Ebene 3 – systemspezifisches Verhalten und
- Ebene 4 – Bauteiloptimierung.

In der Systemkonzipierung werden vornehmlich die ersten beiden Ebenen der Modellierungstiefe inkl. der zugeordneten Modellarten eingesetzt. Im disziplinspezifischen Entwurf können Modelle in allen vier Ebenen eingesetzt werden. Mithilfe der Begriffsdefinition, der vier Ebenen der Modellierungstiefe und der Einordnung in den Entwurfsprozess ist die Anforderung nach der Klassifikation der Modellierungstiefe erfüllt.

Zur Wahl der einzelnen Ebenen der Modellierungstiefe wurde im Rahmen der vorgestellten Methode eine Vorgehensweise entwickelt. Im ersten Schritt wird anhand der vorgestellten Modellierungsziele und der Definition der einzelnen Ebenen eine Modellierungstiefe gewählt. Lässt sich dem Modellierungsziel keine eindeutige Ebene der Modellierungstiefe zuordnen, erfolgt anhand der definierten Kriterien die Wahl der Modellierungstiefe. Der Entwickler muss entscheiden, ob das dynamische Verhalten eines Systemelements

- für die Untersuchung relevant ist,
- an der Ausführung einer kritischen Funktion beteiligt ist,
- Bestandteil eines unbekanntem Effekts oder Vorgangs ist oder sein könnte.

Gleichzeitig werden dem Entwickler zu jeder Ebene der Modellierungstiefe Modellklassen empfohlen. Die Methode beinhaltet ein Vorgehensmodell zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe und orientiert sich am Vorgehen bei Modellbildung und -analyse der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04, S. 48]. Zunächst werden in der Zielbestimmung die Modellierungsziele festgelegt. Der Entwickler muss sich fragen, zu welchem Zweck ein Modell eingesetzt werden soll. Gemäß der Festlegung der Modellierungsziele wird eine Zielmodellierungstiefe für das System gewählt. Dieser Schritt dient zur groben Abschätzung der Modellierungstiefe auf der Systemebene. Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung der Modellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente mit der

zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelne Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Wichtig ist, dass die zur Untersuchung des festgelegten Modellierungsziels entscheidenden Systemelemente ausreichend abgebildet werden. In den nächsten Schritten erfolgen Modellsynthese und -analyse. Abschließend wird das Modell in ausreichender Form dokumentiert, wobei insbesondere die Ebene der Modellierungstiefe und die Modellkomplexität erfasst werden. Eine Modelldokumentation ist wichtig, um ggf. Modelle wiederverwenden zu können. Hierdurch kann der Modellierungsaufwand in Folgeprojekten deutlich reduziert werden.

Weiterhin lassen sich mithilfe der hier gezeigten Vorgehensweise erstmalig sowohl die Modellierungstiefe und die Modellkomplexität einzelner Modelle als auch für zusammengesetzte Modelle quantifizieren.

Durch die Anwendung der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel der kooperierenden Delta-Roboter konnte die disziplinübergreifende Gültigkeit der Ebenen nachgewiesen werden. Die im ENTIME-Projekt erstellten Modelle wurden den vier Ebenen der Modellierungstiefe zugeordnet und mit den durch die Methode ermittelten Zielmodellierungstiefen verglichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die entwickelte Methode zur systematischen Wahl einer Modellierungstiefe die gestellten Anforderungen vollständig erfüllt. Die Methode ist erfolgreich in die modellbasierte Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme integriert worden. Darüber hinaus sind die in Abschnitt 3.5 (S. 76) gestellten Fragen beantwortet. Im nächsten Schritt werden die Entwurfsmethodik und die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe auf ein komplexes Beispiel angewendet.

5 Dynamikmodelle im Entwurfsprozess eines Geldautomaten

Der Geldautomat ist ein sehr komplexes mechatronisches System, das aus vielen Einzelkomponenten besteht. Bild 5-1 zeigt zum einen die gewohnte Sicht auf das Bedienfeld und zum anderen das komplexe Innenleben eines Geldautomaten, bestehend aus hochpräziser Feinwerktechnik. Der Funktionsumfang solcher Produkte steigt stetig. Die Integration neuer Funktionen – ob software- oder hardwareseitig – und die Steigerung der Produktqualität bei gleichzeitig wachsenden Ansprüchen an die Funktionalität erfordern neue innovative Entwicklungsmethoden zur Effizienzsteigerung und Komplexitätsbeherrschung.

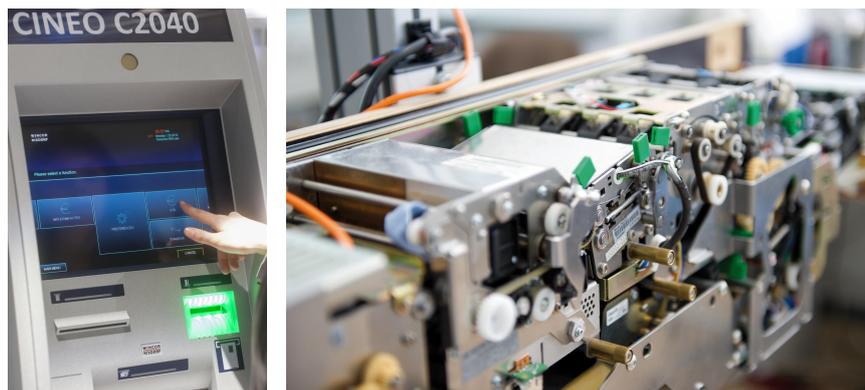


Bild 5-1: Bedienfeld und Innenleben eines Geldautomaten (vom Autor verändert, vgl. [Win14])

Das Ziel dieses Kapitels ist es, die modellbasierte Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (vgl. Kapitel 3) und die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe (Kapitel 4) erfolgreich auf den Entwurf des Geldweges eines Geldautomaten anzuwenden. Weiterhin soll gezeigt werden, wie durch den Einsatz von Dynamikmodellen der Entwurfsprozess von Geldautomaten unterstützt und verbessert wird. In diesem Kapitel werden verschiedene Dynamikmodelle im Entwurfsprozess des Geldautomaten vorgestellt. JUST hat in [Jus14] erfolgreich gezeigt, wie mithilfe von Dynamikmodellen die Komponenten eines Geldautomaten optimiert werden können. Hierzu wurden je nach Entwicklungsstand und Systemwissen Modelle mit verschiedenen Modellierungstiefen zur Optimierung des Vereinzlungsvorgangs in Geldautomaten eingesetzt. Auch XU hat in seiner Arbeit Dynamikmodelle zur Verbesserung des Vereinzlungsvorgangs eingesetzt

(vgl. [Xu11]). In dieser Arbeit wird, beginnend mit der Systemkonzipierung bis hin zur modellgestützten Integration, der gesamte modellbasierte Entwurfsprozess betrachtet. Die Erstellung der Dynamikmodelle erfolgt unter Verwendung der entwickelten Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe. Im ersten Schritt muss geklärt werden, an welchen Stellen des Entwurfsprozesses Dynamikmodelle eingesetzt werden können. Anschließend müssen geeignete Modelle erstellt werden.

Zunächst wird in Abschnitt 5.1 eine kurze Einführung in die Thematik gegeben. Hierzu gehören der prinzipielle Aufbau eines Geldautomaten und die Verarbeitung von Geldnoten. Einige Ergebnisse dieses Kapitels sind in Forschungsprojekten entstanden, die ebenfalls kurz vorgestellt werden. Zur Modellierung des Geldnotentransports existiert ein Simulationsprogramm, das bereits in der Entwicklung von Geldautomaten eingesetzt wird. Zu diesem Programm werden einige Hintergrundinformationen aufgeführt und die für diese Arbeit wichtigsten Modellbibliotheken vorgestellt.

Die weiteren Abschnitte dieses Kapitels befassen sich mit dem Einsatz von Dynamikmodellen in den einzelnen Entwurfsphasen eines Geldautomaten unter Verwendung der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe. In Abschnitt 5.2 erfolgt der modellbasierte Entwurf des Geldweges¹ eines Geldautomaten nach der Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme. Dabei werden spezielle Modelle zur Beschreibung der Dynamik von Komponenten des Geldweges in einem Geldautomaten gezeigt. Im Fokus stehen die Dynamikmodelle des Geldweges und der am Geldweg beteiligten Komponenten. Dabei werden gemäß dem Systemkonzept alle Entwurfsphasen betrachtet und die jeweiligen Modelle des Geldweges sowie geeignete Integrationsstrategien gezeigt. Abschließend wird in Abschnitt 5.3 ein Fazit gegeben.

5.1 Einführung in die Thematik

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Einführung in die Thematik der Geldautomatenentwicklung. Zunächst wird der Aufbau eines Geldautomaten gezeigt. Im Fokus stehen Modelle, die im Wesentlichen zur Beschreibung des Transport- und des Vereinzelungsvorgangs eingesetzt werden. Das Vereinzeln ist das Trennen einer Note von einer Notenmenge. Diese Vorgänge werden auch als Geldnotenverarbeitung zusammengefasst. Einige Ergebnisse sind im Rahmen des Forschungsprojektes „Intelligente vernetzte Systeme für automatisierte Geldkreisläufe“ (In-

¹In dieser Arbeit steht der Begriff Geldweg für den Weg, den eine Geldnote zwischen zwei Speichern zurücklegt, und umfasst alle Verarbeitungsschritte der Geldnote auf diesem Weg, wie z. B. das Vereinzeln, das Transportieren, das Sortieren und die Echtheitsprüfung.

verSa) des Spitzenclusters „Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe“ (it's OWL) [Its15] entstanden.

Aufbau eines Geldautomaten

Es wird zwischen Ein-, Auszahlautomaten und Cash-Recycling-Systemen (CRS) unterschieden. CRS stellen eingezahlte Geldnoten wieder zur Auszahlung bereit. Bild 5-2 zeigt schematisch den Aufbau eines Geldautomaten.

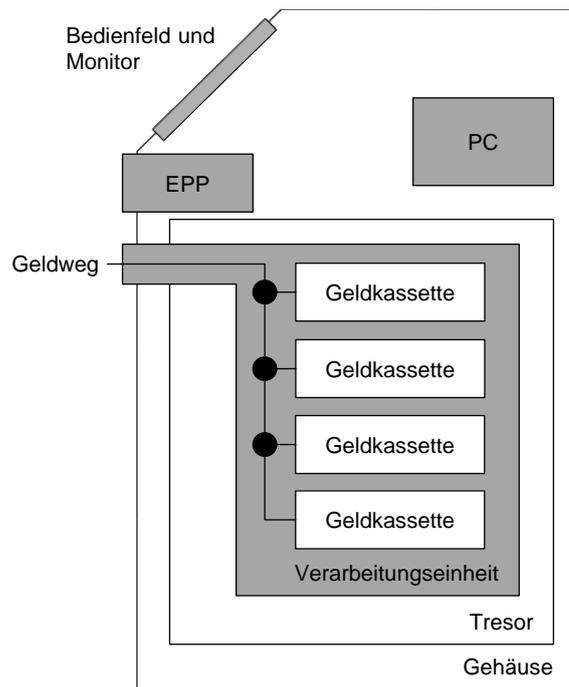


Bild 5-2: Schematischer Aufbau eines Geldautomaten (vom Autor verändert, vgl. [Rot15])

Ein Geldautomat besteht u. a. aus den folgenden Elementen:

- Gehäuse als mechanische Tragstruktur,
- PC inkl. Bedienfeld und Monitor als Schnittstelle zum Benutzer, zum Service-Personal und zur Kommunikation bzw. Vernetzung mit anderen Systemen,
- Encrypting PIN Pad (EPP) zur Erfassung und Verarbeitung der Geheimzahl,
- Tresor,
- Verarbeitungseinheit zum Transportieren und Vereinzeln von Geldnoten,
- mehrere Geldkassetten,

- Firmware zur Steuerung des Automaten (Informationsverarbeitung),
- sichtbare und unsichtbare Sicherheitskonzepte (z. B. Einfärbesysteme für Geldnoten),
- Sensoren (Echtgeldscanner, Lichtschranken) und
- Aktoren (Motoren, Hubmagnete).

In dieser Arbeit steht die in Bild 5-2 schematisch dargestellte Verarbeitungseinheit und insbesondere die mechanische Verarbeitung von Geldnoten mit den daran beteiligten Komponenten im Fokus. Hierzu gehört vor allem die Mechanik zur Verarbeitung der Geldnoten, die u. a. aus Transportwalzen, -bändern und Weichen besteht. Weitere Komponenten sind die Elektronik (Sensoren und Aktoren) und die Steuerung des Geldautomaten. Sie wird auch als Firmware bezeichnet. Die Verarbeitung umfasst im Wesentlichen das Transportieren und das Vereinzeln von Geldnoten im Automaten. Neben der mechanischen Verarbeitung existiert eine informationstechnische Verarbeitung der Geldnoten, etwa die Echtgeldererkennung. Auf diese Art der Verarbeitung wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

Verarbeitung von Geldnoten

Derzeit existieren weltweit über 160 offizielle Währungen [ISO15]. Jede Währung besteht wiederum aus mehreren Scheinen. Geldnoten besitzen eine Vielzahl an Merkmalen und Eigenschaften, welche die Verarbeitung beeinflussen und bei der Entwicklung neuer Verarbeitungsmechanismen berücksichtigt werden müssen. Hinzu kommt die Weiterentwicklung von Geldnoten, um sie fälschungssicherer zu gestalten. Diese Änderungen erfordern ständige Überarbeitungen der Mechanismen im Bereich der Geldnotenverarbeitung.

Einen erheblichen Einfluss bei der Verarbeitung hat die Wahl des Materials, aus dem die Geldnote hergestellt wird. Die Eurobanknoten bestehen beispielsweise aus Baumwollfasern, wohingegen der Kanadische Dollar aus Polymer besteht (siehe Bild 5-3). Einzelne Segmente der Geldnoten reflektieren, sind transparent oder besitzen eine unterschiedliche Profildicke. Dadurch entstehen Segmente mit verschiedenen Reibungseigenschaften (Reibungskoeffizienten), d. h. die Reibwertverteilung über den gesamten Schein ist nicht konstant. Die Verarbeitung der Geldnoten wird zusätzlich durch elektrostatische Aufladung, Umwelteinflüsse oder sonstige Einflüsse, wie z. B. Knicke, Löcher, Risse und Verschmutzungen, erschwert.

Die Aufgabe eines Verarbeitungsmechanismus besteht darin, trotz der großen Variation an Geldnoteneigenschaften und der Einflüsse durch die Umwelt, den Prozess der Verarbeitung erfolgreich und sicher durchzuführen. Die Verarbeitung von Geldnoten besteht, wie bereits erwähnt, im Wesentlichen aus dem Transportieren



Bild 5-3: Zehneuroschein und kanadischer Zehndollarschein

und dem Vereinzeln von Geldnoten. An diesen Vorgängen sind eine Vielzahl an Elementen beteiligt, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Beim Transportieren wird die Geldnote mithilfe von angetriebenen Walzen und Riemen bewegt. Die Geldnoten werden mit einer Geschwindigkeit von bis zu $1,4 \frac{m}{s}$ transportiert. Führungs-/Leitelemente begrenzen den Geldweg, so dass die Geldnoten den vorgesehenen Weg nicht verlassen können. Weichen teilen einen Geldweg in mehrere auf, und Vereinigungen führen mehrere Geldwege zu einem zusammen. Die Geldnoten werden zwischen verschiedenen Medienspeichern transportiert, wie dem Ein-/Ausgabefach, Rollenspeichern und Geldkassetten. Je nach Bauart des Geldautomaten variieren die Speicherformen.

Zur Verarbeitung von Geldnoten werden Antriebs- und Verstellaktoren eingesetzt. Hierzu gehören u. a. DC- und BLDC²-Motoren zum Antreiben der Walzen sowie Hubmagnete und Schrittmotoren zur Verstellung von Weichen. Als Sensoren werden Lichtschranken zur Detektierung von Geldnoten auf dem Geldweg und Hall-Sensoren zur Dickenmessung der Noten verwendet. Des Weiteren überprüft ein Echtgeldscanner die Echtheit der Geldnoten. Die Sensorsignale fließen in der Informationsverarbeitung zusammen, und es werden die Stellgrößen für die Aktoren ermittelt und ausgegeben.

Geldnoten werden i. d. R. einzeln transportiert, weshalb Vereinzelnungsmechanismen zur Trennung einer einzelnen Note von der Notenmenge benötigt werden.

²Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC: *Brushless Direct Current*)

Die Vereinzelungsgeschwindigkeit solcher Vereinzelungseinheiten beträgt 10 Noten pro Sekunde. Bild 5-4 zeigt die schematische Darstellung eines Vereinzelungsmoduls in einem Serienautomaten. Die Geldnoten befinden sich stehend in einer Geldkassette und werden durch einen angetriebenen Andruckschlitten mit einer konstanten Kraft gegen die Abzugswalze gedrückt. Die dargestellten Walzen sind umlaufend mit einem Reibbelag versehen. Die Abzugswalze wird je nach Bedarf mithilfe einer elektromagnetischen Kupplung an einen kontinuierlich laufenden Motor angekoppelt. Treib- und Transportwalze sind direkt mit dem Motor verbunden und drehen sich mit konstanter Drehzahl. Wird eine Geldnote aus der Geldkassette angefordert, erfolgt die Ankopplung der Abzugswalze, und die vordeste Geldnote wird durch einen Schlitz im Boden der Geldkassette nach unten befördert. Während des Abzugs können weitere Geldnoten durch den Schlitz zur Treibwalze gelangen, was zu einem Mehrfachabzug führen kann, der zu großen Problemen bei der weiteren Verarbeitung führen kann.

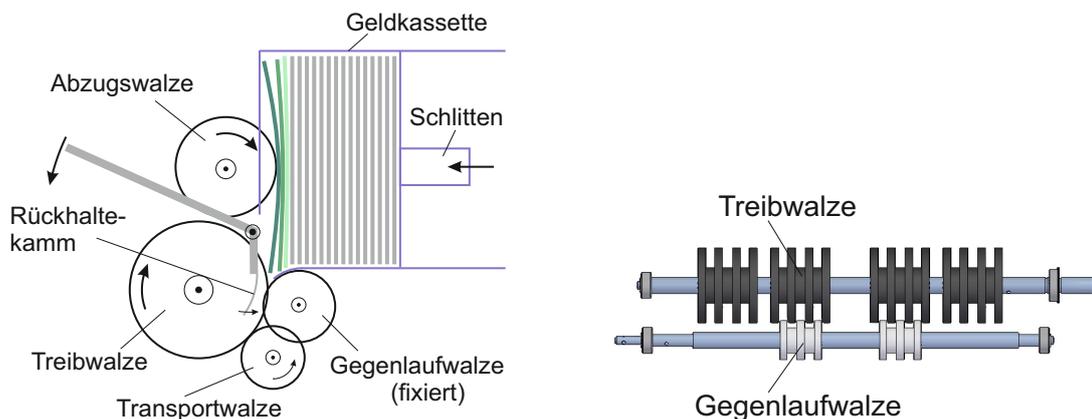


Bild 5-4: Prinzip der Vereinzelungseinheit [Jus14, S. 49]

Um einen Mehrfachabzug zu verhindern, also das Eintreten mehrerer Geldnoten in den Geldweg, existiert ein abrasives Rückhaltesystem in Form einer Gegenlaufwalze. Damit nachfolgende Geldnoten nicht weiter transportiert werden, ist die Gegenlaufwalze in Transportrichtung gesperrt. Zusätzlich sind die Treib- und die Gegenlaufwalze ineinander verschränkt (siehe Bild 5-4 rechts). Der so entstehende Spalt wird auch als Vereinzelungsspalt (V-Spalt) bezeichnet. Im V-Spalt wird den Geldnoten eine dreidimensionale Verformung aufgeprägt. Diese Anordnung der Walzen ermöglicht eine leichtere Trennung der Geldnoten voneinander. Darüber hinaus wird zur Verhinderung eines Mehrfachabzuges ein Rückhalte- kamm mit elastischen Blechen verwendet. Er wird durch einen Elektromagneten an die Gegenlaufwalze gedrückt und klemmt somit die Geldnoten im V-Spalt fest.

Erreicht die erste Geldnote die Transportwalze, wird das durch eine Lichtschranke detektiert. Anschließend werden die Abzugswalze abgekoppelt und der Rückhal-

tekamm auf die Gegenlaufwalze gedrückt. Die oberste Geldnote, die in direktem Kontakt zur Transportwalze steht, wird trotz der Klemmkraft durch den Rückhaltekeamm weitergezogen. Gelangen dennoch zwei oder mehrere Geldnoten zwischen Treib- und Transportwalze, kann ein Mehrfachabzug nicht mehr verhindert werden.

Intelligente vernetzte Systeme für automatisierte Geldkreisläufe

„*InverSa – Intelligente vernetzte Systeme für automatisierte Geldkreisläufe*“ war ein Innovationsprojekt des Spitzenclusters „*Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe*“ (it’s OWL) [Its15]. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Innovationsprojekt wurde in Zusammenarbeit zwischen der Firma Wincor Nixdorf International GmbH³ und dem Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik des Heinz Nixdorf Institutes sowie weiterer Partner bearbeitet. Das Forschungsprojekt befasste sich u. a. mit dem Thema der flexiblen Handhabung von Geldnoten. Ziel war es, die Verarbeitung von Geldnoten bei „unfiten Geldnoten“ robuster zu gestalten. Als unfit werden Geldnoten bezeichnet, die aufgrund äußerer Einwirkungen schwer oder gar nicht von konventionellen Geldautomaten verarbeitet werden können. Es kann sich z. B. um beschädigte, stark verschmutzte oder geknickte Geldnoten handeln. Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden innovative Verarbeitungsmechanismen für Geldnoten entwickelt (siehe [LLO⁺15], [LLT⁺15b]). Eine Variante zur Verarbeitung von Geldnoten ist eine aus konventionellen Komponenten zusammengesetzte Lösung, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher betrachtet wird. An diesem Beispiel wird gezeigt, an welchen Stellen des Entwurfsprozesses eines Geldautomaten der Einsatz von Dynamikmodellen sinnvoll ist. Im Rahmen des Projektes wurden sehr viel mehr Varianten zur Verarbeitung von Geldnoten entwickelt, die an dieser Stelle jedoch nicht näher vorgestellt werden.

5.2 Modellbasierter Entwurf des Geldweges in einem Geldautomaten

Dieser Abschnitt beschreibt den modellbasierten Entwurf des Geldweges eines Geldautomaten. Hierzu werden die modellbasierte Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme (Kapitel 3) und die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe (Kapitel 4) angewendet. Beim Abarbeiten der einzelnen Entwurfsphasen werden nicht alle Prozessschritte in der gleichen Detaillierung gezeigt. Im Fokus stehen die Erstellung von Dynamikmodellen des Geldweges und

³Das Unternehmen fusionierte 2016 mit dem US-amerikanischen Unternehmen Diebold Incorporated zu Diebold Nixdorf Incorporated [DN16].

dessen Komponenten sowie die damit einhergehende Wahl der Modellierungstiefe in den jeweiligen Entwurfsphasen. Die Erstellung von Dynamikmodellen erfolgt vorwiegend in der Systemkonzipierung und im disziplinspezifischen Entwurf. In der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik werden Teilmodelle zur ganzheitlichen Modellvalidierung und zur Systemanalyse zusammengeführt. Die modellgestützte Systemintegration erfolgt ggf. unter Verwendung von Teilmodellen, z. B. im Rahmen einer HiL-Simulation. Die Modellierungstiefen einzelner Komponentenmodelle des Geldweges variieren in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Modell – also vom Modellierungsziel – sehr stark. Wie bereits erwähnt, bezeichnet der Begriff Geldweg den Weg einer Geldnote zwischen zwei Speichern und umfasst u. a. die Verarbeitungsschritte Vereinzeln, Sortieren und Transportieren von Geldnoten. In Bild 5-5 sind verschieden detaillierte Geldwegmodelle entlang der Entwurfsphasen Systemkonzipierung und disziplinspezifischer Entwurf dargestellt. In den weiteren Abschnitten werden diese Modelle genauer betrachtet und deren Einsatzzweck erläutert.

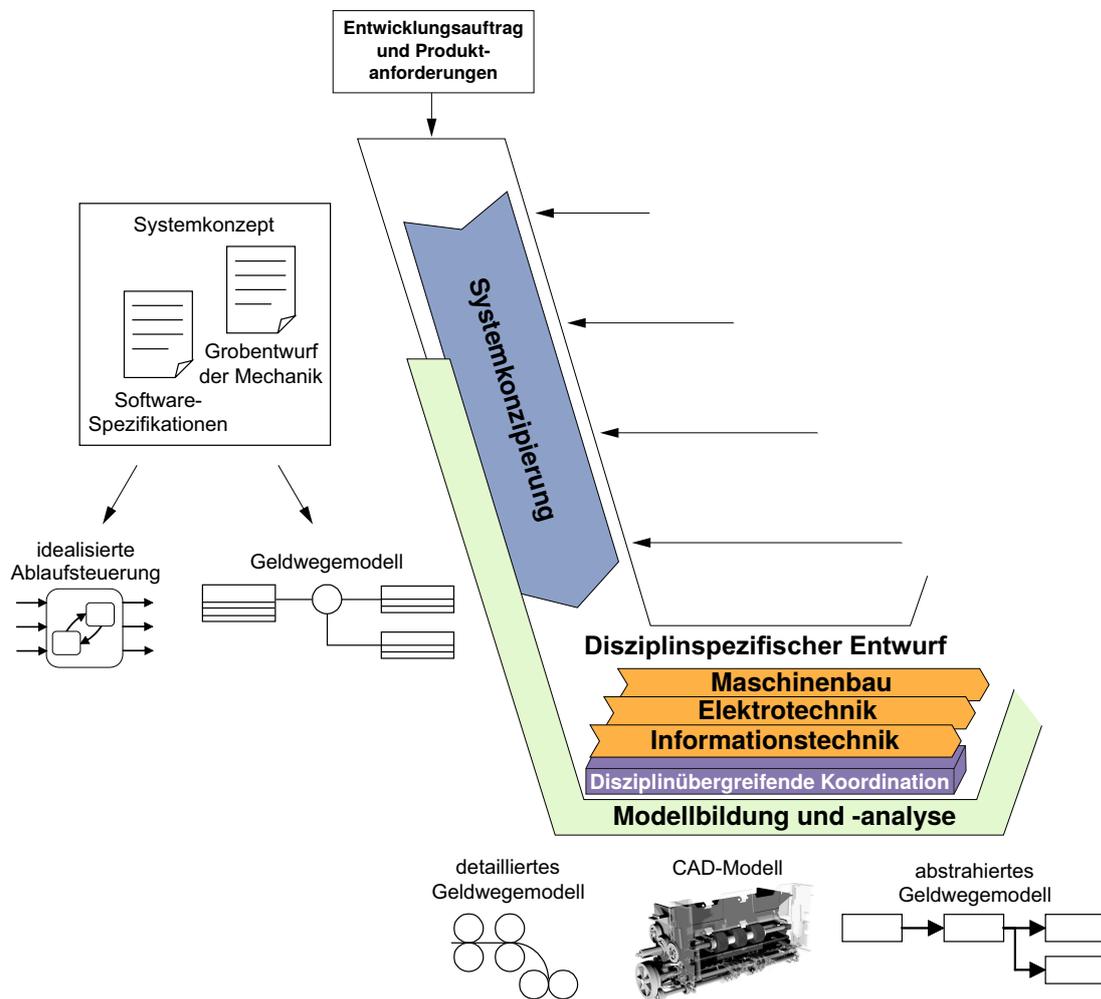


Bild 5-5: Geldwegemodelle entlang des Entwurfsprozesses

5.2.1 Systemkonzipierung des Geldweges

In der Systemkonzipierung erfolgt zunächst die Zielbeschreibung des Geldweges mithilfe der Spezifikationstechnik CONSENS (vgl. Abschnitt 2.4.3, S. 36). Die einzelnen Partialmodelle zum Geldweg werden kurz vorgestellt. Anschließend folgen Synthese und Analyse. Anhand der Partialmodelle wird die Systemdynamik des Geldweges unter idealisierten Randbedingungen entworfen. Das Ziel ist es, den Geldweg grob zu dimensionieren und Anforderungen an die einzelnen Komponenten abzuleiten. Auf Basis der Komponentenanforderungen werden im disziplinspezifischen Entwurf Lösungselemente ausgewählt, und es wird festgelegt, welche Elemente, Teilfunktionen oder Vorgänge genauer betrachtet werden müssen. Das Ergebnis der Entwurfsphase ist die Prinziplösung.

Zielbeschreibung

Der Prozessschritt Zielbeschreibung umfasst die Tätigkeiten Planen und Klären der Aufgabenstellung, Erstellen der Anwendungsszenarien und des Umfeldmodells sowie Erstellen der Anforderungsliste und der Funktionshierarchie. Im Folgenden werden diese Partialmodelle vorgestellt. Abschließend werden Modellierungsziele definiert, d. h. festgelegt, welche Phänomene und Eigenschaften des Geldweges im Rahmen von Simulationen untersucht werden sollen. Aus den Modellierungszielen werden mithilfe der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe geeignete Ebenen abgeleitet.

Planen und Klären der Aufgabenstellung

Das Ziel des Innovationsprojekts InverSa ist die Verarbeitung von Geldnoten robuster zu gestalten (siehe Abschnitt 5.1, S. 129). Bild 5-6 skizziert die grobe Aufgabenstellung des Projektes.



Bild 5-6: Aufgabenstellung des Forschungsprojektes InverSa

Im Wesentlichen geht es darum, eine Menge von Geldnoten mittels eines zu entwickelnden Verarbeitungsmechanismus in zwei Teilmengen zu überführen. Die Zuordnung der Geldnoten zu den beiden Teilmengen erfolgt aufgrund von bestimmten Geldnotenmerkmalen, wie z. B. Wert, Größe oder Denomination. Der Weg von der Geldnotenmenge über den Verarbeitungsmechanismus bis hin zu den Teilmengen wird im Folgenden auch als Geldweg bezeichnet. Auf der Grundlage dieser Aufgabenstellung wird ein Verarbeitungsmechanismus modellbasiert entworfen. Zum Planen und Klären der Aufgabenstellung werden nach der Spezifikationstechnik CONSENS die Partialmodelle Umfeldmodell und Anwendungsszenarien herangezogen.

In Bild 5-7 ist das Umfeldmodell des Verarbeitungsmechanismus dargestellt. Das Bild zeigt einen Auszug des Modells, wobei nur eine Auswahl an Umfeldelementen und Schnittstellen aufgeführt wird.

Das Umfeldmodell besteht aus dem Verarbeitungsmechanismus als Systemelement und den Umfeldelementen: *Speicher A*, *Informationsverarbeitung*, *Speicher B*, *Energiequelle*, *Umwelt*, *Aufhängung*, *Benutzer* und *Geldnote*. Sie sind über die

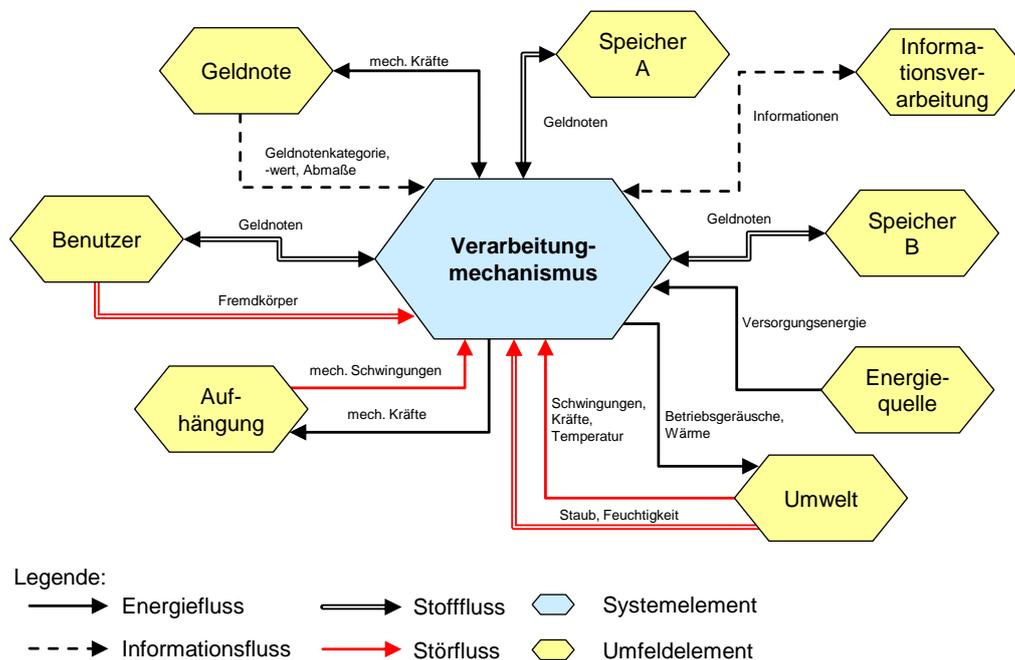


Bild 5-7: Umfeldmodell des Verarbeitungsmechanismus (Auszug)

drei bekannten Flussarten Information, Stoff und Energie miteinander verbunden. Die rot markierten Verbindungen stellen Störflüsse dar. Zu den Störgrößen zählen Fremdkörper, die vom Benutzer beabsichtigt oder unbeabsichtigt in den Mechanismus gelangen, sowie Staub und Feuchtigkeit aus der Umwelt. Weiterhin können Schwingungen, Kräfte und die Temperatur die Funktionsfähigkeit des Mechanismus stören. Zum Stofffluss gehören der Austausch von Geldnoten beim Einzahlen des Benutzers und im Anschluss an die Verarbeitung beim Transportieren der Geldnoten in den jeweiligen Speicher. Energieflüsse sind beispielsweise die Versorgungsenergie oder mechanische Kräfte zwischen einer Geldnote und dem Verarbeitungsmechanismus. Des Weiteren sind auch Betriebsgeräusche und Wärme an die Umwelt Energieflüsse. Der Verarbeitungsmechanismus besitzt eine Informationsverarbeitung, die wiederum über einen Informationsfluss mit einer übergeordneten Informationsverarbeitung (Master) Informationen austauscht. Darüber hinaus existiert ein Informationsfluss zwischen den Medien und dem Mechanismus. Es müssen die Geldkategorie (Denomination), der Wert und die Abmaße der Geldnote identifiziert werden. Im Folgenden gilt es, das Systemelement Verarbeitungsmechanismus zu entwerfen und auszulegen.

Die Umfedelemente und deren Interaktionen bilden den Ausgangspunkt für die Definition von Anwendungsszenarien des Verarbeitungsmechanismus, die bestimmte Betriebssituationen charakterisieren. Der Verarbeitungsmechanismus besitzt

u. a. die folgenden Anwendungsszenarien: *erfolgreiche Verarbeitung*, *fehlerhafte Verarbeitung*, *Transport in Speicher A*, *Transport in Speicher B*, *Detektieren eines Fremdkörpers*, *Identifikation der Geldkategorie*, *des Geldwertes und der Abmaße*. In Tabelle 5-1 ist das Anwendungsszenario *erfolgreiche Verarbeitung* aufgeführt.

Tabelle 5-1: Anwendungsszenario „erfolgreiche Verarbeitung“ des Verarbeitungsmechanismus nach [GTS14, S. 85]

AW: 1	Anwendungsszenario: Erfolgreiche Verarbeitung	05. März 2013
<p>Beschreibung der Situation</p> <p>Die Verarbeitung einer Geldnote durch den Mechanismus war erfolgreich; diese kann einem der beiden Speicher zugeführt werden.</p> <p>Beschreibung des prinzipiellen Verhaltens</p> <p>Eine gewisse Anzahl von Geldnoten werden dem Verarbeitungsmechanismus zugeführt. Die Aktorik erhält von der Informationsverarbeitung alle berechneten Sollgrößen zur Vereinzelung einer Geldnote. Anschließend werden die Geldnotenmerkmale von der Sensorik identifiziert. Auf Basis der Merkmale werden die Sollgrößen der Aktorik bestimmt, und die Geldnote wird einem Speicher zugeordnet und zugeführt.</p>		

Anforderungsliste und Funktionshierarchie erstellen

Aus dem Umfeldmodell, den Anwendungsszenarien und der Aufgabenstellung ergeben sich Anforderungen an den Verarbeitungsmechanismus. Typische Anforderungen sind der Bauraum, die Verarbeitungsgeschwindigkeit pro Geldnote und die Fehlerquote. Auf eine detaillierte Darstellung der Anforderungsliste wird an dieser Stelle verzichtet.

Aus den Anforderungen werden Funktionen des Verarbeitungsmechanismus abgeleitet. Die Hauptfunktion des Mechanismus stellt das Verarbeiten einer Geldnote dar. Die Funktionshierarchie der Verarbeitung (siehe Bild 5-8) gliedert sich in die Hauptfunktionen *Geldnote transportieren*, *Geldnote vereinzeln*, *Geldnote zuordnen* und *Geldnote sensieren*, die wiederum in weitere Unterfunktionen aufgeteilt werden. Das Vereinzeln beschreibt das Trennen einer Geldnote von der Notenmenge. Beim Sensieren werden Eigenschaften und Merkmale der Geldnote erfasst, nach denen entschieden wird, welcher der beiden Teilmengen eine Note zuzuordnen ist.

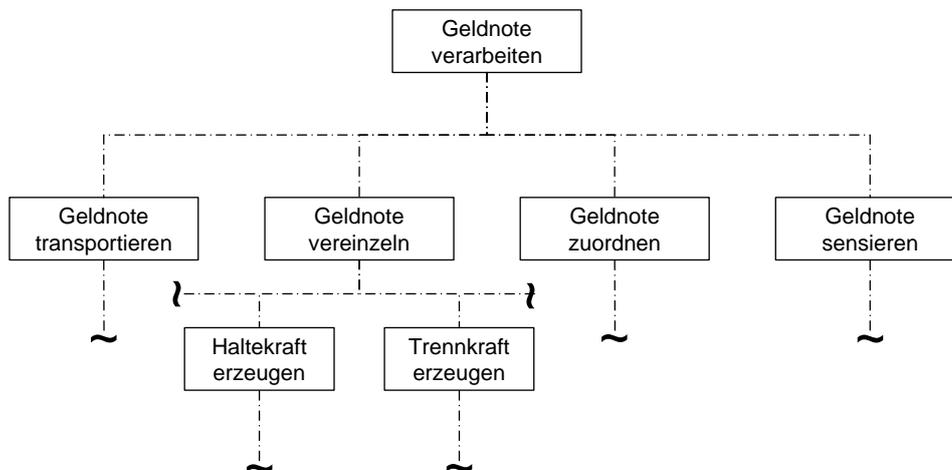


Bild 5-8: Auszug der Funktionshierarchie des Verarbeitungsmechanismus

Modellierungsziele definieren und Zielmodellierungstiefe für System wählen

Bereits in der Zielbeschreibung werden Modellierungsziele definiert. Die folgenden Funktionen des Verarbeitungsmechanismus sollen zur Auslegung des Systems, insbesondere zur Verfeinerung der Anforderungen an die Systemkomponenten, mithilfe von Modellen abgebildet und im Rahmen von Simulationen analysiert werden. Hierzu gehören:

- das Transportieren,
- das Zuordnen und
- das Vereinzeln von Geldnoten.

Ein großer Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass zunächst keine teuren Prototypen des Verarbeitungsmechanismus erstellt werden müssen. Erst wenn der Funktionsnachweis und die Machbarkeitsanalyse des Lösungskonzeptes modellbasiert erbracht sowie detaillierte Anforderungen abgeleitet worden sind, werden Prototypen produziert. Das Vereinzeln von Geldnoten ist ein sehr spezieller Vorgang, der unabhängig von den Untersuchungen zu Transport- und Zuordnungsvorgang in einem eigenen Modell betrachtet werden muss. An dieser Stelle werden exemplarisch das Transportieren und das Zuordnen modellbasiert entworfen. Der modellbasierte Entwurf eines Vereinzelmengensmoduls kann in [Jus14] nachgelesen werden.

Es werden zwei Modellierungsziele für den modellbasierten Entwurf des Verarbeitungsmechanismus definiert:

1. Zunächst erfolgt die idealisierte Auslegung des Grundsystems, nämlich des Geldwegs, das die Grundlage für die dynamischen Vorgänge darstellt. Hier-

zu werden die kinematische und die dynamische Funktionalität des Verarbeitungsmechanismus betrachtet. Die kinematische Funktionalität bestimmt den Bewegungsmechanismus und die Freiheitsgrade des Systems. Das zeitliche Bewegungsverhalten unter der Einwirkung von Kräften und Momenten bestimmt die dynamische Funktionalität des Grundsystems. Ziel ist es, diese Eigenschaften zu gewährleisten und damit die gestellten Anforderungen an die Systemdynamik des Verarbeitungsmechanismus zu erfüllen.

2. In der idealisierten Auslegung des Lösungskonzeptes werden über das Grundsystem hinaus auch die Aktorik, die Sensorik und die Informationsverarbeitung einbezogen. Die Einbeziehung der dynamischen Effekte von Sensorik und Aktorik reicht dabei je nach Einflussbereich von einer idealisierten Betrachtung bis zur vollständigen Vernachlässigung der Systemdynamik. Das entstehende Modell des Verarbeitungsmechanismus dient der Spezifikation von Anforderungen an Aktorik und Sensorik, die anschließend im disziplinspezifischen Entwurf detailliert ausgelegt werden.

Gemäß den beiden Modellierungszielen wird mithilfe der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe (siehe Kapitel 4) eine Zielmodellierungstiefe für das Gesamtsystem des Verarbeitungsmechanismus definiert. Dieser Schritt dient zur groben Abschätzung der Modellierungstiefe auf Systemebene. Der Systemkonzipierung sind die Ebenen ideale Funktion (Ebene 1) und prinzipielle Machbarkeit (Ebene 2) zugeordnet (vgl. Bild 4-3, S. 91). Zur Abbildung der Systemelemente des Verarbeitungsmechanismus mithilfe der ersten beiden Ebenen der Modellierungstiefe werden dem Entwickler u. a. die folgenden Modelltypen nahegelegt (vgl. Abschnitt 4.4, S. 87):

- algebraische Gleichungen und die Heaviside-Funktion zur Beschreibung der idealen Funktion,
- lineare, gewöhnliche Differentialgleichungen (ODE) und differential-algebraische Gleichungssysteme mit einer relativ geringen Anzahl an Parametern für die Ebene der prinzipiellen Machbarkeit.

Sowohl beim Transportieren als auch beim Zuordnen handelt es sich um einen dynamischen Vorgang, so dass die Zielmodellierungstiefe für das Gesamtmodell des Verarbeitungsmechanismus mit $\Gamma_{Ziel} = 2$ gewählt wird. In der Synthese erfolgt nach der Wahl der Lösungsmuster die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente des Verarbeitungsmechanismus mit der zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelne Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden.

Synthese und Analyse

Es folgen Synthese und Analyse des Verarbeitungsmechanismus in der Systemkonzipierung. Im ersten Schritt werden Lösungsmuster zur Erfüllung der einzelnen, zuvor festgelegten (Teil-)Funktionen ausgewählt. Anschließend wird die Wirkstruktur des Verarbeitungsmechanismus erstellt. Im Rahmen der Wirkstruktur werden die Systemelemente mit den bekannten Flussarten Information, Energie und Stoff in Beziehung gesetzt und alle wichtigen Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemelementen erfasst. Auf Grundlage der Wirkstruktur erfolgt die Erstellung der Verhaltensmodelle, die den Schwerpunkt dieses Abschnittes darstellen. Im letzten Schritt werden das Verhalten analysiert und das Systemkonzept für den Verarbeitungsmechanismus bewertet.

Lösungsmuster auswählen und Wirkstruktur erstellen

Zur Erfüllung der einzelnen (Teil-)Funktionen des Verarbeitungsmechanismus müssen geeignete Lösungsmuster ausgewählt werden, die auf unterschiedlichsten physikalischen Effekten beruhen können. Für die Funktion *Geldnote transportieren* existieren beispielsweise die folgenden Lösungsmuster:

- Übertragung von Kräften durch Reibung zwischen der Geldnote und einem Reibungselement,
- Ansaugen der Geldnote durch eine pneumatische Vorrichtung,
- Einsatz eines Transportmediums, in das die Geldnote gelegt wird.

Die Wahl geeigneter Lösungsmuster ist kein Bestandteil dieser Arbeit. Der Fokus liegt auf der methodischen Vorgehensweise, so dass an dieser Stelle der Transport durch Reibungselemente gewählt wird. Es existieren verschiedene Arten von Reibungselementen, wie z. B. Walzen, Riemen- oder Transportbänder. Da erst nach der Analyse des Systemkonzeptes die notwendigen Anforderungen an diese Elemente vorliegen, kann die Festlegung einer speziellen Art von Reibungselementen erst in der disziplinspezifischen Entwurfsphase durch die Wahl von Lösungselementen erfolgen (vgl. Abschnitt 3.2, S. 68).

Nach der Auswahl von Lösungsmustern zur Erfüllung der einzelnen Funktionen wird die Wirkstruktur des Verarbeitungsmechanismus erstellt. Bild 5-9 zeigt exemplarisch einen Auszug aus einer Wirkstrukturvariante. Im Entwurfsprozess des Geldweges sind weitere Varianten des Verarbeitungsmechanismus entstanden. Die Wirkstruktur zeigt grundsätzlich sowohl die Beziehungen von ausgewählten Systemelementen des Verarbeitungsmechanismus zueinander als auch zu den außerhalb der Systemgrenze befindlichen Umfeldelementen. Zu den Umfeldelementen dieser Wirkstrukturvariante gehören u. a. die *Geldnote*, die *Speicher A und B* und ein

Benutzer/Speicher (Bild 5-9). Die Speicher sind über einen Stofffluss mit dem Verarbeitungsmechanismus verbunden. Der Verarbeitungsmechanismus besteht aus drei Transporteinheiten, einer Vereinzelungseinheit zum Trennen der Geldnoten von der Notenmenge sowie einer Sortiereinheit. Die verschiedenen Einheiten sind über den Stofffluss miteinander verbunden und besitzen einen Energiefluss zum Umfeldelement Geldnote. Zur Übertragung einer Kraft auf die Geldnote sind sowohl die Transporteinheiten als auch die Vereinzelungs- und Sortiereinheit mit einem Antriebsaktor verbunden. Beim Sortieren und beim Vereinzeln ist zusätzlich ein Verstellaktor erforderlich. Zur Überwachung des Verarbeitungsvorgangs existieren verschiedene Sensoren, wie z. B. Lichtschranken, welche die Position einer Geldnote detektieren. Darüber hinaus werden Hall-Sensoren⁴ zur Dickenmessung und Echtgeldscanner zur Überprüfung von Geldnotenmerkmalen verwendet. Die Sensorsignale laufen in einer Informationsverarbeitung zusammen, wo Stellgrößen für die Aktorik berechnet werden. Zusätzlich werden Informationen mit einer übergeordneten Informationsverarbeitung (Umfeldelement) ausgetauscht. Die Energieversorgung der Sensorik, der Aktorik und der Informationsverarbeitung wird von einer externen Energiequelle sichergestellt.

⁴Ein Hall-Sensor beruht auf dem von HALL entdeckten Effekt. Dieser beschreibt das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter oder Halbleiter, der sich in einem stationären Magnetfeld befindet [HS12, S. 47 ff.].

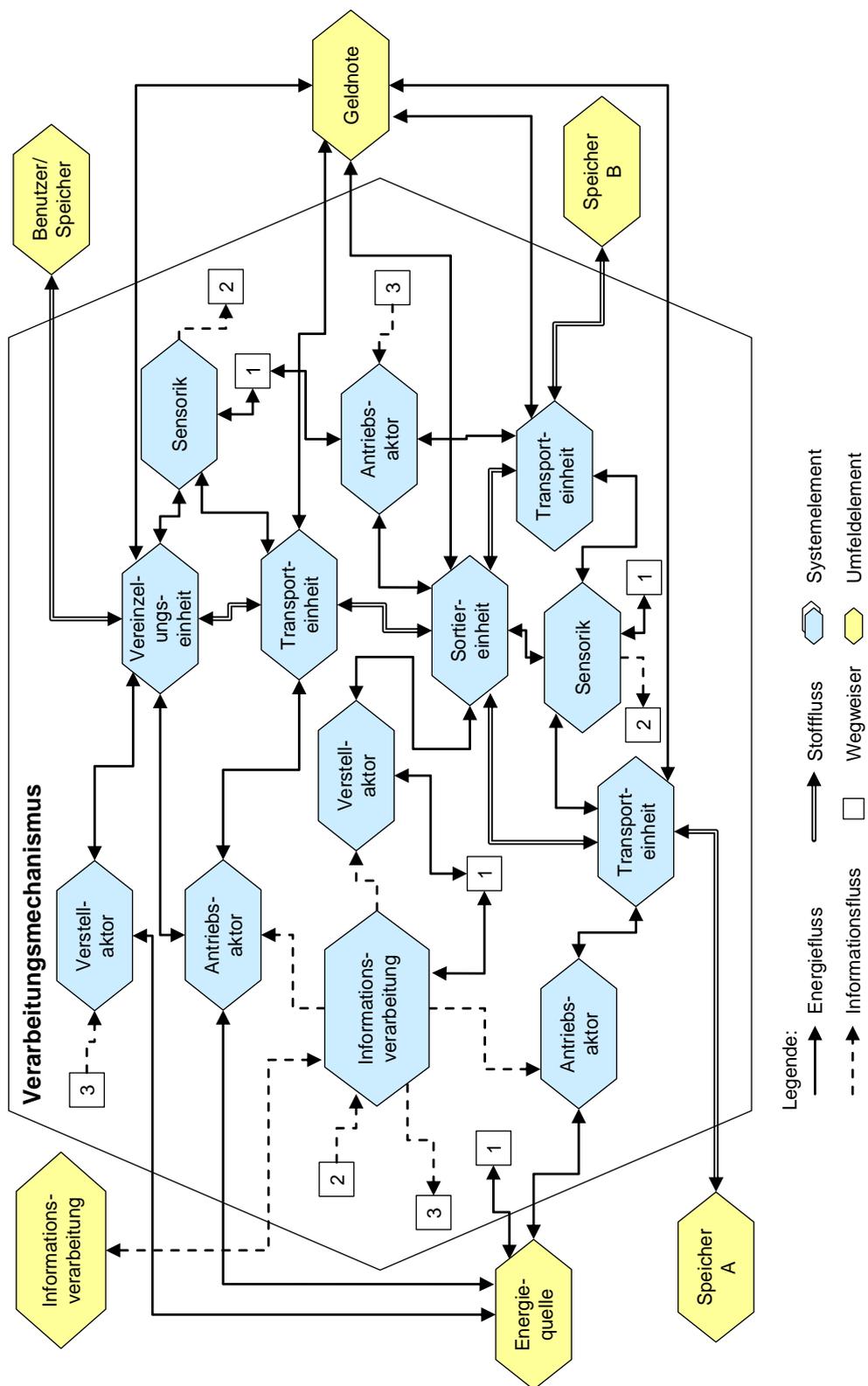


Bild 5-9: Auszug aus der Wirkstruktur des Verarbeitungsmechanismus

Verhaltensmodelle erstellen

Gemäß den beiden in der Zielbeschreibung festgelegten Modellierungszielen für den Verarbeitungsmechanismus und der Auswahl von Lösungsmustern erfolgt zunächst die Wahl der Modellierungstiefe für die einzelnen Systemelemente. Anschließend werden die Systemelemente des Mechanismus in der gewählten Modellierungstiefenebene modelliert.

Identifikation relevanter Systemelemente und Wahl ihrer Modellierungstiefe:

In der Systemkonzipierung des Verarbeitungsmechanismus werden zwei Modellierungsziele verfolgt: die idealisierte Auslegung des Grundsystems (Modellierungsziel 1) und die idealisierte Auslegung des Lösungskonzeptes (Modellierungsziel 2). Für beide Modellierungsziele ist die Zielmodellierungstiefe die Ebene der prinzipiellen Machbarkeit ($\Gamma_{Ziel} = 2$), wie bereits in der Zielbeschreibung definiert. Nach der Wahl der Lösungsmuster erfolgt nun die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente des Verarbeitungsmechanismus mit der zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelnen Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Hierzu stehen dem Entwickler die in der Methode definierten Auswahlkriterien zur Verfügung (vgl. Abschnitt 4.5, S. 102). Es muss abgeschätzt werden, ob das dynamische Verhalten des Systemelementes für das Modellierungsziel relevant ist.

In der idealisierten Auslegung des Grundsystems wird zunächst die Kinematik des Geldweges festgelegt, d. h. die Art, wie sich die Geldnote durch den Verarbeitungsmechanismus bewegt. Anschließend wird die Dynamik betrachtet. Es muss geklärt werden, welche Kräfte und Momente erforderlich sind, damit die Geldnote der Kinematik des Geldweges folgt. Zur Auslegung von Kinematik und Dynamik des Geldweges müssen die folgenden Systemelemente betrachtet werden (siehe auch Bild 5-9):

- Geldnote,
- Energiefluss zwischen Geldnote und Verarbeitungseinheiten,
- Transport-,
- Sortier- und
- Vereinzlungseinheit.

Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung werden in diesem ersten Schritt vernachlässigt. Zur Auslegung des Geldweges wird ein Modell der Geldnote benötigt. Das dynamische Verhalten der Geldnote ist für dieses Modellierungsziel

relevant, und das Modell muss die Modellierungstiefenebene $\Gamma = 2$ besitzen. Gleiches gilt für die Modellierung des Energieflusses in Form eines Kontaktmodells zwischen der Geldnote und den Reibungselementen. Die erforderliche Modellierungstiefenebene ist $\Gamma = 2$. Die Transporteinheit umfasst antreibende Reibungselemente, welche die Geldnote bewegen, und leitende Reibungselemente. Letztere dienen dazu, dass die Geldnote den Geldweg nicht verlassen kann. Die Reibungselemente sind dynamisch relevant und müssen in der Ebene $\Gamma = 2$ abgebildet werden. Die Sortiereinheit besteht aus einem Eingang und zwei Ausgängen. Jeder Ausgang ist über eine Transporteinheit mit dem Eingang verknüpft. Das Umschalten zwischen den Verknüpfungen ist in Bezug auf die im Geldweg erforderlichen Kräfte dynamisch nicht relevant. Die Modellierungstiefenebene des Umschaltens ist somit die ideale Funktion ($\Gamma = 1$). Wie bereits bei der Definition der Modellierungsziele beschrieben, wird die Funktion Vereinzeln bzw. der dynamische Vorgang des Vereinzeln in einem separaten Modell betrachtet. Die Modellierungstiefenebene wird daher mit $\Gamma = 1$ festgelegt.

In der idealisierten Auslegung des Lösungskonzeptes (Modellierungsziel 2) werden über das Grundsystem hinaus auch die Aktorik, die Sensorik und die Informationsverarbeitung einbezogen. Hierzu gehören Modelle von Verstell-, Antriebsaktoren, Lichtschranken und Hall-Sensoren. Zur Auswertung der Sensorsignale und zur Berechnung der Stellgrößen für die Aktorik ist ein Modell der Informationsverarbeitung erforderlich. Die Grobauslegung des Lösungskonzeptes erfolgt unter idealisierten Randbedingungen, weshalb das dynamische Verhalten dieser Systemelemente nicht relevant ist. Eine Modellierung dieser Systemelemente in der Modellierungstiefenebene der idealen Funktion ($\Gamma = 1$) ist daher ausreichend. Die Modellierungstiefe des Grundsystems bleibt unverändert.

Annahmen und Modellierungsart für ein Geldwegemodell: Bevor die einzelnen Systemelemente modelliert werden, müssen zunächst einige Annahmen für das Geldwegemodell getroffen werden. Die Modellierungsart wird zum einen durch die Wahl der Modellierungstiefe und zum anderen durch die definierten Modellierungsziele beeinflusst. Die Zielmodellierungstiefe beträgt für beide Modellierungsziele $\Gamma = 2$. Die Ziele sind die kinematische und dynamische Auslegung des Grundsystems sowie die idealisierte Auslegung des Lösungskonzeptes unter Einbeziehung von Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung. Das Geldwegemodell soll die Bewegung einer Geldnote entlang des Geldweges unter dem Einfluss von Kräften, wie z. B. Reibungskräften, abbilden. Zur Modellierung großer Bewegungsvorgänge von starren Körpern unter dem Einfluss äußerer Kräfte und Momente eignen sich die Mehrkörpersysteme (MKS) [Jan10, S. 221]. Mithilfe von MKS-Modellen lassen sich physikalische Effekte in der Modellierungstiefenebene 2 abbilden (vgl. Abschnitt 4.4, S. 87), so dass sich diese Modellierungsart

für ein Modell des Geldweges eignet. Daraus resultiert die Annahme, dass sowohl die Geldnote als auch die Reibungselemente als starr angenommen werden. Die elastischen Verformungen werden mithilfe von Federn modelliert, plastische Verformungen werden vernachlässigt. Eine weitere Annahme betrifft die Bewegungsrichtung der Geldnoten. Bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. den Schiefzug einer Geldnote, lassen sich alle wichtigen Phänomene, die das Vereinzeln, Transportieren und Sortieren betreffen, in der Ebene darstellen. Die dreidimensionale Bewegung der Geldnote in einem Geldautomaten wird daher zunächst auf eine zweidimensionale Bewegung approximiert. Diese Annahme wird auch durch JUST et al. gestützt (vgl. [JLT⁺07]).

Es existieren verschiedene Programme zur Simulation von MKS. Hierzu gehört u. a. die Software *RecurDyn*. Der Name *RecurDyn* ist eine Abkürzung für „Recursive Dynamics“. *RecurDyn* ist ein Mehrkörpersimulationsprogramm der Firma FunctionBay Inc. [Fun14] und kombiniert die Mehrkörperdynamik mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). Es können Starrkörpersimulationen, FE-Analysen und flexible Mehrkörpersimulationen (MFBD: Multi-Flexible Body Dynamics) durchgeführt werden. Zur Simulation solcher Systeme verwendet *RecurDyn* einen rekursiven Newton-Euler-Algorithmus, der von BAE und HAUG entwickelt und optimiert wurde (vgl. [BH86a], [BH86b], [BH87]).

Das Bild 5-10 zeigt exemplarisch ein zweidimensionales MKS-Modell des Geldweges.

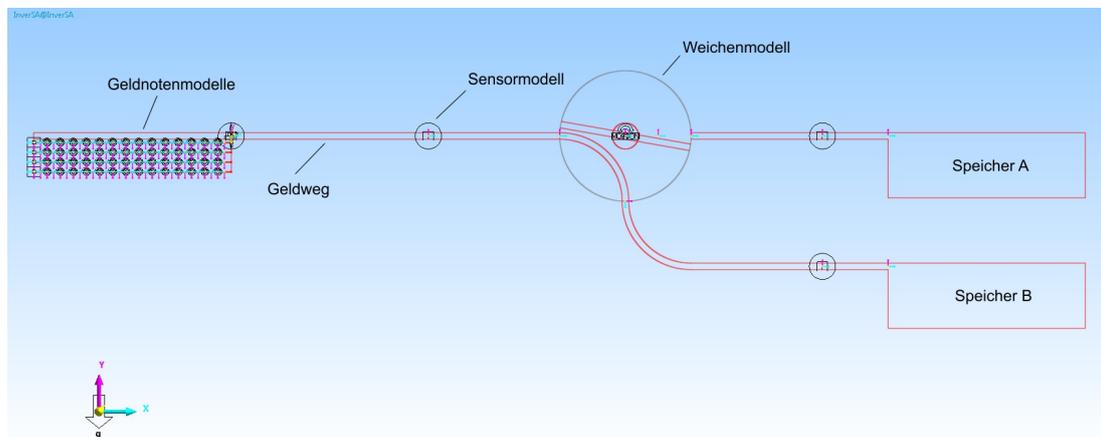


Bild 5-10: Zweidimensionales MKS-Modell des Geldweges in *RecurDyn*

Das Modell umfasst verschiedene Teilmodelle. Die Geldnotenmodelle werden über den rot markierten Geldweg (Transporteinheitmodelle) zur Sortiereinheit in Form eines Weichenmodells (schwarzer Kreis) transportiert. Weiterhin sind Modelle der beiden Speicher A und B (vgl. Bild 5-9, S. 139) sowie Sensormodelle (umrandetes

Die einzelnen Starrkörper (Papiersegmente) besitzen eine Länge l_{seg} , eine Dicke t_{seg} sowie eine Masse m_{papier} und eine Massenträgheit Θ_{seg} . Die Masse und das Trägheitsmoment eines Papiersegments werden folgendermaßen berechnet [Rec14]:

$$m_{seg} = \frac{\rho_{papier} \cdot l_{seg} \cdot t_{seg}}{n_{seg}} = \frac{m_{papier}}{n_{seg}}, \quad (5-1)$$

$$\Theta_{seg} = m_{seg} \cdot \frac{t_{seg}^2 + l_{seg}^2}{12}. \quad (5-2)$$

Da es sich um ein zweidimensionales Modell handelt, wird die Breite eines Papiersegments in *RecurDyn* auf $b_{seg} = 1 \text{ mm}$ normiert (vgl. auch [Jus14, S. 63]). Aus diesem Grund müssen laut JUST auch alle Massen, Kräfte und Momente auf diese Segmentbreite normiert werden. Eine weitere Maßnahme ist die Verwendung eines planaren Gelenks (siehe Bild 5-11). Dadurch wird die Bewegungsmöglichkeit der Starrkörper auf die Freiheitsgrade in der Ebene beschränkt, also eine Bewegung in Raumrichtung verhindert. Die Freiheitsgrade des Geldnotenmodells sind $f = 3 \cdot n_{seg} - 2 \cdot n_{dg}$, wobei $n_{dg} = n_{seg} - 1$ die Drehgelenkzahl darstellt.

Die Elastizität der Geldnote wird mithilfe der Drehgelenke abgebildet. Die Drehfedersteifigkeit wird aus dem Elastizitätsmodul (E-Modul) des Papiers E_{papier} und den geometrischen Abmaßen des Papiersegments berechnet. Die Drehdämpferkonstante wird aus der strukturbedingten Dämpfungskonstante von Papier d_{strukt} und der Drehfederkonstante berechnet. Dies ist eine Näherung, die bei linear-elastischen Werkstoffen und stationär harmonischen Schwingungen zulässig ist (vgl. [Bee94, S. 15 ff.] und [SGM08, S. 88 ff.]). Die Drehfeder- und -dämpferkonstante werden durch die folgenden Gleichungen bestimmt [Rec14]:

$$c_{dreh} = \frac{E_{papier} \cdot t_{seg}^3}{12 \cdot l_{seg}} \cdot b_{seg}, \quad (5-3)$$

$$d_{dreh} = d_{strukt} \cdot c_{dreh}. \quad (5-4)$$

Daraus ergibt sich folgendes Moment in einem Drehgelenk zwischen den Starrkörpern i und $i + 1$:

$$M_{dreh, i, i+1} = c_{dreh} \cdot \Delta\varphi_{i, i+1} + d_{dreh} \cdot \Delta\dot{\varphi}_{i, i+1}. \quad (5-5)$$

Das MKS-Modell der Geldnote besteht somit aus den geometrischen Parametern Länge und Dicke sowie den materialspezifischen Parametern E-Modul, Masse bzw. Dichte und Strukturdämpfung. Zur Simulation müssen diese Parameter ermittelt werden. Euroscheine besitzen beispielsweise Längen von 120 mm bis 160 mm bei einer Dicke von $0,1 \text{ mm}$ und einem Gewicht von ca. 1 Gramm [EZB14]. Der Elastizitätsmodul kann nach *DIN EN ISO 1924-2* ermittelt werden [DIN09b] und beträgt z. B. für eine Eurobanknote etwa $3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Kontaktmodell: Die Energieflüsse zwischen der Geldnote und den jeweiligen Reibungselementen der Verarbeitungseinheiten (Vereinzelungs-, Transport- und Sortiereinheit) sind ein wesentlicher Bestandteil des Geldwegemodells und für die weiteren Betrachtungen der Dynamik im Rahmen der Systemkonzipierung von enormer Bedeutung. Aus diesem Grund ist ein Modell mit der Modellierungstiefenebene $\Gamma = 2$ gefordert. Zur Modellierung des Energieflusses ist ein Kontaktmodell erforderlich.

Kontakte werden bei MKS-Modellen häufig mithilfe eines Feder-Dämpfer-Paares modelliert (Bild 5-12). Der Kontakt entsteht, wenn ein Körper in einen anderen Körper mit einer Eindringtiefe δ eindringt. Bild 5-12 zeigt die Überschneidung zweier Körper und den Kontaktpunkt als Approximation eines Flächenkontakts. Dies ist eine gängige Annahme, die bei der Modellierung von Kontakten im Bereich der Mehrkörperdynamik häufig eingesetzt wird (siehe auch [Hip04, S. 44 ff.] oder [RS10, S. 32 ff.]).

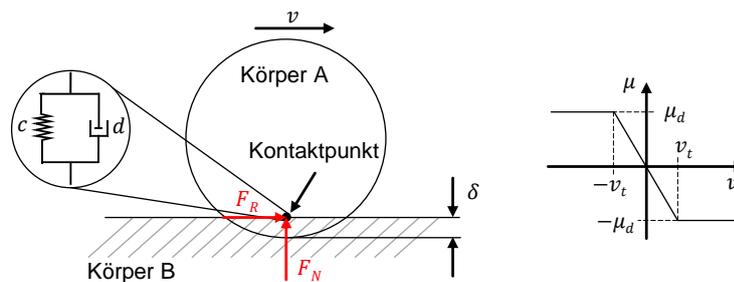


Bild 5-12: Kontaktmodell und geschwindigkeitsabhängiger Reibungskoeffizient (vom Autor verändert, vgl. [Rec14, S. 548])

Im Kontaktpunkt entsteht eine Kontaktkraft, die sich aus einem Normalkraft- und einem Reibungskraftanteil zusammensetzt:

$$\underline{F}_K = \begin{pmatrix} F_R \\ F_N \end{pmatrix}. \quad (5-6)$$

Die Normalkraft setzt sich in Abhängigkeit der Eindringtiefe δ und der Eindringgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ aus einem linearen Feder-Dämpfer-Paar zusammen und besitzt eine Kontaktsteifigkeit c_{kon} sowie eine Kontaktdämpfung d_{kon} (vgl. [Hip04, S. 44 ff.] und [RS10, S. 32 ff.]):

$$F_N = c_{kon} \cdot \delta + d_{kon}(\delta) \cdot \dot{\delta}, \quad (5-7)$$

$$d_{kon}(\delta) = d_{max} \cdot \delta.$$

Die Dämpfungskonstante hängt von der Eindringtiefe ab. Dadurch sollen unerwünschte Effekte beim Kontaktlösen vermieden werden. Die Reibungskraft wird nach dem Coulombschen Reibungsgesetz aus dem Produkt der Normalkraft und dem geschwindigkeitsabhängigen Reibungskoeffizienten $\mu(v)$ bestimmt:

$$F_R = \mu(v) \cdot F_N. \quad (5-8)$$

Bild 5-12 zeigt den Verlauf des Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der beiden Körper A und B. Bei Geschwindigkeiten unterhalb einer Grenzwgeschwindigkeit ($|v| < v_t$) verhält sich der Reibungskoeffizient proportional zur Relativgeschwindigkeit. Ist der Betrag der Relativgeschwindigkeit größer als der Schwellenwert, so wird der Reibungskoeffizient als konstant angenommen. Mithilfe der aufgeführten Gleichungen entsteht ein idealisiertes, eindimensionales Kontaktmodell.

Antreibende und leitende Reibungselemente: Unter der Bezeichnung antreibende und leitende Reibungselemente werden an dieser Stelle alle Komponenten in einem Geldweg zusammengefasst, die in irgendeiner Art und Weise in direktem Kontakt zur Geldnote stehen. Diese Komponenten werden sowohl in den Transport- als auch in den Sortier- und Vereinzelungseinheiten eingesetzt. Zu den antreibenden Elementen gehören Walzen, Riemen oder Transportbänder, welche die Geldnote bewegen. Die leitenden Elemente hindern die Geldnote daran, den gewünschten Geldweg zu verlassen. Das dynamische Verhalten der antreibenden und leitenden Reibungselemente ist für die zuvor definierten Modellierungsziele relevant (siehe Zielbeschreibung). Aus diesem Grund ist ein Modell der Reibungselemente mit der Modellierungstiefenebene $\Gamma = 2$ gefordert. Da erst nach der Analyse des Systemkonzeptes die notwendigen Anforderungen an die Reibungselemente vorliegen, kann die Festlegung einer speziellen Art von Reibungselementen erst in der disziplinspezifischen Entwurfsphase durch die Wahl von Lösungselementen erfolgen. Die Verwendung von Walzen- oder Transportbandmodellen setzt exakte Positionen und Abstände zwischen den Walzen oder Transportbändern voraus, damit die Geldnote über den gesamten Geldweg transportiert werden kann. Diese Angaben stehen in dieser frühen Entwurfsphase noch nicht fest. Es wird daher eine Möglichkeit gesucht, die verschiedenen Arten von Reibungselementen in einem Lösungsmustermodell zusammenzufassen. Die Vorteile bei dieser Vorgehensweise sind geringere Modellierungstiefe und Modellkomplexität sowie eine deutlich geringere Anzahl an Parametern. Erst nachdem die Kinematik des Geldweges im Rahmen der Verhaltensanalyse überprüft und bewertet worden ist (z. B. Radien), erfolgt im disziplinspezifischen Entwurf die Auswahl der Lösungselemente und damit eine exakte Positionierung. Die Anforderungen an die Reibungselemente und an die zugehörige Antriebsaktorik lassen sich aus diesen Modellen ableiten.

Das MKS-Programm *RecurDyn* stellt für diesen Ansatz zur Modellierung der antreibenden und leitenden Reibungselemente sogenannte „Guides“ oder „Guide-Elemente“ zur Verfügung. Sie bilden Reibungselemente ideal ab und besitzen weder eine Masse noch eine Massenträgheit. Es stehen lineare und kreisbogenförmige Reibungselemente zur Auswahl (siehe auch Bild 5-10, S. 142). Zwischen den Geldnotensegmenten und den Guide-Elementen ist ein Kontakt definiert. Die Normal- und die Reibungskraft werden nach den Gleichungen 5-7 und 5-8 berechnet.

Zur Effizienzsteigerung der Kontaktberechnung existiert nur zwischen dem kreisförmigen Teil des Geldnotensegments und dem Reibungselement ein Kontaktpunkt. Bild 5-13 zeigt die Kontaktpunkte zwischen einem linearen Reibungselement und zwei Geldnotensegmenten.

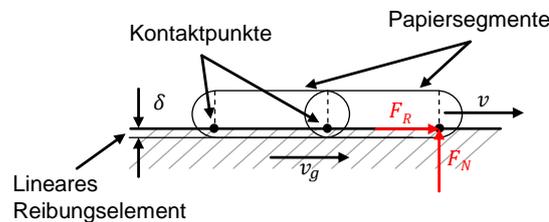


Bild 5-13: Kontaktpunkte zwischen Papierssegment und einem linearen Reibungselement (vom Autor verändert, vgl. [Rec14, S. 555])

Für den Transport der Geldnote kann an den jeweiligen Reibungselementen eine Oberflächengeschwindigkeit v_g (Guide-Geschwindigkeit) definiert werden. Die Geschwindigkeit wird im Kontaktpunkt zwischen Geldnotensegment und Reibungselement auf das Geldnotensegment übertragen. Die Definition einer Oberflächengeschwindigkeit beeinflusst die Berechnung der Reibungskraft bzw. die Berechnung der Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibungspartnern. Die geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft lautet daher:

$$F_R = \mu(v - v_g) \cdot F_N. \quad (5-9)$$

Zur Optimierung der Simulationszeit ist die Kontaktsteifigkeit abhängig vom Abstand zu einem Reibungselement, d. h. die Kraft wird nicht kontinuierlich während der gesamten Simulation berechnet, sondern erst, wenn sich ein Geldnotensegment in unmittelbarer Nähe zum Reibungselement befindet:

$$F_N = c_{kon}(x) \cdot \delta + d_{kon}(\delta) \cdot \dot{\delta}. \quad (5-10)$$

Der qualitative Verlauf der Kontaktsteifigkeit in Abhängigkeit des Abstands ist in Bild 5-14 dargestellt. Die Kontaktsteifigkeit ist Null, wenn sich ein Geldnotensegment außerhalb des Intervalls $] -\epsilon_g, l_g + \epsilon_g[$ befindet. Innerhalb eines Toleranzintervalls erreicht die Steifigkeitskonstante das Maximum. Die Übergänge

werden mithilfe einer kubischen Funktion angenähert, damit die Steifigkeit nicht sprunghaft auftritt.

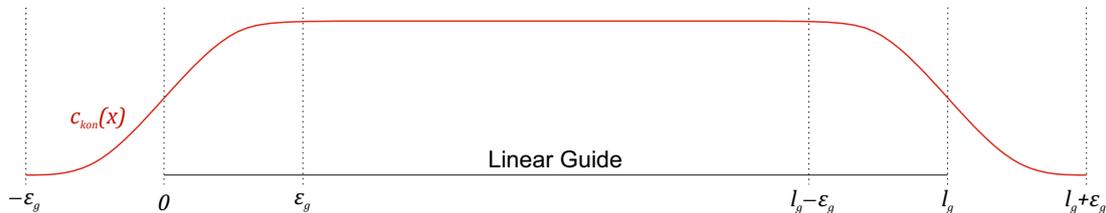


Bild 5-14: Qualitativer Kontaktsteifigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Weges am Beispiel eines linearen Guide-Elements (vgl. [Rec14, S. 552 ff.])

Die Steifigkeit in Abhängigkeit des Abstands x zum Reibungselement ist folgendermaßen definiert:

$$c_{kon}(x) = \begin{cases} 0, & \text{für } x < -\epsilon_g \\ c_{max} \cdot \left(\frac{x+\epsilon_g}{2 \cdot \epsilon_g}\right)^2 \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{x+\epsilon_g}{2 \cdot \epsilon_g}\right), & \text{für } -\epsilon_g \leq x \leq \epsilon_g \\ c_{max}, & \text{für } \epsilon_g < x < l_g - \epsilon_g \\ c_{max} - c_{max} \cdot \left(\frac{x-l_g+\epsilon_g}{2 \cdot \epsilon_g}\right)^2 \cdot \left(3 - 2 \cdot \frac{x-l_g+\epsilon_g}{2 \cdot \epsilon_g}\right), & \text{für } l_g - \epsilon_g \leq x \leq l_g + \epsilon_g \\ 0, & \text{für } x > l_g + \epsilon_g \end{cases} .$$

Durch die Verwendung der Guide-Elemente lassen sich die verschiedenen Arten von Reibungselementen in einem allgemeineren Lösungsmustermodell zusammenfassen. Trotzdem sind die wesentlichen Funktionen Leiten und Antreiben der Geldnote abgebildet. Zusammenfassend kann über die Modellierungstiefebene der idealen Reibungselemente Folgendes festgestellt werden:

- Die Modellierungstiefebene der Guide-Elemente ist die ideale Funktion ($\Gamma = 1$).
- Erst durch die Verwendung des Kontaktmodells zwischen der Geldnote und dem in den Guide-Elementen berechneten Kontaktpunkt wird aus dem „Modellverbund“ die Modellierungstiefebene der prinzipiellen Machbarkeit ($\Gamma = 2$).

Modellierung des Grundsystems (Modellierungsziel 1): An dieser Stelle erfolgt die Modellierung des Grundsystems, bestehend aus den in der Wirkstruktur dargestellten Transport-, Sortier- und Vereinzelungseinheiten sowie den Speichern (siehe Bild 5-9, S. 139). Die Modelle setzen sich aus den zuvor beschriebenen Elementen zusammen. Bild 5-15 zeigt schematisch den Modellaufbau der einzelnen Verarbeitungseinheiten.

In einem Modell des Geldnotenspeichers können beliebig viele Geldnotenmodelle hinterlegt werden. Die Geldnotenmodelle werden in Abhängigkeit einer definierten Vereinzlungsgeschwindigkeit $v_{vereinz}$ in die Startposition befördert und anschließend mithilfe einer Transporteinheit transportiert. Auf eine detaillierte Modellierung des Vereinzlungsvorgangs wird an dieser Stelle verzichtet, da so eine unnötige Erhöhung der Modellkomplexität entstehen würde. Eine detaillierte Analyse des Vereinzlungsvorgangs kann i. d. R. unabhängig vom Rest des Geldwegs erfolgen.

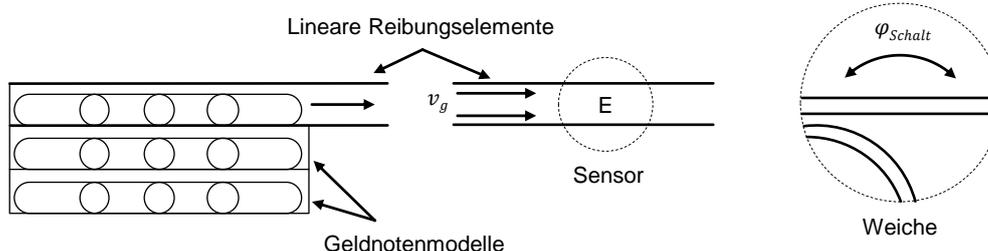


Bild 5-15: Modell des Speichers mit idealisierter Vereinzlungseinheit, der Transporteinheit und der Sortiereinheit

Eine Transporteinheit besteht aus antreibenden Reibungselementen mit einer definierten Geschwindigkeit v_g , mit der die Geldnote transportiert wird, wie in Bild 5-15 schematisch dargestellt. Zur Modellierung des Verarbeitungsmechanismus sind drei Transporteinheiten erforderlich.

Die Sortiereinheit besitzt einen Eingang und zwei Ausgänge. Sie besteht aus zwei weiteren Transporteinheiten und einem Verstellmechanismus. Die Verstellung zwischen den beiden Transportrichtungen wird mithilfe eines Drehgelenks abgebildet. Der Verstellwinkel φ_{Schalt} muss vor jeder Simulation vorgegeben werden. Der Umschaltvorgang ist kein Bestandteil des Grundsystems, sondern wird im Rahmen des zweiten Modellierungsziels berücksichtigt.

Modellierung des Lösungskonzeptes (Modellierungsziel 2): Das Modellierungsziel umfasst die Auslegung des Lösungskonzeptes, bei dem das Grundsystem unter Einbeziehung von Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung betrachtet wird. Ein Geldweg besitzt verschiedene Aktoren und Sensoren. Die Aktoren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: in Aktoren für den Antrieb und in Verstellaktoren, die zur Veränderung der Weichenstellung eingesetzt werden. Zu den Sensoren gehören beispielsweise Lichtschranken, Encoder, Hall-Sensoren oder Echtgeldscanner. Die erforderliche Modellierungstiefe von Aktorik und Sensorik ist bereits mit der idealen Funktion ($\Gamma = 1$) gewählt worden. Es wird angenommen, dass die gemessenen Signale in der gewünschten Güte vorliegen und die

Aktoren die benötigten Stellgrößen stellen können. Eine detaillierte Auslegung von Sensorik und Aktorik erfolgt erst im disziplinspezifischen Entwurf.

Die Aktoren werden als ideale Stellglieder modelliert. Sensoren werden ebenfalls ideal abgebildet. Hierzu gehören Ereignissensoren, Positions- und Geschwindigkeitssensoren. Bei dem in Bild 5-15 dargestellten Sensor handelt es sich um einen Ereignis-, der in einem vorab definierten Messbereich den Ein- und den Austritt eines Geldnotenmodells erfasst. Damit lassen sich z. B. Lichtschranken abbilden. Des Weiteren ist ein idealisiertes Modell der Informationsverarbeitung erforderlich, das die in der Zielbeschreibung definierten Anwendungsszenarien enthält (siehe Bild 5-1, S.134). Sie werden auch als „Use Cases“ bezeichnet. Mithilfe dieser Use Cases werden Sollgrößen für die Aktoren festgelegt, wie z. B. Schaltwinkel und -zeiten für die Verstellaktoren sowie Winkel, -geschwindigkeiten oder -beschleunigungen für Antriebsaktoren. Der Auszug eines Anwendungsfalls lautet wie folgt: Transportieren der *Geldnote 1* vom *Benutzer/Speicher* in den *Speicher A* und der *Geldnote 2* vom *Benutzer/Speicher* in den *Speicher B* (vgl. Bild 5-9, S.139). Hat die *Geldnote 2* den *Sensor 2* passiert, müssen die Sortiereinheit um den Winkel $\varphi_{Schalt} = \frac{\pi}{2}$ verstellt und der Antrieb der *Transporteinheit 2* eingeschaltet werden.

Bild 5-16 zeigt in Anlehnung an die Darstellung eines mechatronischen Systems (Bild 2-3, S. 18) schematisch das Gesamtmodell, bestehend aus der Ablaufsteuerung, dem zuvor beschriebenen Geldwegemodell und der idealisierten Sensorik und Aktorik. Sie können, je nach Bedarf und Modellierungsziel, im weiteren Verlauf des Entwurfs durch detailliertere Modelle ersetzt werden. Das dynamische Verhalten von Sensorik und Aktorik könnte z. B. durch Verzögerungsglieder 1. Ordnung (PT1) berücksichtigt werden.

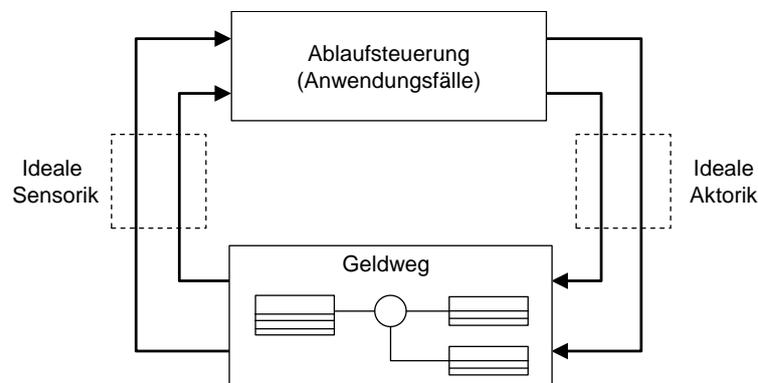


Bild 5-16: Schematische Darstellung des Gesamtmodells

Verhalten analysieren und Systemkonzept bewerten

Im Anschluss an die Synthese erfolgen Analyse und Bewertung. Hierzu werden zunächst das Grundsystem (Modellierungsziel 1) und anschließend das Gesamtmodell (Modellierungstiefe 2) analysiert. Bild 5-17 zeigt exemplarisch einige Simulationsergebnisse zum Gesamtmodell des Geldweges (Modellierungsziel 2).

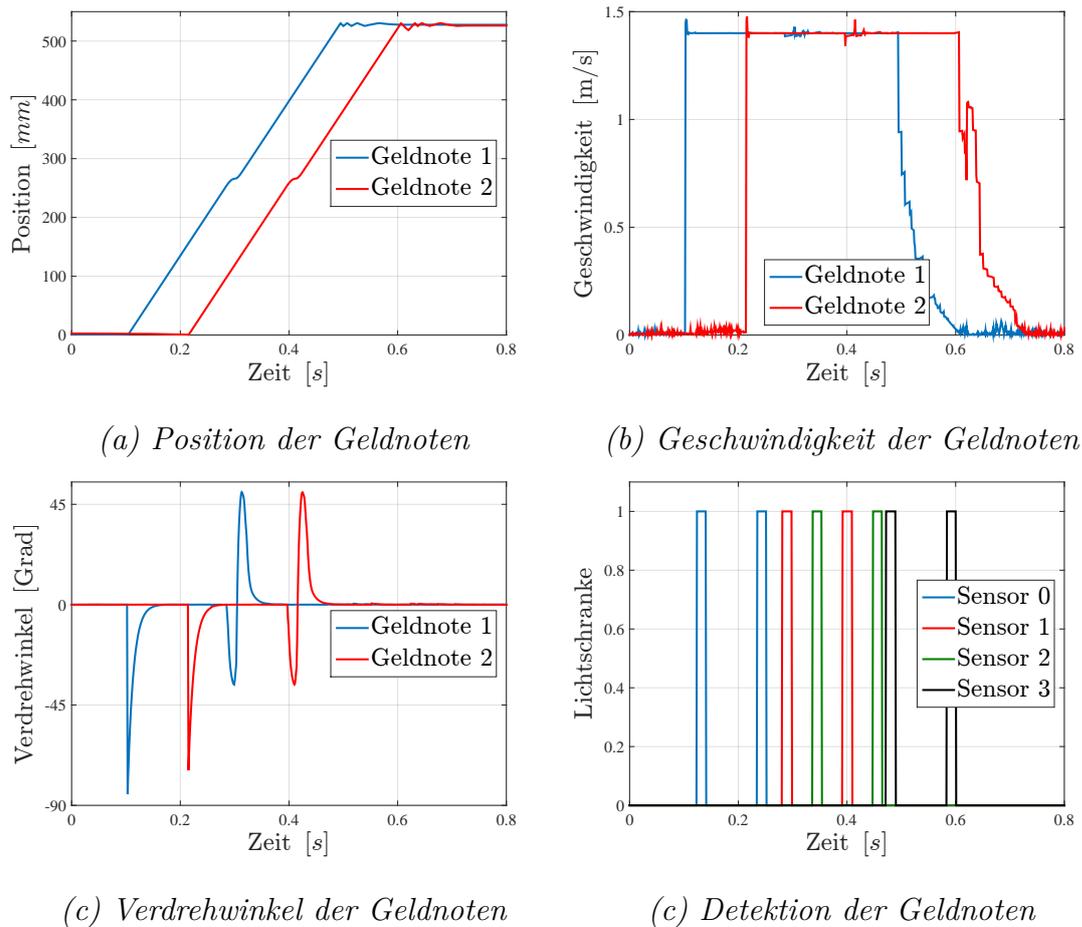


Bild 5-17: Simulationsergebnisse des Geldwegemodells

Mithilfe der Simulationsergebnisse können u. a. der zurückgelegte Weg der Geldnoten (vgl. Bild 5-17 (a)), die Transportgeschwindigkeit (b) und der Verdrehwinkel der Geldnoten (c) analysiert werden. Der Verdrehwinkel gibt die relative Verdrehung zwischen zwei Starrkörpern eines Geldnotenmodells an (vgl. Geldnotenmodell, S. 140). Darüber hinaus kann der Zeitpunkt der Detektion einer Geldnote durch eine Lichtschranke angezeigt werden. Auf Basis der Analysen und der Simulationsergebnisse erfolgen

- die Identifikation von potenziellen Staustellen, insbesondere die Überprüfung von Geldwegradienten,
- die Spezifikation von Anforderungen an Aktorik und Sensorik,
- die Spezifikation von Anforderungen an die Reibungselemente und
- der Funktionsnachweis des Lösungskonzeptes.

Das Ergebnis der Systemkonzipierung ist eine prinzipiell funktionsfähige Lösung: die Prinzipiellösung. Sie ist der Ausgangspunkt für den disziplinspezifischen Entwurf.

5.2.2 Disziplinspezifischer Entwurf des Geldweges

Im disziplinspezifischen Entwurf wird die Prinzipiellösung in den jeweiligen Fachdisziplinen konkretisiert. Das Ergebnis der Phase ist ein virtueller Prototyp mit detaillierten Modellen und einem ausgearbeiteten Entwurf. Bei mechatronischen Systemen steht i. d. R. die kontrollierte Bewegung als zentrale Funktion im Vordergrund. Aus diesem Grund wird der disziplinspezifische Entwurf von der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik begleitet. In der Phase werden beispielsweise Integrationsstrategien festgelegt. Daraus resultieren ggf. neue Anforderungen an die Dynamikmodelle, wie z. B. die Forderung nach der Echtzeitfähigkeit eines Modells für den Einsatz im Rahmen einer HiL-Simulation. Die Dynamikmodelle für die einzelnen Strategien liefern die Experten der jeweiligen Fachdisziplinen.

Übertragen auf den disziplinspezifischen Entwurf des Geldweges, werden in dieser Phase die Transport-, Vereinzelungs- und Sortiereinheiten durch die Wahl von Lösungselementen konkretisiert. Insbesondere der Nachweis kritischer Funktionen, wie des Vereinzelns, ist ein wichtiges Untersuchungsziel in dieser Entwurfsphase. Es erfolgen der detaillierte Entwurf der Informationsverarbeitung sowie die Wahl geeigneter Aktorik und Sensorik. Im Folgenden wird eine Auswahl von Untersuchungsbeispielen diskutiert.

Zielbeschreibung

Wichtige Schritte in der Zielbeschreibung des disziplinspezifischen Entwurfs sind, neben dem Ableiten von disziplinspezifischen Anforderungen und Zielen aus der Prinzipiellösung sowie dem Festlegen von Testkonzepten (vgl. Abschnitt 3.2, S. 68), die Definition von Modellierungszielen und die Wahl einer Zielmodellierungstiefe.

Die Modellierungsziele für den Einsatz eines Dynamikmodells beim Entwurf des Geldweges können in dieser Entwurfsphase sehr stark variieren (vgl. Abschnitt 4.3, S. 85). Für den modellbasierten Entwurf des Geldweges werden an dieser Stelle exemplarisch drei Modellierungsziele definiert:

1. Auf Basis des 2D-MKS-Modells des Geldweges und der noch auszuwählenden Lösungselemente soll eine detaillierte Auslegung des Geldweges erfolgen. Hierzu soll das systemspezifische Verhalten der Reibungselemente abgebildet werden. Das Modell muss die Trägheitsmomente der Reibungselemente berücksichtigen, um das Lastmoment bestimmen zu können und somit die Anforderungen an die Aktorik genauer zu spezifizieren. Weiterhin soll die konkrete Anordnung der Reibungselemente erfolgen (Abstände zwischen den Reibungselementen).
2. Das zweite Modellierungsziel umfasst zum einen die detaillierte Analyse der Kräfte und Verformungen, die auf die Geldnote wirken, und zum anderen die detaillierte Auslegung der Reibungselementgeometrie im Raum. Zur Untersuchung von Materialeigenschaften und kritischen Stellen in Bezug auf die Bewegungsübertragung der Geldnoten soll ein detailliertes Modell erstellt werden. Ziel ist es, die Anforderungen an die Materialeigenschaften der Walzen auf Basis des detaillierten Modells optimal zu spezifizieren.
3. Zum Testen des Steuergerätes eines Geldautomaten bei der modellgestützten Systemintegration im Rahmen einer HiL-Simulation ist ein echtzeitfähiges Modell des Geldweges erforderlich. Als Ausgangspunkt soll das 2D-MKS-Modell des Geldweges aus der Systemkonzipierung dienen.

Die Umsetzung des dritten Modellierungsziels wird in Abschnitt 5.2.3 gezeigt, obwohl die Modellierung des echtzeitfähigen Geldwegemodells in dieser Entwurfsphase erfolgt. Die Notwendigkeit eines solchen Modells ergibt sich aus der Erarbeitung einer Integrationsstrategie (HiL-Konzept) in der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik (vgl. Abschnitt 3.3, S. 71). Hierdurch wird der Zusammenhang deutlicher, und Wiederholungen werden vermieden.

Anhand der Modellierungsziele wird mithilfe der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe (siehe Kapitel 4) eine Zielmodellierungstiefe für das zu untersuchende System, Teilsystem oder die Komponente gewählt. In dieser Entwurfsphase können auch Komponenten für sich entworfen und analysiert werden. Die Zielmodellierungstiefe wird also auf der Gesamtmodellebene vergeben. Dieser Schritt dient zur groben Abschätzung der erforderlichen Modellierungstiefe. Erst in der Synthese erfolgt nach der Wahl von Lösungswissen (vgl. Abschnitt 3.2, S. 68) die Überprüfung der Zielmodellierungstiefe auf Elementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Elemente des zu untersuchenden (Teil-)Systems oder der Komponente mit der zuvor gewählten Modellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Elemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Im disziplinspezifischen Entwurf können alle vier Ebenen der Modellierungstiefe verwendet werden (vgl. Bild 4-3, S. 91), so dass dem Entwickler – von linearen ODEs bis hin zu partiellen Dif-

ferentialgleichungen (PDEs) – die gesamte Bandbreite mathematischer Modelle zur Abbildung einzelner Elemente zur Auswahl stehen.

Die erforderliche Modellierungstiefenebene kann durch die Zuordnung des Modellierungsziels zu einer Ebene hergeleitet werden (siehe Abschnitt 4.4, S. 87). Lässt sich mithilfe der Beschreibung der Modellierungstiefenebenen keine eindeutige Wahl treffen, können die bereits definierten Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe herangezogen werden (siehe Bild 4-11, S. 102). Der Entwickler muss entscheiden, ob das dynamische Verhalten eines Systemelements

- für die Untersuchung relevant ist,
- an der Ausführung einer kritischen Funktion beteiligt ist,
- Bestandteil eines unbekanntem Effekts oder Vorgangs ist oder sein könnte.

Für das erste Modellierungsziel wird eine Zielmodellierungstiefe von $\Gamma_{Ziel} = 3$ festgelegt, da das Modell das systemspezifische Verhalten der Walzen abbilden soll. Das zweite Modellierungsziel umfasst, neben einer detaillierten Analyse der auftretenden Kräfte zwischen den Reibungselementen und der Geldnote, auch die Untersuchung von Materialeigenschaften und kritischen Stellen. Das Verhalten zwischen den Reibungselementen und der Geldnote ist unbekannt. Aus diesen Gründen wird für das zu erstellende Modell eine Zielmodellierungstiefe von $\Gamma_{Ziel} = 4$ nahegelegt.

Synthese und Analyse

Synthese und Analyse umfassen die Erstellung, die Untersuchung und die Bewertung der konkretisierten Teillösungen. Für den Entwurf des Geldweges müssen zunächst Lösungselemente ausgewählt werden, etwa die Reibungselemente. Anschließend werden die Modelle zur Umsetzung der drei definierten Modellierungsziele erstellt. Hierzu werden ggf. Modelle aus der Systemkonzipierung erweitert und detailliert. Im letzten Schritt werden die Teillösungen analysiert.

Lösungswissen auswählen/entwickeln

Im ersten Schritt wird in der Synthese disziplinspezifisches Lösungswissen in Form von disziplinspezifischen Lösungselementen oder konkreteren Lösungsmustern ausgewählt. Diese ersetzen die in der Systemkonzipierung gewählten idealisierten Lösungsmuster und konkretisieren somit die Lösung. Exemplarisch wird die Wahl eines Reibungselements für den Transport der Geldnoten gezeigt. Als Reibungselemente werden an dieser Stelle Walzen gewählt. Walzen bestehen aus einer Stahlwelle, auf die mehrere Kunststoffrollen aufgepresst werden. Sie sind durch die folgenden Parameter charakterisiert: Masse, Massenträgheitsmoment,

Steifigkeiten, Reibungskoeffizient, Radius etc. Eine weitere Wahl erfolgt beispielsweise, nachdem die Anforderungen an die Aktorik spezifiziert wurden. Erst nach der Spezifikation der Lastmomente können in weiteren Schritten die Antriebs- und die Verstellaktoren ausgewählt werden.

Verhaltensmodell detaillieren/erweitern

Nach der Auswahl von Lösungswissen erfolgen die Detaillierung und die Erweiterung der Modelle aus der Systemkonzipierung. In einigen Fällen ist eine Erweiterung nicht ausreichend, und es müssen neue Verhaltensmodelle erstellt werden. Wie bei der Synthese in der Systemkonzipierung müssen auch hier zunächst die relevanten Systemelemente identifiziert, eine geeignete Modellierungstiefe gewählt und Annahmen getroffen werden, bevor die Modellierung beginnen kann.

Zur Umsetzung der ersten beiden Modellierungsziele müssen die folgenden Systemelemente modelliert werden:

- Walze, bestehend aus einer Welle (i. d. R. aus Stahl) und Rollen (i. d. R. aus Kunststoff),
- Geldnote,
- Energiefluss zwischen der Geldnote und der Walze.

Um den Modellierungsaufwand möglichst gering zu halten, wird in diesem Fall das bereits vorhandene 2D-MKS-Modell aus der Prinziplösung als Ausgangspunkt gewählt. Die Walze wird daher in einem zweidimensionalen Starrkörpermodell abgebildet. Da das Modell das systemspezifische Verhalten der Walzen abbilden soll (vgl. Modellierungsziel), wird eine Modellierungstiefe von $\Gamma = 3$ gewählt. Bei diesem Modell sind keine weiteren Ebenen der Modellierungstiefe zu wählen.

Zur Spezifikation von Anforderungen an die Materialeigenschaften der Walzen und zur Auslegung der Walzengeometrie reicht das 2D-MKS-Modell nicht aus. Ein wesentlicher Bestandteil sind die Kräfte zwischen der Walze und der Geldnote, die eine Bewegung und eine Verformung der Geldnote bewirken. Das setzt sowohl ein dreidimensionales Geldnotenmodell als auch ein ebensolches Walzenmodell voraus, die über ein Kontaktmodell verbunden sind. Alle drei Systemelemente sind dynamisch relevant. Da nicht abzuschätzen ist, wie sich die Geldnote verformt, handelt es sich um einen unbekanntem Effekt. Aus diesem Grund müssen die Systemelemente in der Modellierungstiefenebene $\Gamma = 4$ abgebildet werden. Zur Modellierung von Verformungen werden i. d. R. FE-Modelle eingesetzt. Bei diesem Modellierungsziel reicht die Betrachtung eines Walzenpaares aus. Modelliert werden daher nicht der gesamte Geldweg in der Modellierungstiefenebene 4, sondern lediglich ein Walzenpaar sowie die Geldnote. Die Simulationsdauer wäre nicht praktikabel, um mehrere Parameterstudien durchzuführen, wenn ein Gesamtmodell in dieser Ebene abgebildet würde.

Erweiterung des 2D-MKS-Geldwegemodells (Modellierungsziel 1): Auf der Grundlage des 2D-MKS-Geldwegemodells aus der Systemkonzipierung wird das Modell um detailliertere Walzenmodelle erweitert. Die geforderte Modellierungstiefe der Walzenmodelle ist die Ebene des systemspezifischen Verhaltens $\Gamma = 3$. Das Lösungsmustermodell der Reibungselemente (Guide-Elemente) aus der Systemkonzipierung mit der Modellierungstiefenebene 1 wird in diesem Schritt durch ein detaillierteres 2D-MKS-Modell der Walze ersetzt.

Die Walze wird durch einen zweidimensionalen Starrkörper abgebildet. Das Modell besitzt einen rotatorischen Freiheitsgrad um die z -Achse. Der Starrkörper ist definiert durch den Radius R_{Roller} , die Masse m_{Roller} und das Massenträgheitsmoment Θ_{zz} um die z -Achse. Während des Kontakts zwischen der Walze und der Geldnote verformen sich die Kunststoffrollen der Walze. Dieser Effekt ist nichtlinear, d. h. die Kunststoffrollen besitzen eine nichtlineare Steifigkeitskennlinie. Im Gegensatz zum idealisierten Kontaktmodell (vgl. 5-7) werden an dieser Stelle nichtlineare, elastische Verformungen im Kontaktmodell berücksichtigt. Die Normalkraft setzt sich in Abhängigkeit der Eindringtiefe δ und der Eindringgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ aus einem nichtlinearen Feder-Dämpfer-Paar zusammen. Mit den Steifigkeits- und Dämpfungsexponenten m_0, m_1 lassen sich auf diese Weise nichtlineare Zusammenhänge abbilden. Es ergibt sich der folgende Zusammenhang für die Normalkraft:

$$F_N = c_{kon} \cdot \delta^{m_0} + d_{kon}(\delta) \cdot \dot{\delta}, \quad (5-11)$$

$$d_{kon}(\delta) = d_{max} \cdot \delta^{m_1}.$$

Steifigkeit und Materialdämpfung der Walze werden in der Kontaktsteifigkeits- und der Kontaktdämpfungskonstante berücksichtigt. Zusätzlich zur Normalkraft wirkt im Kontaktpunkt eine Reibungskraft

$$F_R = \mu(v) \cdot F_N. \quad (5-12)$$

Bild 5-18 zeigt die Erweiterung des Geldwegemodells aus der Systemkonzipierung um die Walzenmodelle. Die einzelnen Parameter der Walze müssen vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Alternativ dazu wurde in [Kla08] ein Prüfstand zur Identifikation der Parameter von Transportwalzen entwickelt. Dieser Prüfstand bietet die Möglichkeit, Reibungswerte und die Gesamtsteifigkeit der Transportwalze, bestehend aus der Wellensteifigkeit und der Steifigkeit der Kunststoffrollen, zu ermitteln. Zur Ermittlung der Einzelsteifigkeiten von Transportwalzen in Geldautomaten sei an dieser Stelle auf [Loc09] verwiesen.

An dem so entstehenden Modell lassen sich Lastmomente für die Aktoren berechnen, und es kann dabei eine detailliertere Auslegung und Auswahl der Aktorik

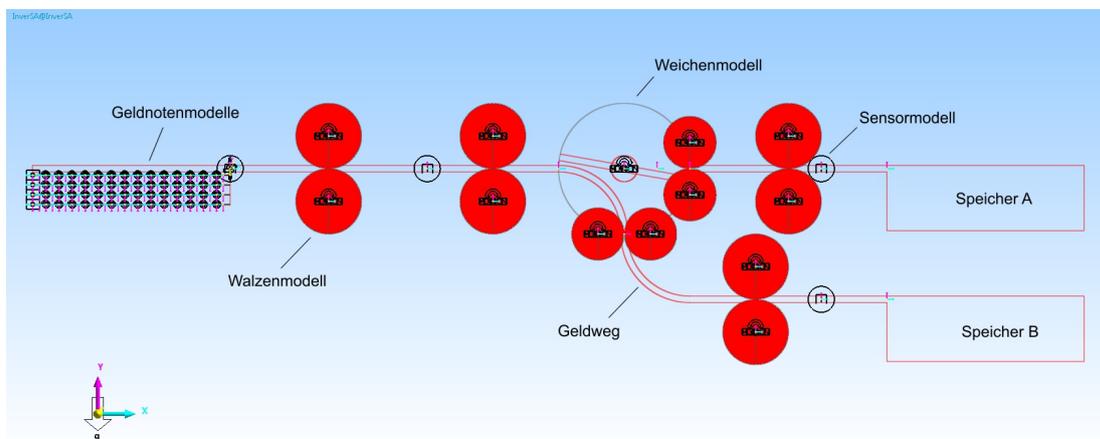


Bild 5-18: Detailliertes Geldwegemodell mit Walzenmodellen

erfolgen. Außerdem lassen sich die Transportzeiten genauer berechnen. Weiterhin können Vorgaben für die Konstruktion des Geldautomaten abgeleitet werden. Hierzu gehören z. B. die Abstände zwischen den Walzen und die Positionierung. Mit diesem Modell lassen sich sehr komfortabel verschiedene Reibungskoeffizienten (Reibungsbeläge) und Walzensteifigkeiten analysieren. Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf eine erfolgreiche Entwicklung hat die Visualisierung von Vorgängen. Durch die Ergänzung der Walzenmodelle leistet das Geldwegemodell einen wichtigen Beitrag zum Verständnis aller an der Entwicklung beteiligten Disziplinen.

Dreidimensionales FE-Modell (Modellierungsziel 2): Zur Modellierung von FE-Modellen müssen geeignete Werkzeuge herangezogen werden, wie das bereits vorgestellte Programm *RecurDyn*. In diesem Programm können Körper mithilfe der FEM diskretisiert und simuliert werden. Darüber hinaus bietet *RecurDyn* die Möglichkeit, Starrkörper und FE-Körper über spezielle Kontaktmodelle miteinander zu verbinden. Zur Spezifikation der Anforderungen an die Materialeigenschaften der Walzen sind im Wesentlichen die auf die Geldnote wirkenden Kräfte und die dadurch entstehenden Verformungen der Geldnote wichtig. Aus diesem Grund können die Walzen als Starrkörper modelliert werden, und die nichtlinearen Steifigkeiten der Walze werden im Kontaktmodell berücksichtigt. Dieser Ansatz wird im weiteren Verlauf verfolgt.

Die Geldnote wird als FE-Körper modelliert, der aus rechteckigen Elementen zusammengesetzt wird (siehe Bild 5-19). Jedes Element besitzt vier Knoten mit einer Masse und einem Massenträgheitsmoment. Die einzelnen Knotenmassen berechnen sich anteilig aus der Gesamtmasse der Geldnote. Weitere Parameter für

die Analyse des FE-Modells sind das E-Modul E_{Papier} , die strukturelle Dämpfung d_{strukt} und die Querkontraktionszahl ν_{Papier} .

Die Walzen werden als dreidimensionales MKS-Modell abgebildet. Hierzu werden die geometrischen Abmaße sowie die Masse und die Massenträgheiten benötigt. Das Modell bildet somit das systemspezifische Verhalten ab, so dass sich eine Reduzierung der Modellierungstiefebene auf $\Gamma = 3$ ergibt. Durch die Wahl des Modellierungswerkzeugs ist somit eine Reduktion der Modellierungstiefe erfolgt.

Das Kontaktmodell berücksichtigt die nichtlinearen Steifigkeiten der Walzen, so wie im 2D-MKS-Modell. Die Starrkörperoberflächen werden mit einem Netz aus Dreiecken versehen, so dass zwischen den Knotenpunkten des FE-Geldnotenmodells und den Knotenpunkten der vernetzten Starrkörper Kontakte berechnet werden können. Das Kontaktmodell besteht aus einer Normalkraft, die nach Gleichung 5-11 berechnet wird, und aus jeweils einer Reibungskraft in x- und z-Richtung:

$$\underline{F}_K = \begin{bmatrix} \mu_x \cdot F_N \\ F_N \\ \mu_z \cdot F_N \end{bmatrix}. \quad (5-13)$$

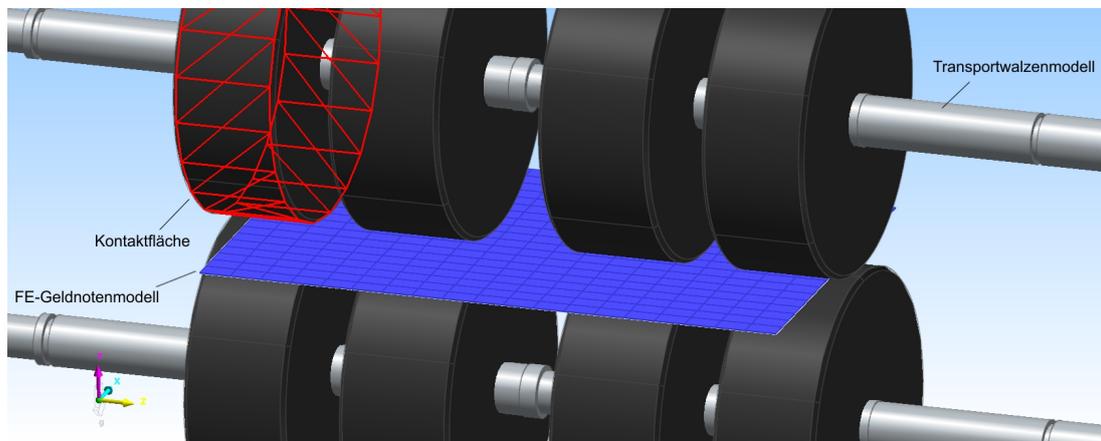


Bild 5-19: 3D FE-Geldnotenmodell und Transportwalzenmodell in RecurDyn

Analyse

In der Analyse erfolgen zunächst die Verifikation und die Validierung der detaillierten Modelle. Hierzu existieren viele verschiedene Methoden; insbesondere zur Validierung sei an dieser Stelle auf [IM11] und [KST14] verwiesen. Anschließend wird das Verhalten der Teillösungen analysiert und bewertet. Die Modelle der Teillösungen sind ein wichtiger Bestandteil des virtuellen Prototyps, der den zweiten Meilenstein der Entwurfsmethode darstellt (vgl. Abschnitt 3.2, S. 68).

5.2.3 Disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik und modellgestützte Systemintegration des Geldweges

Der disziplinspezifische Entwurf wird u. a. von der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik begleitet. Mithilfe dieser Phase wird der ständige Informationsaustausch zwischen den entwickelnden Disziplinen sichergestellt. Zur frühzeitigen Überwachung von Kernfunktionen werden in dieser Phase Strategien zur virtuellen Systemintegration von Teilmodellen (ggf. mit unterschiedlicher Modellierungstiefe) im Rahmen von MiL- oder SiL-Simulationen ausgearbeitet (vgl. Abschnitt 3.3, S. 71). Hierzu gehören auch Test- und Analysekonzepte. Neben den Strategien für eine virtuelle Systemintegration werden hier auch Strategien für die schrittweise Überführung des virtuellen Prototyps in die Realität (z. B. durch HiL-Simulationen) ausgearbeitet. Es wird festgelegt, was untersucht werden soll und welche Bestandteile des Systems für die jeweilige Integrationsstrategie oder das Testkonzept in realer oder virtueller Form erforderlich sind. Häufig werden diese Strategien beim Entwurf der Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme eingesetzt. Die Konkretisierung und die eigentliche Umsetzung dieser Strategien erfolgen in der modellgestützten Systemintegration (vgl. Abschnitt 3.4, S. 74). Zur Konkretisierung gehören u. a. die Realisierung der Schnittstellen zwischen realen und virtuellen Komponenten sowie die Festlegung von Datenformaten in denen Informationen ausgetauscht werden sollen.

Bei der Entwicklung eines Geldautomaten eignen sich diese Integrationsstrategien für den Entwurf der Geldautomatensteuerung, die aus mehreren Steuergeräten und der Firmware besteht. Im Rahmen einer MiL-Simulation zwischen einem Modell der Firmware und einem Geldwegemodell lassen sich bereits frühzeitig Fehler in der Firmware identifizieren und beheben. Ein weiterer Schritt zur Konkretisierung der Steuerung ist eine SiL-Simulation zwischen dem Firmware-Code und einem echtzeitfähigen Geldwegemodell. Insbesondere die Schnittstellen zwischen dem echtzeitfähigen Geldwegemodell und der Plattform, auf welcher der Firmware-Code hinterlegt ist, sind hierbei entscheidend. Solche Strategien werden im Rahmen der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik erarbeitet und deren Umsetzung wird von dieser Phase überwacht. Die Erstellung der einzelnen Modelle für eine Untersuchung im Rahmen einer MiL- oder SiL-Simulation wird parallel durch die jeweiligen Disziplinen im disziplinspezifischen Entwurf durchgeführt. Ein Modellierungsziel im disziplinspezifischen Entwurf ist z. B. die Erstellung eines echtzeitfähigen Geldwegemodells (vgl. Abschnitt 5.2.2, S. 152). Jede Änderung an einer Komponente, die eine andere Disziplin betrifft, muss umgehend kommuniziert werden. Ändern sich beispielsweise Massen oder Steifigkeiten in der Konstruktion des Geldweges, so betreffen diese Änderungen auch das MKS-Modell des Geldweges oder Regelungs- und Steuerungskonzepte.

Eine weitere Integrationsstrategie ist eine HiL-Simulation zum Testen der Firmware auf einem oder mehreren Steuergeräten. Auch diese Strategie wird in der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik erarbeitet. Anstelle eines realen Geldautomaten werden dessen Steuergeräte über geeignete Schnittstellen mit einer Echtzeithardware verbunden. Auf der Echtzeithardware wird ein echtzeitfähiges Modell (häufig in Form eines C-Codes) des Geldweges simuliert. Ziel ist es, der Geldautomatensteuerung das Vorhandensein eines realen Geldautomaten vorzuspielen.

In Bild 5-20 ist das HiL-Konzept zum Testen der Firmware als ein Beispiel für eine Integrationsstrategie dargestellt. Der HiL-Prüfstand besteht aus der Firmware auf den Original-Steuergeräten, einer Echtzeithardware (Echtzeit-PC) und einer Schnittstelle. Auf der Echtzeithardware wird ein Modell des Geldweges in Form eines C-Codes simuliert bzw. gerechnet. Die Simulation des Geldweges muss in Echtzeit erfolgen. Zwischen den Steuergeräten und dem Geldwegemodell existiert eine Schnittstelle. Sie muss zum einen die Aktorbefehle des Steuergerätes in für das Geldwegemodell verständliche Aktorsignale umwandeln und zum anderen die Sensorsignale, wie z. B. Signale einer Lichtschranke aus dem Geldwegemodell, so übersetzen, dass das Steuergerät das Signal verarbeiten kann. Die Erstellung des Geldwegemodells sowie der Sensor- und der Aktormodelle erfolgt durch die einzelnen Disziplinen. Die Überwachung des Informationsaustausches zwischen den beteiligten Disziplinen und die Zusammenführung der Modelle sind die Aufgaben der disziplinübergreifenden Koordination der Systemdynamik.

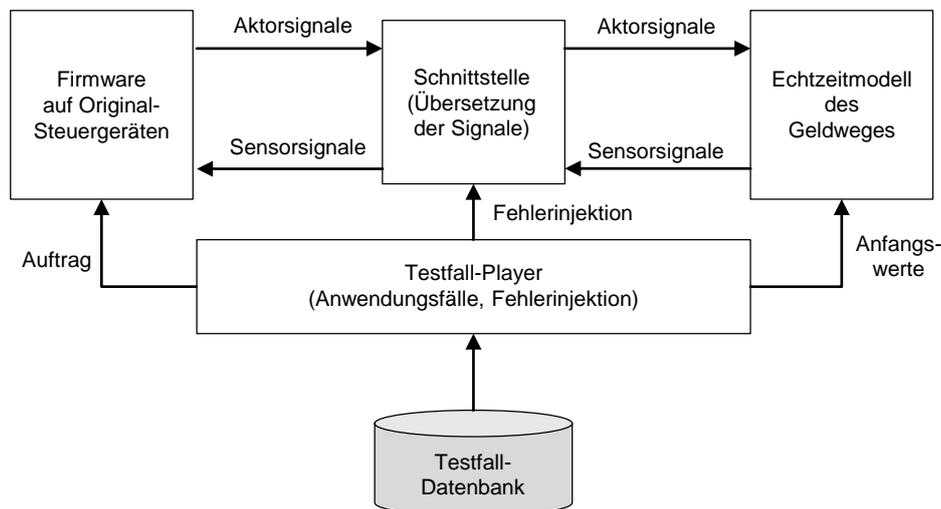


Bild 5-20: HiL-Konzept zum Testen der Firmware auf den Original-Steuergeräten

Zur Durchführung von Experimenten am HiL-Prüfstand besitzt die Testumgebung einen Testfall-Player, der auf eine Datenbank zugreift. Diese Datenbank

enthält sowohl Anwendungsfälle als auch Fehlerfälle. Ein typischer Anwendungsfall ist das Auszahlen einer bestimmten Geldsumme. Fehlerfälle sind z. B. eine verschmutzte Lichtschranke, ein Geldnotenstau oder ein Doppelabzug. Der Testfall-Player setzt die Anfangswerte für das Geldwegemodell, gibt den Auftrag an die Firmware weiter und kann Fehler in das System injizieren.

Voraussetzung für die HiL-Simulation ist ein echtzeitfähiges Geldwegemodell, wie bereits im disziplinspezifischen Entwurf des Geldweges als drittes Modellierungsziel definiert worden ist (siehe Abschnitt 5.2.2, S. 152). Die bisher gezeigten Geldwegemodelle sind in den Modellierungstiefenebenen 2 bis 4 abgebildet und erfüllen u. a. aufgrund der aufwändigen Kontaktberechnung diese Anforderung nicht. Aus diesem Grund ist ein ideales und stark abstrahiertes Geldwegemodell zwingend erforderlich. Für ein Modell in den Ebenen 3 und 4 kann keine Echtzeitfähigkeit garantiert werden, weshalb zunächst eine Zielmodellierungstiefe von maximal $\Gamma_{Ziel} = 2$ gefordert wird. Das Modell muss anhand der Aktorsignale die aktuellen Sensorsignale berechnen und an die in Bild 5-20 dargestellte Schnittstelle zur Übersetzung der Signale weiterleiten. Hierzu müssen Aktoren, Sensoren, die Geldnote und die Verarbeitungseinheiten in dem geforderten Modell berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die Wahl der Modellierungstiefe und die Modelle kurz vorgestellt. Die Wahl der Modellierungstiefe der einzelnen Systemelemente erfolgt mithilfe der definierten Kriterien (4.5, S. 102).

Die Aufgaben der Aktoren bestehen im Antreiben der Walzen zur Bewegung der Geldnote und im Schalten von Weichen. Das dynamische Verhalten der Aktoren ist in diesem Fall relevant, und die erforderliche Modellierungstiefenebene lautet $\Gamma = 2$. Exemplarisch wird im Folgenden die Modellierung eines DC-Motors gezeigt, der in diversen Varianten in Geldautomaten eingesetzt wird.

In Bild 5-21 ist das Ersatzschaltbild des DC-Motors dargestellt. Das Aktormodell besteht aus einem elektrischen und einem mechanischen Teilmodell. Sie sind über eine elektromechanische Kopplung (EMF, engl. Electromotive Force) verbunden. Eingänge sind die anliegende Motorspannung U_s und das Lastmoment M_L .

Das elektrische Teilsystem besteht aus dem Ohmschen Widerstand R , der Induktivität L und der vom Rotor induzierten Spannung e (EMF), die der Eingangsspannung entgegengesetzt wirkt. Aus dem 2. KIRCHHOFFSchen Gesetz ergibt sich für das elektrische Teilsystem die folgende Gleichung:

$$U_s = R \cdot i + L \cdot \dot{i} + e. \quad (5-14)$$

Das mechanische Teilsystem besteht aus der Massenträgheit Θ_M des Motors und einer geschwindigkeitsabhängigen Reibung mit einer Reibkonstanten k_f . Durch die elektromechanische Kopplung entsteht ein inneres Motormoment M_i mit

$$M_i = k_f \cdot \omega_M + \Theta_M \cdot \dot{\omega}_M + M_L. \quad (5-15)$$

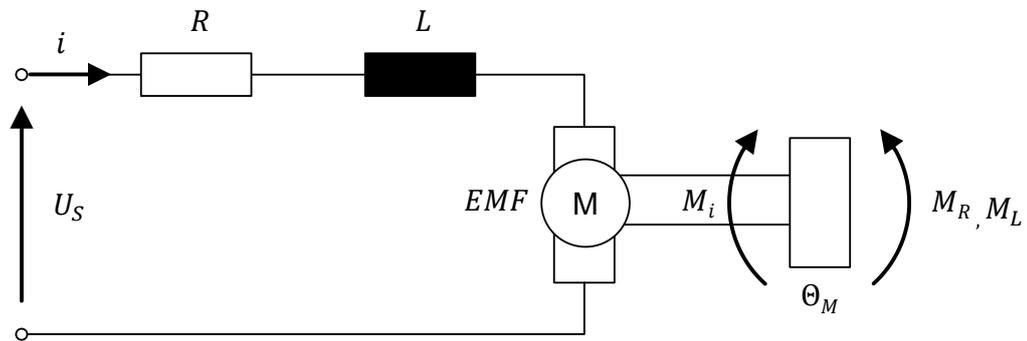


Bild 5-21: Ersatzschaltbild des DC-Motors

Die Gegen-EMF und das innere Moment können auch durch die Drehzahlkonstante k_e und die Drehmomentkonstante k_t beschrieben werden:

$$e = k_e \cdot \omega_M, \quad (5-16)$$

$$M_i = k_t \cdot i. \quad (5-17)$$

Durch Einsetzen und Umstellen ergeben sich zwei Gleichungen zur Beschreibung des DC-Motors:

$$i = \frac{R}{L}i - \frac{k_e}{L}\omega_M - \frac{1}{L}U_S, \quad (5-18)$$

$$\dot{\omega}_M = \frac{k_t}{\Theta_M}i - \frac{k_f}{\Theta_M}\omega_M - \frac{1}{\Theta_M}M_L. \quad (5-19)$$

Anschließend werden die beiden Gleichungen in die Zustandsraumdarstellung überführt:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\varphi}_M \\ \dot{\omega}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & -k_e/L \\ 0 & 0 & 1 \\ k_t/\Theta_M & 0 & -k_f/\Theta_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \varphi_M \\ \omega_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1/\Theta_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_S \\ M_L \end{bmatrix}, \quad (5-20)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ \varphi_M \\ \omega_M \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ k_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \varphi_M \\ \omega_M \end{bmatrix}. \quad (5-21)$$

Tabelle 5-2: Parameter des DC-Motors

Symbol	Einheit	Erläuterung
$U_S = 30$	[V]	Motorspannung
$n_N = 3600$	[rpm]	Leerlaufdrehzahl
$M_N = 0.057$	[Nm]	Anhaltmoment
$I_0 = 0.16$	[A]	Leerlaufstrom
$R = 4,8$	[Ω]	Elektrischer Widerstand
$L = 0.0066$	[H]	Induktivität
$k_t = 0.067$	[Nm/A]	Drehmomentkonstante
$\Theta_M = 110e - 7$	[kg · m ²]	Rotorträgheit
$k_f = 2.38e - 5$	[Nm · s]	Reibkonstante
$k_e = 0.006$	[rpm/V]	Drehzahlkonstante

Das Modell besitzt die in Tabelle 5-2 aufgeführten Parameter.

Bild 5-22 zeigt den Verlauf des Motorstroms und der Drehzahl. Zum Zeitpunkt $t = 0,5 \text{ s}$ wird ein Lastmoment mit $M_L = 0,25 \text{ Nm}$ aufgeprägt. Dieses Lastmoment spiegelt den Eintritt einer Geldnote wider. Anschließend muss das Modell zur Verwendung in der HiL-Testumgebung in einen C-Code überführt werden.

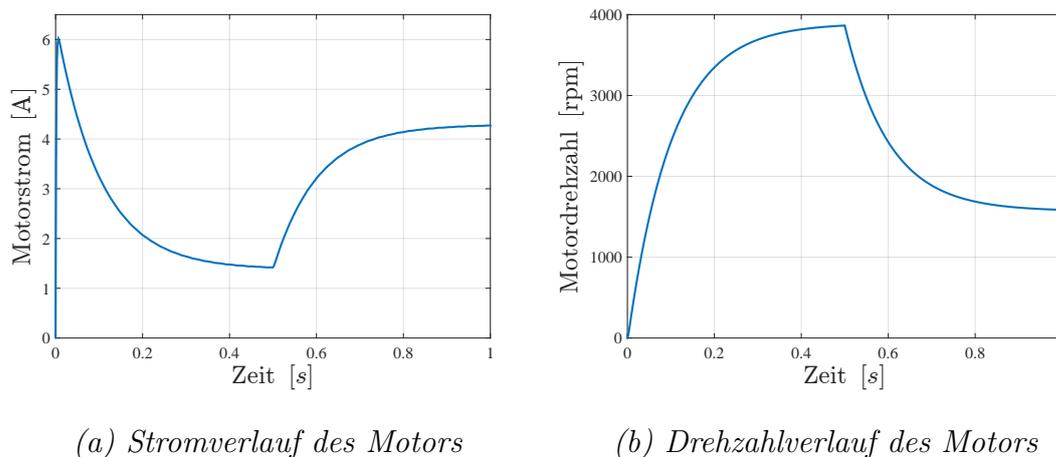


Bild 5-22: Simulationsergebnisse des DC-Motormodells

Das dynamische Verhalten der Sensorik ist nicht relevant, so dass die Sensoren in der Ebene $\Gamma = 1$ abgebildet werden. Die Verarbeitungseinheiten überführen die Geldnote von einem Ausgangszustand in einen neuen Zustand. Das dynamische Verhalten während dieses Vorgangs ist zum Testen der Geldautomatensteuerung nicht relevant; deshalb können sowohl die Geldnote als auch die Verarbeitungseinheiten in der Ebene $\Gamma = 1$ abgebildet werden.

Die Verarbeitungseinheiten bestehen aus Pfadelementen und Knoten. Ein Pfadelement ist durch einen Namen, eine Länge, den Namen des antreibenden Aktors und einen Getriebefaktor definiert. Die Pfade werden durch Knoten miteinander verbunden. An einem Knoten können Sensoren, wie z. B. Lichtschranken oder Hall-Sensoren zur Dickenmessung definiert werden. Die Sensorsignale werden in der geforderten Güte vom Modell bereitgestellt. Dieses Modell ist in Zeitschritten diskretisiert. Zu jedem Zeitschritt wird die Position der Geldnote neu berechnet, und es wird geprüft, zwischen welchen beiden Knoten sich die Geldnote befindet. Eine detaillierte Darstellung des Gesamtmodells findet sich in [Sch11]. Mittels einer entwickelten Schnittstellensprache werden die Elemente auf der Echtzeithardware erzeugt (vgl. [Sch11]). Ein typischer Befehl zur Erzeugung eines Pfadelementes ist wie folgt aufgebaut:

(Befehl-ID/Pfadname/Pfadlänge/Pfad antreibender Motor/Getriebefaktor).

Bild 5-23 zeigt exemplarisch die Befehle der Schnittstellensprache zur Erzeugung des idealisierten Geldwegemodells und seine grafische Darstellung. Das Modell besteht aus 3 Speichern, 6 Pfaden (P1 bis P6), 2 DC-Motoren (DC1, DC2), 1 Schrittmotor (SM) zur Verstellung der Weiche zwischen Pfad P2 und P3 bzw. P2 und P5 sowie 4 Lichtschranken (LS1 bis LS4).

Mithilfe dieses echtzeitfähigen Modells des Geldweges lässt sich im Rahmen der HiL-Testumgebung die Geldautomatensteuerung testen, ohne dass ein Prototyp des Geldautomaten erstellt werden muss. Typische Testfälle zur Funktionsüberprüfung der Steuerung sind das Auszahlen einzelner Geldnoten. Weiterhin kann das Verhalten der Steuerung beim Auftreten von Fehlerfällen, etwa einer verschmutzten Lichtschranke, analysiert werden. Die für das echtzeitfähige Geldwegemodell benötigten Parameter können aus den zuvor erstellten Dynamikmodellen des Geldweges (siehe Abschnitt 5.2.2) ermittelt werden.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme der HiL-Testumgebung sowie das Testen der Geldautomatensteuerung und die Auswertung der Ergebnisse erfolgen in der modellgestützten Systemintegration. Im Anschluss an die modellgestützte Systemintegration werden die Teilsysteme und die Komponenten des Geldautomaten zu einem ersten vollständigen Prototypen integriert und in Betrieb genommen.

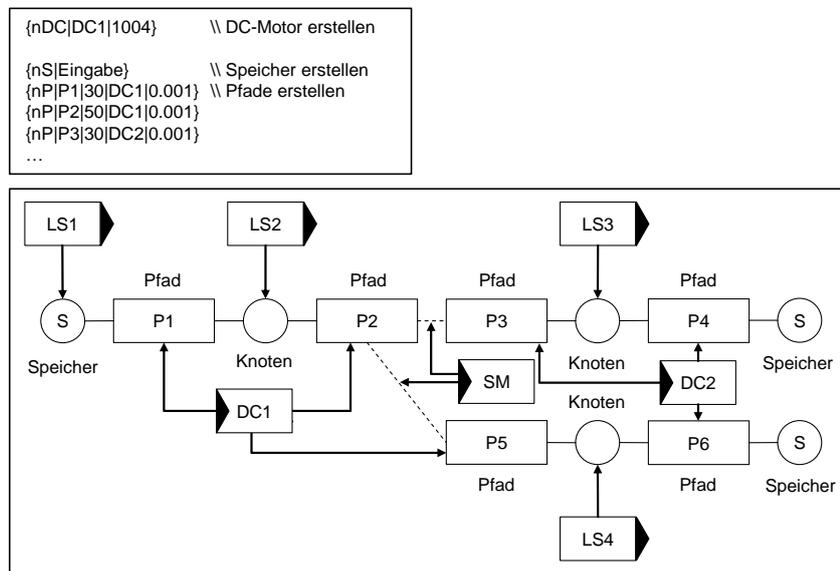


Bild 5-23: Schnittstellensprache und grafische Darstellung des idealisierten Geldwegemodells

5.3 Fazit

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der modellbasierten Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme und der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel des Geldweges eines Geldautomaten erfolgreich ist. In der Systemkonzipierung des Geldweges wurden zunächst verschiedene Partialmodelle erstellt und u. a. die wesentlichen Funktionen des Verarbeitungsmechanismus identifiziert. Bereits in der Zielbeschreibung sind Modellierungsziele definiert worden, und mithilfe der Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe konnte eine Zielmodellierungstiefe für das jeweilige Modellierungsziel bestimmt werden. In der anschließenden Synthese wurden Lösungsmuster zur Erfüllung der Funktionen des Geldweges gewählt. Auf Basis der Lösungsmusterwahl und der definierten Modellierungsziele wurden die relevanten Systemelemente identifiziert. Durch die Anwendung der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe konnten unnötige Detaillierungen vermieden werden. Das erstellte Modell bildet den Geldweg mit einer geeigneten Modellierungstiefe ab. Mit diesem Modell lassen sich bereits in einer frühen Phase der Entwicklung wichtige Aussagen über die prinzipielle Machbarkeit treffen.

Im disziplinspezifischen Entwurf des Geldweges konnten ebenfalls sowohl die Entwurfsmethodik als auch die Methode zur Wahl der Modellierungstiefe erfolgreich angewendet werden. Zunächst wurden Modellierungsziele definiert und entspre-

chende Zielmodellierungstiefen abgeleitet. Anhand der Wahl von Lösungselementen wurden detaillierte Dynamikmodelle des Geldweges und von Geldwegeabschnitten erstellt. Insbesondere durch den Einsatz der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe konnten unnötige Detaillierungen im Rahmen der Modelle verhindert werden. Anschließend wurde am Beispiel eines HiL-Konzepts zum Testen der Firmware auf Original-Steuergeräten des Geldautomaten eine Integrationsstrategie gezeigt. Sie wurde zunächst in der disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik geplant und nachfolgend in der modellgestützten Systemintegration ausgeführt. Hierzu wurde eine Testumgebung erstellt. Zudem wurde die Erstellung eines DC-Motormodells für den Geldweg gezeigt.

Zur Unterstützung des modellbasierten Entwurfsprozesses wird in Kapitel 6 die prototypische Umsetzung eines IT-Werkzeugs gezeigt, das u. a. eine Modellbibliothek des Geldweges mit Modellen unterschiedlicher Modellierungstiefe beinhaltet. Mithilfe des IT-Werkzeugs werden zum einen Modelle schneller erzeugt, und zum anderen bietet es die Möglichkeit, ein Systemmodell als zentrales Dokument des Entwurfsprozesses zu erstellen.

6 Prototypische Werkzeugunterstützung

Im vorangegangenen Kapitel wurden der erfolgreiche Einsatz von Dynamikmodellen, insbesondere die Anwendung der Entwurfsmethodik und der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe, im Entwurfsprozess eines Geldautomaten präsentiert. Der Modellierungsaufwand bei der Erstellung solcher Modelle ist häufig sehr hoch, so wie auch bei der Erstellung der Geldwegemodelle, die aus vielen einzelnen Elementen bestehen. Nachträgliche Änderungen an den Modellen, die in einer Entwicklung stets erforderlich werden, sind ebenfalls mit sehr viel Aufwand verbunden. Um den Modellierungsaufwand zu verringern, wird in diesem Kapitel eine eigens entwickelte Modellbibliothek zur Modellierung des Geldweges vorgestellt. Die prototypische Umsetzung der Geldwege-Modellbibliothek zur Erstellung von Dynamikmodellen mit unterschiedlicher Modellierungstiefe des Geldweges wird in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Hieraus kann zielgerichtet ein Modell mit der erforderlichen Modellierungstiefe gefunden und eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil einer Modellbibliothek ist die Möglichkeit zur Wiederverwendung in anderen Projekten. Dies kann ebenfalls den Modellierungsaufwand reduzieren.

Das entstandene Systemwissen muss zur Wiederverwendung von Modellen oder Teilmodellen in geeigneter Form aufbereitet und an einer zentralen Stelle abgelegt werden. In der Regel arbeitet jede Fachdisziplin mit ihren eigenen, spezifischen Programmen, so dass ein Austausch bzw. eine Wiederverwendung von Modellen über die Fachdisziplin hinaus sehr schwierig ist. Daher werden häufig die gleichen Informationen mehrmals aus unterschiedlicher Sicht abgebildet. Dieser Aufwand kann durch einen geeigneten Austausch und eine Wiederverwendung reduziert werden, d. h. die Informationen, die in den einzelnen disziplinspezifischen Modellen enthalten sind, müssen so aufbereitet und dokumentiert werden, dass sie je nach Möglichkeit auch in anderen Fachdisziplinen genutzt werden können. Die im modellbasierten Entwurfsprozess eingesetzten Programme, wie z. B. CAD-, MKS- oder FEM-Programme, arbeiten mit verschiedenen Datei-Formaten. Es wird daher ein Datei-Format benötigt, das sehr flexibel eingesetzt werden kann und einen Austausch zwischen den Programmen ermöglicht.

Um dies sicherzustellen, wird XML als gemeinsamer „Datenpool“ eingesetzt. Die Extensible Markup Language (kurz: XML) ist eine sehr flexible Sprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien [W3C15,

Har04]. In Abschnitt 6.2 wird ein auf XML-basiertes Systemmodell¹ des Geldweges gezeigt. Dieses Geldwege-Systemmodell dient als Austauschformat für die einzelnen Programme im Entwurfsprozess. Bild 6-1 stellt die Idee eines zentralen XML-Austausch-Dokuments dar. Das XML besitzt alle Informationen zur Erzeugung von Modellen mit unterschiedlichen Modellierungstiefenebenen in den einzelnen Entwurfsphasen. Der Informationsgrad des XMLs steigt so mit dem Entwicklungsgrad des Systems. Aus diesem Dokument sollen automatisiert oder teilautomatisiert die entsprechenden Modelle in den jeweiligen Programmen erzeugt werden können. Hierzu wird für jedes Programm ein spezifischer Parser benötigt. Parser sind Programme, die XML-Daten auslesen, interpretieren und ggf. auch auf ihre Gültigkeit hin prüfen.

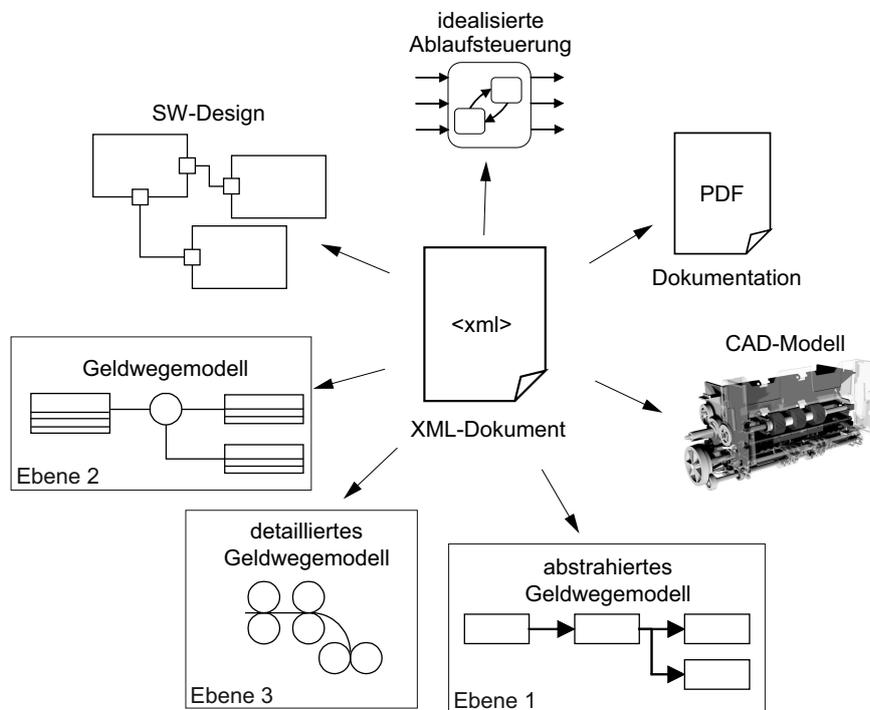


Bild 6-1: XML-Dokument als zentrales Austauschformat des modellbasierten Entwurfs

Mithilfe der prototypischen Werkzeugunterstützung sollen die folgenden Ziele verfolgt werden:

- Unterstützung des Entwicklers bei der Erstellung von Dynamikmodellen des Geldweges im modellbasierten Entwurfsprozess eines Geldautomaten

¹Im Sinne des Systems Engineering beinhaltet ein Systemmodell abstrakte disziplinübergreifende Informationen des gesamten Systems [HFV⁺15]. In dieser Arbeit handelt es sich um ein speziell auf den Geldweg abgestimmtes Systemmodell.

mithilfe einer Geldwege-Modellbibliothek, die Modelle in den verschiedenen Modellierungstiefenebenen besitzt,

- Aufbereitung der Modelle und des enthaltenen Systemwissens in einem XML-Austauschformat als zentrales Geldwege-Systemmodell zur Verwendung in den verschiedenen Disziplinen und zur Wiederverwendung in zukünftigen Projekten.

6.1 Die Geldwege-Modellbibliothek

Die Geldwege-Modellbibliothek dient zur Unterstützung bei der Erstellung der Dynamikmodelle des Geldweges im Simulationsprogramm *RecurDyn* [Fun14] (vgl. auch Kapitel 5) und zur Reduktion des Modellierungsaufwands. Die Elemente zur Modellierung des Geldweges in einem Automaten in verschiedenen Modellierungstiefenebenen wurden bereits ausführlich in Abschnitt 5.2 beschrieben (siehe S. 129). In diesem Abschnitt wird die entwickelte Geldwege-Modellbibliothek vorgestellt. Diese ist in *ProcessNet* modelliert. *ProcessNet* ist eine Programmierschnittstelle in *RecurDyn*. Sie bietet die Möglichkeit, auf einen Großteil der in *RecurDyn* definierten Elemente zuzugreifen und daraus neue Elemente zu entwickeln [Fun14]. Zu den verwendeten Bibliotheken gehören beispielsweise die MTT2D²- und die MTT3D³-Bibliothek. Die Programmierung erfolgt in der vom Softwarehersteller Microsoft entwickelten Programmiersprache *C#* in der Entwicklungsumgebung von Visual Studio. Um die Bedienung der Modellbibliothek zu erleichtern, kann eine entwickelte graphische Bedienoberfläche (GUI⁴) genutzt werden. Der Entwickler kann in der GUI Modelle in verschiedenen Modellierungstiefenebenen zur Abbildung des Geldweges auswählen. Nach jeder Auswahl oder Änderung von Modellparametern wird das Dynamikmodell in *RecurDyn* aktualisiert.

Im Hinblick auf das Geldwege-Systemmodell müssen zum einen die Dynamikmodelle in das XML-Format übersetzt werden, und zum anderen muss aus dem XML-Modell wiederum ein Dynamikmodell in *RecurDyn* erzeugt werden können. Hierzu sind Übersetzer (z. T. auch Compiler genannt) und programmspezifische Parser erforderlich. Sie dienen als Schnittstelle zwischen dem Geldwege-Systemmodell im XML-Format und der Geldwege-Modellbibliothek. Mithilfe ei-

²MTT2D: Das *Media Transport Toolkit 2D* ist eine Toolbox zur Modellierung und zur Simulation flexibler Medien, die mithilfe mechanischer Systeme (z. B. Rollen, Riemen, Transportbänder) in einer zweidimensionalen Umgebung transportiert werden [Rec14].

³MTT3D: Zur Modellierung und zur Simulation des Transports flexibler Medien in einer dreidimensionalen Umgebung bietet *RecurDyn* das *Media Transport Toolkit 3D* an [Rec14].

⁴GUI: Graphical User Interface

nes RecurDyn-Parsers werden die relevanten Daten eingelesen und anschließend automatisch das Dynamikmodell des Geldweges in *RecurDyn* erzeugt.

Zusammengefasst, besteht die Geldnotenmodellbibliothek im Wesentlichen aus vier Bestandteilen:

- graphische Benutzeroberfläche (Main-GUI),
- Modelle der Geldwege-Elemente,
- ein Übersetzer, der das mithilfe der GUI erstellte Dynamikmodell in das XML-Austauschformat übersetzt, und
- verschiedenen Parsern zum Einlesen der relevanten Informationen aus dem XML-Modell in ein Programm, etwa einen RecurDyn-Parser.

Graphische Benutzeroberfläche

Bild 6-2 zeigt die graphische Bedienoberfläche. Sie besteht u. a. aus dem Model-Browser und den Teilmodellen des Geldweges. Der Model-Browser zeigt die hierarchische Struktur des Geldwegemodells. Auf der obersten Ebene findet sich das zu erstellende Gesamtmodell. Das Gesamtmodell besteht aus einzelnen Modulen, die sich wiederum aus den Teilmodellen zusammensetzen. In der Geldwege-Modellbibliothek sind die folgenden Elemente abgebildet:

- Geldnoten,
- Aktoren und Sensoren,
- Sortiereinheiten,
- Senken (Geldnotenspeicher) und Quellen (Geldnotenspender),
- Geldwegepfade und Transportelemente (Walzen, Riemen etc.).

Beispielelemente der Modellbibliothek

Ein Geldwegepfad kann aus verschiedenen Einheiten aufgebaut werden, wie z. B. Transport- oder Sortiereinheiten (vgl. Abschnitt 5.2, S. 129). Hierzu stehen vordefinierte Elemente zur Verfügung. Im Folgenden werden exemplarisch eine Transport- und eine Sortiereinheit gezeigt.

Transporteinheit

Bild 6-3 zeigt die GUI einer Transporteinheit: links mit der Modellierungstiefe $\Gamma = 2$ und rechts mit $\Gamma = 3$. Das Modell der linken Variante besteht aus zwei linearen Guide-Elementen, die den Geldweg begrenzen. Dieses Modell entspricht der in

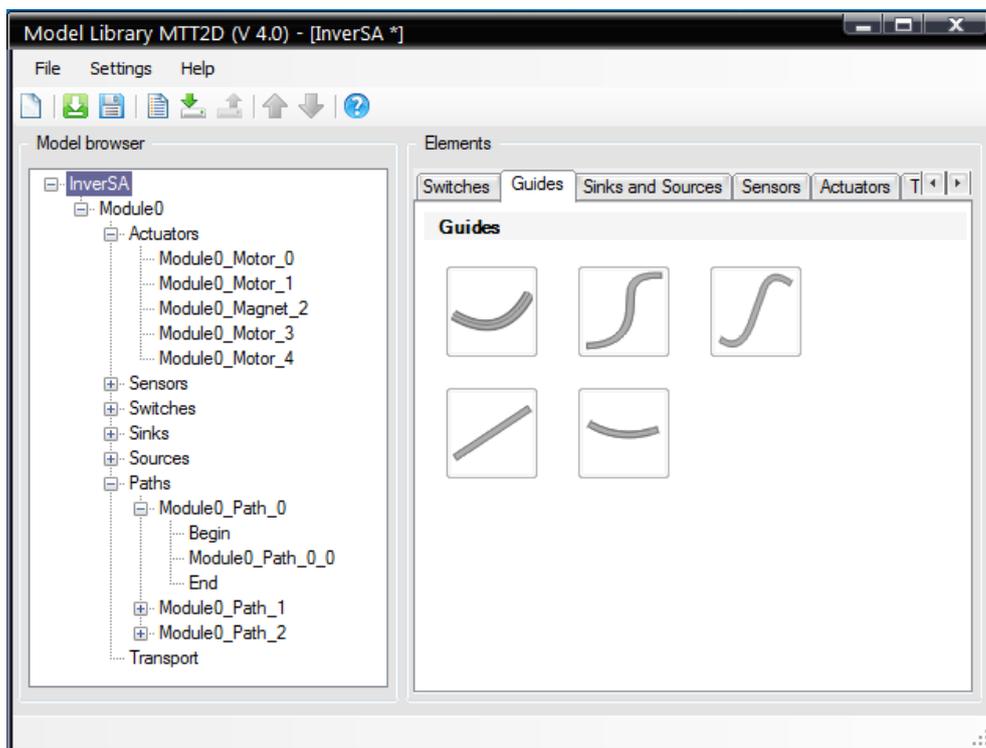


Bild 6-2: Graphische Benutzeroberfläche der Geldwege-Modellbibliothek

Kapitel 5 vorgestellten Transporteinheit (siehe Bild 5-15, S. 149) und ist in der Modellierungstiefenebene der prinzipiellen Machbarkeit ($\Gamma = 2$) abgebildet. Der Anwender kann Start- und Endpunkt des Modells vorgeben oder den Punkt eines bereits angelegten Elementes auswählen. In der Modellbibliothek sind weitere Transporteinheiten der prinzipiellen Machbarkeit hinterlegt, die auf gleiche Weise erzeugt werden können. Sie besitzen alle eine GUI zur Eingabe der Parameter.

Das Modell der rechten Variante besteht aus zwei Transportwalzen und bildet die Ebene des systemspezifischen Verhaltens ($\Gamma = 3$) ab. Die Walzen werden durch einen zweidimensionalen Starrkörper abgebildet. Das Modell besitzt einen rotatorischen Freiheitsgrad um die z-Achse. Die Starrkörper sind durch einen Radius, eine Masse und ein Massenträgheitsmoment um die z-Achse definiert.

Sortiereinheit

Die Sortiereinheit oder auch Weiche besteht aus zwei Transportwegen und einem Verstellmechanismus. Mithilfe eines Verstellaktors kann zwischen den beiden Transportrichtungen umgeschaltet werden. Die Transportwege bestehen, wie auch die Pfadelemente, aus linearen oder kreisförmigen Guide-Elementen. Das Modell besitzt ebenfalls die Modellierungstiefenebene $\Gamma = 2$ (vgl. Bild 5-15, S. 149).

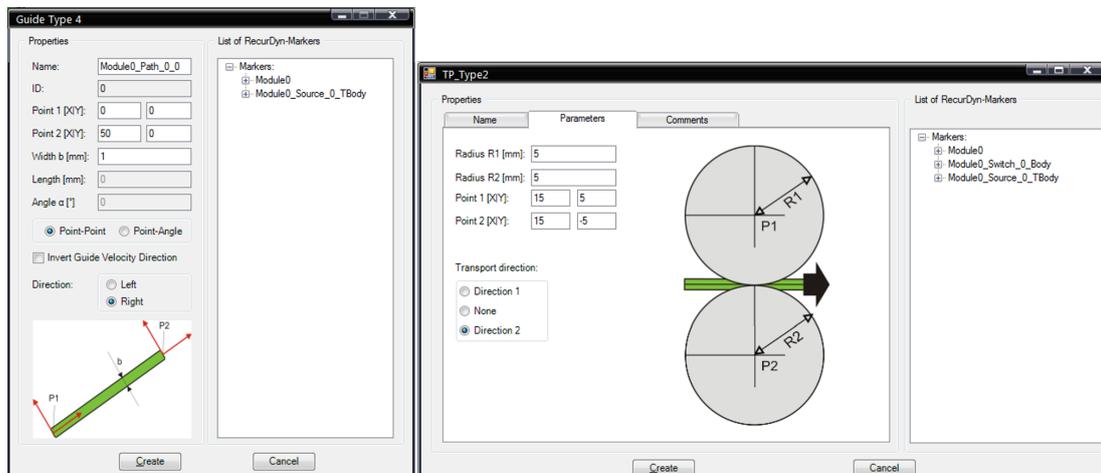


Bild 6-3: GUI einer Transporteinheit mit der Modellierungstiefe $\Gamma = 2$ (links) und $\Gamma = 3$ (rechts)

Bild 6-4 zeigt die GUI einer Sortiereinheit. Sie besteht aus mehreren Reitern. In diesem Reiter werden die Routen der Sortiereinheit angezeigt, und es können bereits erstellte Antriebsaktoren ausgewählt und Getriebefaktoren vorgegeben werden. Weiterhin kann zur Umschaltung der Transportwege ebenfalls ein Aktor gewählt werden. In Bild 6-5 sind die Parameter der Sortiereinheit dargestellt. In diesem Reiter können geometrische Abmaße der Routen sowie Massen und Massenträgheitsmomente der Sortiereinheit definiert werden.

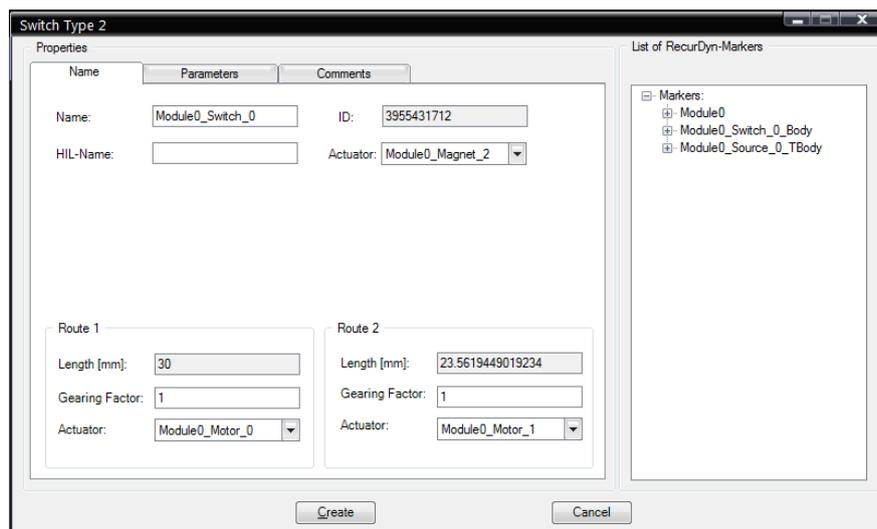


Bild 6-4: GUI einer Sortiereinheit (Reiter Name)

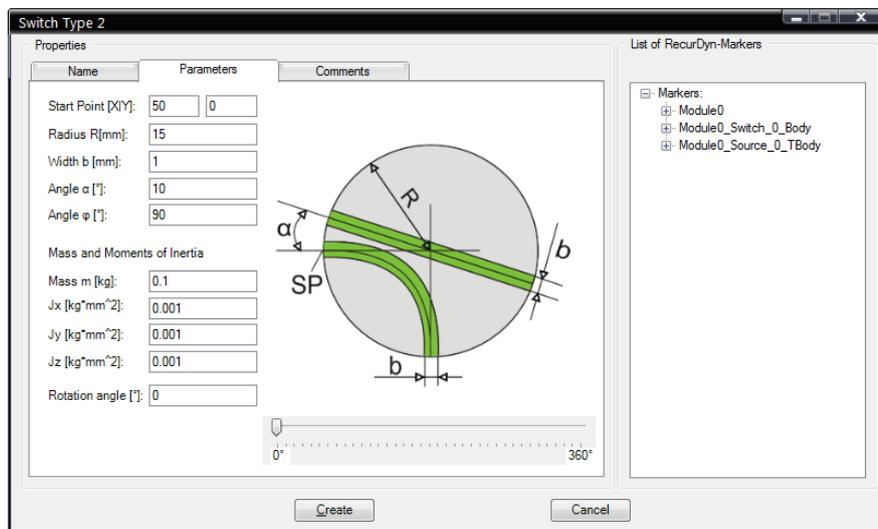


Bild 6-5: GUI einer Sortiereinheit (Reiter Parameter)

6.2 Das Geldwege-Systemmodell

Das Geldwege-Systemmodell dient als zentraler Speicher des Systemwissens über den Geldweg und dokumentiert u. a. den Entwicklungsstand. Wie bereits erwähnt, basiert das Modell auf der Extensible Markup Language (XML). Das Geldwege-Systemmodell ist eine Textdatei, in der die hierarchische Struktur des Geldweges abgebildet ist. Weiterhin dient dieses Modell als Austauschformat zur Wiederverwendung in den verschiedenen Fachdisziplinen und in späteren Projekten.

In diesem Abschnitt werden der Aufbau und die Bestandteile des Geldwege-Systemmodells präsentiert. In einem ersten Schritt werden in das Systemmodell alle Informationen der Geldwege-Modelle aus *RecurDyn* hinterlegt.

Der folgende Quellcode zeigt einen Auszug des XML-Systemmodells. Zuerst sind die XML-Version, der Name und eine Identifikationsnummer sowie übergeordnete Parameter, wie z. B. Kontaktsteifigkeiten oder Dämpfungsmaße, aufgeführt. Weiterhin ist die hierarchische Struktur aus der Geldwege-Modellbibliothek auch im Quellcode des Systemmodells wiederzufinden. Die Struktur des Gesamtmodells besteht aus einem Modul und den jeweiligen Elementen, wie Weichen, Aktoren, Sensoren etc. Für jedes Element sind spezifische Informationen hinterlegt.

Quellcode 6.1: Hierarchischer Aufbau des XML-Systemmodells (Auszug)

```

1 <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
2 <MTT2DModel>
3   <!--Version of XML-Generator: 4.0.0.1-->
4   <!--Developers: Matthias Lochbichler & Vadim Boiko-->
5   <!--Copyright @ RtM, Uni Paderborn 2011-2015-->

```

```

6 <NotePathsModel id="2078928332" name="InverSA">
7   <Comments><![CDATA[]]></Comments>
8   <Bound>
9   </Bound>
10  <Parameters>
11  </Parameters>
12  <Settings>
13  </Settings>
14    <NotePathsModules>
15    <NotePathsModule id="162401860" name="Module0">
16      <Actuators name="Actuators">
17      </Actuators>
18      <Sensors name="Sensors">
19      </Sensors>
20      <Switches name="Switches">
21      </Switches>
22      <Sources name="Sources">
23      </Sources>
24      <Sinks name="Sinks">
25      </Sinks>
26      <Paths name="Paths">
27      </Paths>
28      <Transport name="Transport" />
29    </NotePathsModule>
30  </NotePathsModules>
31 </NotePathsModel>
32 </MTT2DModel>

```

Im Folgenden sind die Quellcodes zweier Beispiелеlemente gezeigt. In Quellcode 6.2 ist ein Geldwegepfad dargestellt. Er besitzt einen Namen und eine ID. Weiterhin sind die Pfadlänge, der Getriebefaktor und die ID des antreibenden Aktors aufgeführt. Der Pfad kann aus verschiedenen Transporteinheiten zusammengesetzt werden.

Quellcode 6.2: Beispiel eines Geldwege-Pfades im XML-Systemmodell (Auszug)

```

1   <!--Paths-->
2   <Paths name="Paths">
3     <Path id="1011255345" name="Module0_Path_0" length="50"
4       gearingFactor="1" actuatorID="1622339979">
5       <Ports>
6         <Port id="1977895326" name="Module0_Path_0.P1">
7           <Position x="0" y="0" />
8         </Port>
9         <Port id="1977895327" name="Module0_Path_0.P2">
10          <Position x="50" y="0" />
11        </Port>
12      </Ports>
13    </Path>
14  </Paths>

```



```

19     </Port>
20 </Ports>
21 <Routes>
22   <Route id="1756535917" name="Module0_Switch_0.R1"
      length="30" actuatorID="1622339979" gearingFactor=
      "1">
23     <InPort port="1756404719" />
24     <OutPort port="1756404720" />
25   </Route>
26   <Route id="1756535918" name="Module0_Switch_0.R2"
      length="23,5619449019234" actuatorID="1622339980"
      gearingFactor="1">
27     <InPort port="1756404719" />
28     <OutPort port="1756404721" />
29   </Route>
30 </Routes>
31 <Script><![CDATA[]]></Script>
32 <Comments><![CDATA[]]></Comments>
33 </Switch>
34 </Switches>

```

Das dargestellte Systemmodell lässt sich beliebig erweitern. Disziplinspezifische und/oder programmspezifische Informationen können in dem XML-Modell hinterlegt werden. Hierzu müssen lediglich die einzelnen Parser angepasst werden, damit jedes Programm die richtigen Informationen erhält.

6.3 Weitere Automatisierungsmaßnahmen

Das bisher gezeigte Geldwege-Systemmodell bildet hauptsächlich RecurDyn-spezifische Informationen ab. Viele dieser Parameter sind auch für andere Fachdisziplinen wichtig, wie z. B. die Länge eines Geldpfades. Sowohl zur Erzeugung eines abstrakten Geldwegemodells für den Einsatz im Rahmen einer HiL-Simulation (siehe Bild 6-1) als auch für ein CAD-Modell könnte diese Information genutzt werden.

Der Vorteil des XML-Modells ist seine beliebige Erweiterbarkeit. Zur Vervollständigung des in Bild 6-1 dargestellten XML-Austauschformats fehlen noch einige Parser. Bisher lassen sich Geldwegemodelle in *RecurDyn* auf diese Weise erzeugen und hinterlegen. Auch eine automatisierte Erstellung einer technischen Dokumentation ist bereits möglich. Es lassen sich folgende Listen erzeugen:

- Sensorliste (u. a. mit Typ, Arbeitsbereich, Position und Modulzugehörigkeit),
- Aktorliste (Aktortyp, Position, antreibende Pfade),
- Pfadliste (Pfadlängen, Modulzugehörigkeit, antreibender Aktor),

- Anzahl der Sortiereinheiten und Verstellaktoren und
- Anzahl der vorgesehenen Walzen/Walzenpaare.

Ziel ist es, dass die eingesetzten Entwicklungstools Informationen aus diesem Geldwege-Systemmodell erhalten. Um die Konsistenz zu bewahren, können Änderungen am Modell ausschließlich mithilfe der entwickelten Geldwege-Modellbibliothek vorgenommen werden, d. h. für die anderen Entwicklungsprogramme existiert eine Art Leserecht. Hierzu müssen weitere Parser entwickelt werden. Zukünftig sollen nach Möglichkeit alle Entwicklungsprogramme Schreib- und Leserechte erhalten, um einen besseren Austausch zwischen den verschiedenen Disziplinen zu ermöglichen. Hierzu sind spezielle Regeln für die Einhaltung der Konsistenz erforderlich, die noch entwickelt werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit eines allgemeinen Austauschformates für verschiedene Entwicklungsprogramme bietet das *Functional Mock-up Interface (FMI)*. Das Format wurde von der Daimler AG initiiert, um den Austausch von Simulationsmodellen zwischen Zulieferern und OEMs zu verbessern [FMI15]. Ziel ist es, ein erstelltes Modell in einen C-Code zu überführen und anschließend anderen Entwicklungsprogrammen zur Verfügung zu stellen. Durch den Export entsteht ein *Functional Mock-up Unit* Modell (FMU-Modell). Es enthält neben dem erzeugten C-Code des Modells auch eine XML-Datei mit allen wichtigen Modellinformationen. Darüber hinaus sind in der FMU ggf. noch Kennlinien oder Tabellen, die von dem Modell benötigt werden, hinterlegt (vgl. [BOA⁺11]). Es wird zwischen zwei Varianten für den Austausch unterschieden. Zum einen kann eine FMU als Modellaustausch (model exchange) ohne Solver und zum anderen als Co-Simulation mit einem Solver exportiert werden [BOA⁺11]. In Bezug auf das prototypische IT-Werkzeug könnte im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten eine mögliche Integration in das FMI-Austauschformat untersucht werden.

7 Resümee und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur *systematischen Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme*. Die Methode dient zum einen zur Verbesserung des Entwurfsprozesses, und zum anderen unterstützt sie den Entwickler bei der Wahl der Modellierungstiefe in den entscheidenden Phasen. Die Erstellung von Modellen mit einer ausreichenden Modellierungstiefe, welche die Modellierungsziele erfüllt, bildete damit den Schwerpunkt dieser Arbeit. Zur Entwicklung der Methode und zur zielgerichteten Nutzung von Modellen im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme musste zunächst der Prozess selbst genauer betrachtet werden. Hier galt es, den Prozess sehr detailliert darzustellen, damit die jeweiligen Schritte deutlich werden, in denen die Modellierungstiefe vom Entwickler gewählt werden muss. Zusammenfassend ergaben sich für diese Arbeit drei wesentliche Ziele:

1. Detaillierung und Ausarbeitung einer Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme,
2. Entwicklung einer Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe und
3. Entwicklung einer prototypischen Werkzeugunterstützung für den Systementwurf.

Durch die Entwicklung einer Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme existiert ein detailliertes Vorgehensmodell, das den gesamten Entwurfsprozess umfasst. Es gliedert sich in vier Entwurfsphasen: Systemkonzipierung, disziplinspezifischer Entwurf, disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik und modellgestützte Systemintegration. Bei mechatronischen Systemen steht i. d. R. die kontrollierte Bewegung als zentrale Funktion im Vordergrund. Aus diesem Grund wurde als eine wesentliche Neuerung die disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik eingeführt, die, begleitend zu den Entwurfsphasen, in den jeweiligen Disziplinen den Informationsaustausch sicherstellt und alle Informationen bzgl. der Dynamik des Systems zusammenträgt. Aufgrund der wachsenden Interdisziplinarität und der damit einhergehenden steigenden Schnittstellenvielfalt zukünftiger mechatronischer Systeme leistet diese Phase einen wichtigen Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung.

Gemäß der Entwurfsmethodik wurde in Kapitel 4 die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme vorgestellt. Da keine allgemeingültige Definitionen der Begriffe Modellierungstiefe und Modellkomplexität existieren, wurden sie zunächst definiert. Anschließend

erfolgte die Klassifikation der Modellierungstiefe auf Basis von definierten Modellierungszielen im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme in vier Ebenen: *ideale Funktion*, *prinzipielle Machbarkeit*, *systemspezifisches Verhalten* und *Bauteiloptimierung*.

In der Systemkonzipierung werden vornehmlich die ersten beiden Ebenen der Modellierungstiefe inkl. der zugeordneten Modellarten eingesetzt. Im disziplinspezifischen Entwurf können Modelle in allen vier Ebenen eingesetzt werden. Mithilfe der Begriffsdefinition, der vier Ebenen der Modellierungstiefe und der Einordnung in den Entwurfsprozess ist die Anforderung nach der Klassifikation der Modellierungstiefe erfüllt. Zur Wahl der einzelnen Ebenen der Modellierungstiefe wurde im Rahmen der vorgestellten Methode eine Vorgehensweise entwickelt. Im ersten Schritt wird anhand der vorgestellten Modellierungsziele und der Definition der einzelnen Ebenen eine Modellierungstiefe gewählt. Lässt sich dem Modellierungsziel keine eindeutige Ebene der Modellierungstiefe zuordnen, erfolgt anhand der definierten Kriterien die Wahl der Modellierungstiefe. Der Entwickler muss entscheiden, ob das dynamische Verhalten eines Systemelements

- für die Untersuchung relevant ist,
- an der Ausführung einer kritischen Funktion beteiligt ist,
- Bestandteil eines unbekanntem Effekts oder Vorgangs ist oder sein könnte.

Gleichzeitig werden dem Entwickler zu jeder Ebene der Modellierungstiefe Modellklassen empfohlen. Die Methode besitzt ein Vorgehensmodell zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe und orientiert sich am Vorgehen bei Modellbildung und -analyse der VDI-Richtlinie 2206 [VDI04, S. 48]. Zunächst werden in der Zielbestimmung die Modellierungsziele festgelegt. Der Entwickler muss sich fragen, zu welchem Zweck ein Modell eingesetzt werden soll. Anhand der Festlegung der Modellierungsziele wird eine Zielmodellierungstiefe für das System gewählt. Dieser Schritt dient zur groben Abschätzung der Modellierungstiefe auf der Systemebene. Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung der Modellierungstiefe auf Systemelementebene. Es ist zu prüfen, ob jedes der Systemelemente mit der zuvor gewählten Zielmodellierungstiefe abgebildet werden muss oder ob einzelne Elemente abstrakter dargestellt werden können. Ggf. kann für einzelne Systemelemente eine geringere Modellierungstiefe gewählt werden. Wichtig ist, dass die zur Untersuchung des festgelegten Modellierungsziels entscheidenden Systemelemente ausreichend abgebildet werden. In den nächsten Schritten erfolgen Modellsynthese und -analyse. Abschließend wird das Modell in ausreichender Form dokumentiert. Eine Modelldokumentation ist wichtig, um ggf. Modelle wiederverwenden zu können. Hierdurch kann der Modellierungsaufwand in Folgeprojekten deutlich reduziert werden. Darüber hinaus lassen sich mithilfe der hier gezeigten Vorgehensweise erstmalig sowohl die Modellierungstiefe und die Modellkomplexität einzelner Modelle als auch für zusammengesetzte Modelle quantifizieren.

In Kapitel 5 wurde die erfolgreiche Anwendung und Validierung der Entwurfsmethodik sowie der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe am Beispiel eines Geldautomaten aufgezeigt. In der Systemkonzipierung des Geldweges wurden zunächst verschiedene Partialmodelle erstellt und u. a. die wesentlichen Funktionen des Verarbeitungsmechanismus identifiziert. Bereits in der Zielbeschreibung sind Modellierungsziele definiert worden. Mithilfe der Kriterien zur Wahl der Modellierungstiefe wurde eine Zielmodellierungstiefe für das jeweilige Modellierungsziel abgeleitet. In der anschließenden Synthese wurden Lösungsmuster zur Erfüllung der Funktionen des Geldweges gewählt. Auf Basis der Lösungsmusterwahl und der definierten Modellierungsziele wurden die relevanten Systemelemente identifiziert. Durch die Anwendung der Methode zur Wahl der Modellierungstiefe konnten unnötige Detaillierungen vermieden werden. Das erstellte Modell bildet den Geldweg in einer ausreichenden Modellierungstiefe ab. Mit diesem idealisierten Modell lassen sich bereits in einer frühen Phase der Entwicklung die prinzipielle Machbarkeit nachweisen und detaillierte Anforderungen an die Komponenten des Geldweges ableiten. Im disziplinspezifischen Entwurf des Geldweges konnte ebenfalls die Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe erfolgreich angewendet werden. Anschließend wurde am Beispiel eines HiL-Konzepts zum Testen der Firmware auf Original-Steuergeräten des Geldautomaten eine Integrationsstrategie gezeigt. Sie wurde zunächst in der disziplinübergreifende Koordination der Systemdynamik geplant und nachfolgend in der modellgestützten Systemintegration ausgeführt. Hierzu wurde eine Testumgebung erstellt.

Das dritte Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines prototypischen IT-Werkzeugs zur Unterstützung des Entwurfsprozesses eines Geldautomaten (siehe Kapitel 6). Das IT-Werkzeug umfasst eine Modellbibliothek des Geldweges eines Automaten mit Modellen unterschiedlicher Modellierungstiefe und bietet die Möglichkeit, ein Systemmodell als zentrales Dokument des Entwurfs zu erstellen. Mithilfe des Werkzeuges werden der Modellierungsaufwand deutlich reduziert und der Entwickler bei den Modellierungsarbeiten unterstützt.

Insgesamt erfüllt die vorliegende Arbeit die definierten Ziele und leistet mithilfe der entwickelten Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung des modellbasierten Entwurfs mechatronischer Systeme. Der identifizierte Handlungsbedarf wird vollständig gedeckt. Darüber hinaus existieren Anknüpfungspunkte für Verwendung und Weiterentwicklung der Methode zur systematischen Wahl der Modellierungstiefe.

Im Kontext der Wiederverwendung von Lösungswissen, insbesondere in Form von Dynamikmodellen, und der Reduzierung des Modellierungsaufwands wird aktuell an der Entwicklung eines multifunktionalen Model-Clients gearbeitet (vgl. [AT14], [AOT15], [OAL⁺16]). Der multifunktionale Model-Client erfüllt im We-

sentlichen drei Aufgaben: die Konfiguration von Dynamikmodellen, das Sicherstellen der Konsistenz und das Zugreifen auf wiederverwendbares Lösungswissen in Form von Modellbibliotheken (vgl. [AOT15], [OAL⁺16],[AT16]). Ziel ist es, Dynamikmodelle unabhängig vom Modellierungstool in unterschiedlichen Modellierungstiefenebenen zu erstellen. Darüber hinaus bietet der Model-Client auch bei der Pflege von Dynamikmodellen Unterstützung. Die Konfiguration eines simulierbaren Systemmodells erfolgt u. a. in Abhängigkeit der gewünschten Modellierungstiefe, die mithilfe der in dieser Arbeit entwickelten Ebenen klassifiziert wird. Diese Forschungsarbeit wird im Querschnittprojekt *Systems Engineering* des Spitzenclusters it's OWL gefördert. Die Ergebnisse des Projektes sind in der Buchreihe „*Intelligente Technische Systeme – Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL*“ veröffentlicht (siehe [its18]).

Ein weiterer Anknüpfungspunkt für die Verwendung und die Weiterentwicklung der Methode liegt in der Inbetriebnahme von Anlagen. Eines der Hauptprobleme beim Bau von Produktionsanlagen sind Inbetriebnahme und Fehlerbereinigung der Steuerungssoftware. Nach FRIEBEN et al. werden bis zu 60 % der Inbetriebnahmezeit für solche Fehlerkorrekturen beansprucht, die erst nach der vollständig aufgebauten und montierten Produktionsanlage erfolgen können [FSG⁺15]. Die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) bietet die Möglichkeit, frühzeitige Tests der Steuerung einer maschinenbaulichen Anlage an einem Simulationsmodell durchzuführen. Die Steuerung kann dabei real oder virtuell sein. Durch die virtuelle Inbetriebnahme können bereits in den frühen Phasen der Anlagenentwicklung Programmierfehler entdeckt, Kollisionen erkannt und Funktionsstörungen detektiert werden. Die Herausforderung ist dabei, eine anforderungsgerechte Modellierungstiefe zu finden. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes wurde eine Methodik zur virtuellen Inbetriebnahme maschinenbaulicher Anlagen auf Basis von objektorientierten Verhaltensmodellen mit wählbarer Modellierungstiefe entwickelt (vgl. [FT14], [FSG⁺15], [Brö15]). Eines der Ziele war die dynamische Umschaltung zwischen Teilmodellen unterschiedlicher Modellierungstiefe während der Simulationszeit zur Reduktion dieser. Hierzu wurden die entwickelten Modellierungstiefenebenen verwendet. Für die Umschaltung zwischen Teilmodellen wurden nur die ersten drei Ebenen verwendet, da Teilmodelle der Modellierungstiefenebene 4 aufgrund des hohen Detaillierungsgrades und den damit einhergehenden, hohen Simulationszeiten nicht für solche Anwendungen geeignet sind.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten somit weiteres Forschungspotenzial auf das mehrere Forschungsprojekte aufbauen. Insbesondere der Ansatz zur Quantifizierung der Modellkomplexität sowie zur Quantifizierung der Modellierungstiefe zusammengesetzter Modelle bietet weiteres Potential.

8 Literaturverzeichnis

- [aca13] DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN acatech (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.* http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. Version: April 2013.
- [ACFT⁺10] ALVAREZ CABRERA, A.; FOEKEN, M.; TEKIN, O.; WOESTENENK, K.; ERDEN, M.; DE SCHUTTER, B.; VAN TOOREN, M.; BABUSKA, R.; VAN HOUTEN, F.; TOMIYAMA, T.: Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design. In: *Mechatronics* 20, 8 (2010), S. 876–886.
- [Ada15] *MSC Software.* <http://http://www.mscsoftware.com/product/adams>. Version: 2015.
- [Ana15] ANACKER, H.: *Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme.* Diss., Universität Paderborn, 2015.
- [ANR12] ANDERL, R.; NATTERMANN, R.; ROLLMANN, T.: *Das W-Modell. Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme.* <http://www.plmportal.org>. Version: 2012.
- [AOT15] ABRISHAMCHIAN, F.; OESTERSÖTEBIER, F.; TRÄCHTLER, A.: Feature Model Approach for Managing Variability of Dynamic Behavior Models in Mechatronic Systems. In: *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2015)*. Houston, TX, 2015.
- [AT14] ABRISHAMCHIAN, F.; TRÄCHTLER, A.: Configuration of Mechatronic Systems Using Feature Models. In: *2nd International Conference on System-Integrated Intelligence*. Bremen, 2014, S. 27–34.
- [AT16] ABRISHAMCHIAN, F.; TRÄCHTLER, A.: Feature Model Based Interface Design for Development of Mechatronic Systems. In: *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. Edinburgh, Scotland, 2016.
- [ATM14] *ATMIA – ATM Industry Association.* <http://www.atmia.com>. Version: 2014.

- [BB96] BRASSARD, G.; BRATLEY, P.: *Fundamentals of Algorithmics*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [BCR96] BRENNAN, K. E.; CAMPBELL, S. L.; R., P. L.: *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, 1996.
- [Bea10] BEATER, P.: *Regelungstechnik und Simulationstechnik mit Scilab und Modelica*. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2010.
- [Bee94] BEERENS, C.: *Zur Modellierung nichtlinearer Dämpfungsphänomene in der Strukturmechanik*. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 1994.
- [Ben05] BENDER, K.: *Embedded Systems. Qualitätsorientierte Entwicklung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [BH86a] BAE, D.-S.; HAUG, E. J.: A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: Part I. Open Loop Systems. In: *Mechanics of Structures and Machines* 15, 3 (1986), S. 359–382.
- [BH86b] BAE, D.-S.; HAUG, E. J.: A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: Part II. Closed Loop Systems. In: *Mechanics of Structures and Machines* 15, 4 (1986), S. 481–506.
- [BH87] BAE, D.-S.; HAUG, E. J.: A Recursive Formulation for Constrained Mechanical System Dynamics: Part III. Parallel Processor Implementation. In: *Mechanics of Structures and Machines* 16, 2 (1987), S. 249–269.
- [BIT15a] BITKOM (Hrsg.); VDMA (Hrsg.); ZVEI (Hrsg.): *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0*. <http://www.plattform-i40.de>. Version: April 2015.
- [BIT15b] BITKOM (Hrsg.); VDMA (Hrsg.); ZVEI (Hrsg.): *Whitepaper FuE-Themen*. <http://www.plattform-i40.de>. Version: April 2015.
- [BK79] BUHR, M. (Hrsg.); KOSING, A. (Hrsg.): *Kleines Wörterbuch der marxistisch-leninistischen Philosophie*. Dietz Verlag, Berlin, 1979.
- [BKI14] BEIERLE, C.; KERN-ISBERNER, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. Springer Vieweg Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [BLF99] BERNERS-LEE, T.; FISCHETTI, M.: *Weaving the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by Its Inventor*. HarperCollins, New York, 1999.

- [BOA⁺11] BLOCHWITZ, T.; OTTER, M.; ARNOLD, M.; BAUSCH, C.: The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models. In: CLAUSS, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Modelica Conference*. Dresden, 2011, S. 105–114.
- [Bol04] BOLTON, W.: *Bausteine mechatronischer Systeme*. Pearson Education, München, 2004.
- [Bor10] BORUTZKY, W.: *Bond Graph Methodology Development and Analysis of Multi-disciplinary Dynamic System Models*. Springer-Verlag, London, 2010.
- [BPW09] BALLAS, R. G.; PFEIFER, G.; WERTHSCHÜTZKY, R.: *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik. Dynamischer Entwurf – Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Brö15] BRÖKELMANN, J.: *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen*. Diss., Universität Paderborn, 2015.
- [BR16] BOSCHERT, S.; ROSEN, R.: Digital Twin – The Simulation Aspect. In: HEHENBERGER, P. (Hrsg.); BRADLEY, D. (Hrsg.): *Mechatronic Futures – Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Springer International Publishing, Switzerland, 2016, S. 59–74.
- [BT96] BROOKS, R. J.; TOBIAS, A. M.: Choosing the Best Model: Level of Detail, Complexity, and Model Performance. In: *Mathematical and Computer Modeling* 24, 4 (1996), S. 1–14.
- [BT04] BURG, K.; THOMEE, V.: *Partielle Differentialgleichungen. Höhere Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Mathematiker*. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [CBP00] CHWIF, L.; BARRETTO, M. R. P.; PAUL, R. J.: On Simulation Model Complexity. In: JOINES, J. A. (Hrsg.); BARTON, R. R. (Hrsg.); KANG, K. (Hrsg.); FISHWICK, P. A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. Orlando, FL, 2000, S. 449–455.
- [Cel91] CELLIER, F. E.: *Continuous System Modeling*. Springer-Verlag US, New York, 1991.
- [CK06] CELLIER, F. E.; KOFMAN, E.: *Continuous System Simulation*. Springer-Verlag US, New York, 2006.
- [Czi08] CZICHOS, H.: *Mechatronik. Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.

- [DIN09a] *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2006)*. Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [DIN09b] *Papier und Pappe – Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung – Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min) (ISO 1924-2:2008)*. Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [DJS+13] DZIWOK, S.; JUST, V.; SCHIERBAUM, T.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; GAUSEMEIER, J.: Integrierter Regelungs- und Softwareentwurf für komplexe mechatronische Systeme. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.); DUMITRESCU, R. (Hrsg.); RAMMIG, F.-J. (Hrsg.); SCHÄFER, W. (Hrsg.); TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): *9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn, 2013, S. 375–394.
- [DM03] DAMIC, V.; MONTGOMERY, J.: *Mechatronics by Bond Graphs. An Object-Oriented Approach to Modelling and Simulation*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [DN16] *Diebold Nixdorf Inc.* <http://www.dieboldnixdorf.com/de-de>. Version: 2016.
- [Dre06] DRESIG, H.: *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Dum10] DUMITRESCU, R.: *Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme*. Diss., Universität Paderborn, 2010.
- [DWOA+95] DE WIT, C. C.; OLSSON, H.; ASTRÖM, K. J.; LISCHINSKY, P.: A New Model for Control of Systems with Friction. In: *IEEE Transaction on Automatic Control* 40, 3 (1995), S. 419–425.
- [Dym15] *Dassault Systems.* <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>. Version: 2015.
- [EGZ12] EIGNER, M.; GILZ, T.; ZAFIROV, R.: Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. In: MARJANOVIC, D. (Hrsg.); STORGA, M. (Hrsg.); PAVKOVIC, N. (Hrsg.); BOJCETIC, N. (Hrsg.): *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference*. Dubrovnik, 2012, S. 1667–1676.
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2007.

- [ERZ14] EIGNER, M.; ROUBANOV, D.; ZAFIROV, R.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [EZB14] *Europäische Zentralbank*. <http://www.ecb.europa.eu>. Version: 2014.
- [Fis15] FISCHER, Y.: *Wissensbasierte probabilistische Modellierung für die Situationsanalyse am Beispiel der maritimen Überwachung*. Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [Föl08] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2008.
- [Föl14] FÖLLINGER, O.: *Nichtlineare Regelungen I. Grundbegriffe Anwendung der Zustandsebene, Direkte Methode*. de Gruyter Oldenbourg, München, 2014.
- [FMI15] *Modelica Association: FMI – Functional Mock-up Interface*. <https://www.fmi-standard.org/>. Version: 2015.
- [FMS15] FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R.: *OMG Systems Modeling Language Tutorial*. <http://www.omgsysml.org>. Version: 2015.
- [Fre11] FREYMAN, R.: *Strukturodynamik. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [FSG⁺15] FRIEBEN, T.; SCHNEIDER, M.; GAUSEMEIER, J.; TRÄCHTLER, A.: Virtuelle Inbetriebnahme mit wählbarer Modellierungstiefe. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110, 4 (2015), S. 227–232.
- [FT14] FRIEBEN, T.; TRÄCHTLER, A.: Virtual Commissioning by Means of an Adaptive Selection of the Modeling Depth. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2014)*. Montreal, Québec, 2014.
- [Fun14] *FunctionBay GmbH*. <http://www.functionbay.de>. Version: 2014.
- [Gau08] GAUSEMEIER, J.: *Domänenübergreifende Vorgehensmodelle*. <http://www.transmechatronic.de>. Version: 2008.
- [GDS⁺13] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; STEFFEN, D.; CZAJA, A. M.; WIEDERKEHR, O.; TSCHIRNER, C.: *Studie: Systems Engineering in der industriellen Praxis*. Paderborn, 2013.
- [Geg06] GEGNER, J.: *Komplexe Diffusionsprozesse in Metallen*. Expert-Verlag, Renningen, 2006.

- [GFD⁺08a] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 1). In: *Konstruktion* Ausgabe Juli/August 7/8 (2008), S. 59–66.
- [GFD⁺08b] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus (Teil 2). In: *Konstruktion* Ausgabe September 9 (2008), S. 91–108.
- [GL00] GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: *Entwicklungsumgebung Mechatronik. Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme*. HNI-Verlagsschriftreihe, Paderborn, 2000.
- [GLL12] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.); LANZA, G. (Hrsg.); LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [GSA⁺11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.); RAMMIG, F. (Hrsg.); SCHÄFER, W. (Hrsg.); TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): *8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn, 2011, S. 7–35.
- [GTS14] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.); TRÄCHTLER, A. (Hrsg.); SCHÄFER, W. (Hrsg.): *Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme: Effektiver Austausch von Lösungswissen in Branchenerwertschöpfungsketten*. Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [GV14] GÜNTHER, M.; VELTEN, K.: *Mathematische Modellbildung und Simulation: Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2014.
- [GV17] GRIEVES, M.; VICKERS, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLLEN, F.-J. (Hrsg.); FLUMERFELT, S. (Hrsg.); ALVES, A. (Hrsg.): *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems – New Findings and Approaches*. Springer International Publishing, Switzerland, 2017, S. 85–113.
- [GW08] GARNIER, H.; WANG, L.: *Identification of Continuous-time Models from Sampled Data*. Springer-Verlag, London, 2008.
- [Hah99] HAHN, M.: *OMD – Ein Objektmodell für den Mechatronikentwurf – Anwendung in der objektorientierten Modellbildung mechatro-*

- nischer Systeme unter Verwendung von Mehrkörpersystemformalismen.* Diss., Universität Paderborn, 1999.
- [Har04] HAROLD, E. R.: *XML 1.1 Bible.* Wiley Publishing, Hoboken, NJ, 2004.
- [Har10] HARCHENKO, J.: *Mechatronischer Entwurf eines neuartigen aktiven Fahrzeugfederungssystems für PKW unter Verwendung einer reversierbaren Flügelzellenpumpe.* Diss., Universität Paderborn, 2010.
- [HEG07] HEISSING, B.; ERSOY, M.; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch.* Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [Hes06] HESTERMEYER, T.: *Strukturierte Entwicklung der Informationsverarbeitung für die aktive Federung eines Schienenfahrzeugs.* Diss., Universität Paderborn, 2006.
- [HFV⁺15] HABERFELLNER, R.; FRICKE, E.; VÖSSNER, S.; WECK, O. L.: *Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung.* Orell Füssli Verlag, Zürich, 2015.
- [HGP07] HEIMANN, B.; GERTH, W.; POPP, K.: *Mechatronik: Komponenten – Methoden – Beispiele.* Carl-Hanser-Verlag, München, 2007.
- [Hip04] HIPPMANN, G.: *Modellierung von Kontakten komplex geformter Körper in der Mehrkörperdynamik.* Diss., Technische Universität Wien, 2004.
- [HL11] HAUSSER, F.; LUCHKO, Y.: *Mathematische Modellierung mit MATLAB.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011.
- [HM08] HEINRICH, G.; MAIRON, K.: *Objektorientierte Systemanalyse.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2008.
- [HNS⁺97] HONEKAMP, U.; NAUMANN, R.; STOLPE, R.; LÜCKEL, J.: Structuring Approach for Complex Mechatronic Systems. In: ROLLER, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 30th International Symposium on Automotive Technology and Automation: ISATA Conference on Mechatronics.* Florenz, 1997.
- [HS12] HERING, E.; SCHÖNFELDER, G.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete.* Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [IK08] IMBODEN, D. M.; KOCH, S.: *Systemanalyse: Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.

- [Ill14] ILLG, I.: *Mechatronischer Entwurf und Erprobung einer regelbaren Federung für ein leichtes geländegängiges Kettenfahrzeug*. Diss., Universität Paderborn, 2014.
- [IM11] ISERMANN, R.; MÜNCHHOF, M.: *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Ise06] ISERMANN, R.: *Fahrdynamik-Regelungen*. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [Ise08] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [ISO15] *Codes for the representation of currencies (ISO 4217:2015)*. International Organization for Standardization, Genf, 2015.
- [Its15] *Spitzencluster it's OWL: Intelligente technische Systeme Ostwestfalen-Lippe*. <http://www.its-owl.de>. Version: 2015.
- [its18] *it's OWL Clustermanagement GmbH (Hrsg.): Intelligente Technische Systeme – Lösungen aus dem Spitzencluster it's OWL*. <http://www.springer.com/series/15146>. Version: 2018.
- [Jan99] JANOCHA, H.: *Adaptronics and Smart Structures. Basics, Materials, Design and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [Jan10] JANSCHKE, K.: *Systementwurf mechatronischer Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [JIZ⁺10] JUST, V.; ILLG, I.; ZEINELDIN, T.; TRÄCHTLER, A.: Efficient Design of Complex Mechatronic Products Using the Example of the Separation-Process of an ATM. In: *Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2010)*. Vancouver, British Columbia, 2010.
- [JK03] JELALI, M.; KROLL, A.: *Hydraulic Servo-Systems: Modelling, Identification and Control*. Springer-Verlag, London, 2003.
- [JLT⁺07] JUST, V.; LANDWEHR, M.; TRÄCHTLER, A.; JÄKER, K.-P.: Modellierung des Papiertransports in Geldautomaten. In: *Tagungsband VDI Mechatronik 2007*. Wiesloch, 2007, S. 461–475.
- [JT14a] JUST, V.; TRÄCHTLER, A.: *Modellbasierter Entwurf mechatronischer Systeme*. Vorlesungsunterlagen, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, 2014.

- [JT14b] JUST, V.; TRÄCHTLER, A.: *Modellbildung und Simulation I*. Vorlesungsunterlagen, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, 2014.
- [Jun95] JUNKER, F.: Modular-hierarchisch strukturierte Modellbildung mechanischer Systeme. In: *Archive of Applied Mechanics* 65, 4 (1995), S. 227–245.
- [Jun02] JUNG, S.: *Erarbeitung eines wissensbasierten Systems für die Modellierung von Mehrkomponenten-Mehrphasen-Gleichgewichten*. Diss., Universität Halle, 2002.
- [Jus14] JUST, V.: *Modelbasierte Analyse und regelungstechnische Maßnahmen zur Optimierung des Vereinzelnvorgangs in Bankautomaten*. Diss., Universität Paderborn, 2014.
- [Kar15] KARPFINGER, C.: *Höhere Mathematik in Rezepten*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [KB76] KLAUS, G. (Hrsg.); BUHR, M. (Hrsg.): *Philosophisches Wörterbuch*. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig, 1976.
- [Kee11] KEESMAN, K. J.: *System Identification*. Springer-Verlag, London, 2011.
- [KEQ+12] KALLENBACH, E.; EICK, R.; QUENDT, P.; STRÖHLA, T.; FEINDT, K.; KALLENBACH, M.; RADLER, O.: *Elektromagnete – Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [KHK10] KUFNER, A.; HAUG, K.; KLEMM, P.: Modellierung von Montagemaschinen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.); RAMMIG, F. (Hrsg.); SCHÄFER, W. (Hrsg.); TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): *Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn, 2010, S. 115–126.
- [Kie07] KIEL, E. (Hrsg.): *Antriebslösungen. Mechatronik für Produktion und Logistik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Kla08] KLASSEN, D.: *Prüfstandsentswurf zur automatisierten Identifikation der physikalischen Parameter von Transportwalzen in Geldautomaten*. Bachelorarbeit, Universität Paderborn, 2008.
- [KN99] KRAUSE, U.; NESEMANN, T.: *Differenzgleichungen und diskrete dynamische Systeme. Eine Einführung in Theorie und Anwendungen*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1999.
- [Kro13] KROLL, A.: *Computational Intelligence. Probleme, Methoden und technische Anwendungen*. Oldenbourg Wissenschafts-Verlag, München, 2013.

- [Kru19] KRUSE, D.: *Teilautomatisierte Parameteridentifikation für die Validierung von Dynamikmodellen in dem modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme*. Diss., Universität Paderborn, 2019.
- [KS15] KOCH, J.; STÄMPFLE, M.: *Mathematik für das Ingenieurstudium*. Carl Hanser Verlag, München, 2015.
- [KSS⁺11] KOSSIAKOFF, A.; SWEET, W. N.; SEYMOUR, S. J.; BIEMER, S. M.: *Systems Engineering. Principles and Practice*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2011.
- [KST14] KRUSE, D.; SCHWEERS, C.; TRÄCHTLER, A.: Methodology for a partly automated parameter identification for the validation of multidomain models. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2014)*. Montreal, Québec, 2014.
- [Kuf12] KUFNER, A.: *Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen*. Diss., Universität Stuttgart, 2012.
- [Kuy97] KUYPERS, F.: *Klassische Mechanik*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1997.
- [Law91] LAW, A. M.: Simulation model's level of detail determines effectiveness. In: *Industrial Engineering* 23, 10 (1991), S. 16–18.
- [Law09] LAW, A. M.: How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: ROSSETTI, M. (Hrsg.); HILL, R. R. (Hrsg.); JOHANSSON, B. (Hrsg.): *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Austin, TX, 2009, S. 24–33.
- [Lüd03] LÜDECKE, A.: *Simulationsgestützte Verfahren für den Top-Down-Entwurf heterogener Systeme*. Diss., Universität Duisburg-Essen, 2003.
- [Leo00] LEONHARD, W.: *Regelung elektrischer Antriebe*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [LHW05] LARSSON, S.; HAF, H.; WILLE, F.: *Partielle Differentialgleichungen und numerische Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Lie06] LIENING, J.: *Layoutsynthese elektronischer Schaltungen. Grundlegende Algorithmen für die Entwurfsautomatisierung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.

- [Lin09] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [LKS00] LÜCKEL, J.; KOCH, T.; SCHMITZ, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. In: *Tagungsband VDI Mechatronik. Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik*. Wiesloch, 2000.
- [LLO⁺15] LANKEIT, C.; LOCHBICHLER, M.; OESTERSÖTEBIER, F.; TRÄCHTLER, A.; LANDWEHR, M.: From Goals to Systems via Technical Requirements and Physical Models. In: *Proceedings of the first IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. Rom, 2015, S. 112–117.
- [LLT15a] LANKEIT, C.; LOCHBICHLER, M.; TRÄCHTLER, A.: Challenges in Requirements Engineering for Mechatronic Systems – Problem Analysis and First Approach. In: *Jurnal Teknologi* 76, 4 (2015), S. 1–5.
- [LLT⁺15b] LOCHBICHLER, M.; LANKEIT, C.; TRÄCHTLER, A.; LANDWEHR, M.; HOISCHEN, L.: Systematische Wahl der Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel eines Geldautomaten. In: BERTRAM, T. (Hrsg.); CORVES, B. (Hrsg.); JANSCHKE, K. (Hrsg.): *Tagungsband VDI Mechatronik 2015*. Dortmund, 2015, S. 143–148.
- [Loc09] LOCHBICHLER, M.: *Modellierung und Identifizierung der Einzelsteifigkeiten von Transportwalzen in Geldautomaten*. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2009.
- [LOT14] LOCHBICHLER, M.; OESTERSÖTEBIER, F.; TRÄCHTLER, A.: Dynamic Behavior Models and Their Modeling Depth in the Design Process of Mechatronic Systems. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2014)*. Montreal, Québec, 2014.
- [LSB⁺12] LOCHBICHLER, M.; SCHMÜDDERICH, T.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodology for Selecting the Modeling Depth of Object-Oriented Behavioral Models. In: *International Conference on Modeling and Simulation (ICMS), WASET World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 67*. Zürich, 2012, S. 327–331.
- [Lue77] LUENBERGER, D. G.: Dynamic equations in descriptor form. In: *IEEE Transaction on Automatic Control* 22, 3 (1977), S. 312–321.

- [Lun10a] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Lun10b] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 2. Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [MP15] MUGGEO, C.; PFENNING, M.: Die Rolle von MBSE und PLM im Industrial Internet. In: SCHULZE, S.-O. (Hrsg.); MUGGEO, C. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. Ulm, 2015, S. 279–287.
- [MPS08] MAGNUS, K.; POPP, K.; SEXTRO, W.: *Schwingungen. Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [MWJ+07] MUHS, D.; WITTEL, H.; JANNASCH, D.; VOSSIEK, J.: *Roloff / Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung*. Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [NA10] NATTERMANN, R.; ANDERL, R.: Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptronic Systems. In: *Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2010)*. Vancouver, British Columbia, 2010.
- [NE77] NOUR ELDIN, H. A.: Minimalrealisierung der Matrix-Übertragungsfunktion – Minimal realization of the matrix transfer function. In: *at-Automatisierungstechnik*. Band 25, Heft 1-12, 1977, S. 82–87.
- [Nel01] NELLES, O.: *Nonlinear System Identification. From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [Neu90] NEUNZERT, H.: Von Modellen und wie man sie nutzt. In: FRIEMEL, H.-J. (Hrsg.); MÜLLER-SCHÖNBERGER, G. (Hrsg.); SCHÜTT, A. (Hrsg.): *Forum '90 Wissenschaft und Technik. Neue Anwendungen mit Hilfe aktueller Computer-Technologien*. Trier, 1990, S. 10–21.
- [Neu06] NEUGEBAUER, R. (Hrsg.): *Parallelkinematische Maschinen. Entwurf, Konstruktion, Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [No109] NOLLAU, R.: *Modellierung und Simulation technischer Systeme. Eine praxisnahe Einführung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.

- [OAL⁺16] OESTERSÖTEBIER, F.; ABRISHAMCHIAN, F.; LANKEIT, C.; JUST, V.; TRÄCHTLER, A.: Approach for an Integrated Model-Based System Design of Intelligent Dynamic Systems Using Solution and System Knowledge. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on System-Integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering (SysInt 2016)*. Paderborn, 2016.
- [ODB⁺12] OESTERSÖTEBIER, F.; DZIWOK, S.; BAUER, F.; TRÄCHTLER, A.; SCHÄFER, W.; GAUSEMEIER, J.: Unterstützung des mechatronischen Entwurfs durch die effektive Suche nach Lösungselementen mithilfe von semantischen Technologien. In: MAURER, M. (Hrsg.); SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering*. Paderborn, 2012, S. 207–216.
- [Oes18] OESTERSÖTEBIER, F.: *Modellbasierter Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme mithilfe semantischer Technologien*. Diss., Universität Paderborn, 2018.
- [OJT⁺12] OESTERSÖTEBIER, F.; JUST, V.; TRÄCHTLER, A.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Model-Based Design of Mechatronic Systems by Means of Semantic Web Ontologies and Reusable Solution Elements. In: *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. Nantes, 2012.
- [OWT14] OESTERSÖTEBIER, F.; WANG, P.; TRÄCHTLER, A.: A Modelica Contact Library for Idealized Simulation of Independently Defined Contact Surfaces. In: *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*. Lund, 2014, S. 929–937.
- [Pap09] PAPULA, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 1*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [PBF⁺05] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Pfa94] PFAFF, G.: *Regelung elektrischer Antriebe I – Eigenschaften, Gleichungen und Strukturbilder der Motoren*. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- [Pid96] PIDD, M.: Five Simple Principles of Modelling. In: CHARNES, J. M. (Hrsg.); MORRICE, D. J. (Hrsg.); BRUNNER, D. T. (Hrsg.); SWAIN, J. J. (Hrsg.): *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*. Coronado, CA, 1996, S. 721–728.

- [PL11] PONN, J.; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [PP17] PAUL, S.; PAUL, R.: *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 3 – Dynamische Netzwerke: zeitabhängige Vorgänge, Transformationen, Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [PS12] PINTELON, R.; SCHOUKENS, J.: *System Identification: A Frequency Domain Approach*. Wiley-IEEE Press, New York, 2012.
- [RB95] ROBINSON, S.; BHATIA, V.: Secrets of Successful Simulation Projects. In: ALEXOPOULOS, C. (Hrsg.); KANG, K. (Hrsg.); LILEGDON, W. R. (Hrsg.); GOLDSMAN, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. Arlington, VA, 1995, S. 61–67.
- [Rec14] RECURDYN: *RecurDyn/ Solver. Theoretical Manual*. Function-Bay Inc., Korea, 2014.
- [Rob08] ROBINSON, S.: Conceptual Modeling for Simulation, Part I: Definition and Requirements. In: *Journal of the Operational Research Society* 59 (2008), S. 278–290.
- [Rod12] RODDECK, W.: *Einführung in die Mechatronik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.
- [Rot96] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 3: Verbindungen und Verschlüsse, Lösungsfindung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [Rot00] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [Rot01] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Kataloge*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [Rot15] ROTH, W.: *Schnitt durch einen Geldautomaten*. 2015 <https://de.wikipedia.org/wiki/Geldautomat>
- [RS10] RILL, G.; SCHAEFFER, T.: *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation*. Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [Sal93] SALT, J. D.: Simulation should be easy and fun! In: EVANS, G. W. (Hrsg.); MOLLAGHASEMI, M. (Hrsg.); RUSSELL, E. C. (Hrsg.); BILES, W. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*. Los Angeles, CA, 1993, S. 1–5.

- [Sch07] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe. Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Sch08] SCHÜSSLER, H. W.: *Digitale Signalverarbeitung 1. Analyse diskreter Signale und Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Sch09] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Sch10] SCHÜSSLER, H. W.: *Digitale Signalverarbeitung 2. Entwurf diskreter Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Sch11] SCHMELTER, S.: *Automatisierung des Firmwaretestprozesses Bargeld verarbeitender Systeme mittels HiL-Simulation*. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2011.
- [Sch16] SCHARFENBAUM, I.: *Funktionale Grundausslegung von Fahrwerkregelsystemen in der frühen Entwicklungsphase*. Diss., Technische Universität Dresden, 2016.
- [SE14] SCHIEHLEN, W.; EBERHARD, P.: *Technische Dynamik. Rechnergestützte Modellierung mechanischer Systeme im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [SGM08] STELZMANN, U.; GROTH, C.; MÜLLER, G.: *FEM für Praktiker. Band 2: Strukturdynamik*. Expert Verlag, Renningen, 2008.
- [Sim62] SIMON, H. A.: The Architecture of Complexity. In: *Proceedings of the American Philosophical Society* 106, 6 (1962), S. 467–482.
- [Sim15] *The MathWorks GmbH*. <http://de.mathworks.com/products/simscape/>. Version: 2015.
- [SJ14] SCHAFT, D. van d.; JELTSEMA, D.: Port-Hamiltonian Systems Theory: An Introductory Overview. In: *Foundations and Trends in Systems and Control*, 2014, S. 173–378.
- [SLB⁺13] SCHMÜDDERRICH, T.; LOCHBICHLER, M.; BRÖKELMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: Methodik zur anforderungsgerechten Wahl der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen zur virtuellen Inbetriebnahme. In: BERTRAM, T. (Hrsg.); CORVES, B. (Hrsg.); JANSCHKE, K. (Hrsg.): *Tagungsband VDI Mechatronik 2013*. Aachen, 2013, S. 43–48.
- [Spi14] *40 Jahre Bargeld-Spender: Als Geldautomaten noch Öffnungszeiten hatten*. <http://www.spiegel.de>. Version: 2014.

- [SPR12] SCHOUKENS, J.; PINTELON, R.; ROLAIN, Y.: *Mastering System Identification in 100 Exercises*. Wiley-IEEE Press, New York, 2012.
- [Sta73] STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer-Verlag, Wien, New York, 1973.
- [Sta15] STARK, J.: *Product Lifecycle Management. Volume 1: 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Springer International Publishing Switzerland, Genf, 2015.
- [Str15] STRAUMANN, N.: *Theoretische Mechanik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [SWP12] STREHMEL, K.; WEINER, R.; PODHAISKY, H.: *Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen. Nichtsteife, steife und differentialalgebraische Gleichungen*. Vieweg + Teubner Verlag und Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2012.
- [TJD⁺12] TEICHRIEB, H.; JUST, V.; DZIWOK, S.; POHLMANN, U.; SCHIERBAUM, T.; TRÄCHTLER, A.: Modellbasierter Entwurf zweier kooperierender Delta-Roboter. In: MAURER, M. (Hrsg.); SCHULZE, S.-O. (Hrsg.): *Tag des Systems Engineerings*. Paderborn, 2012, S. 219–228.
- [Toe02] TOEPPER, S.: *Die mechatronische Entwicklung des Parallelroboters TRIPLANAR*. Diss., Universität Paderborn, 2002.
- [Trä15] TRÄCHTLER, A.: *Grundlagen der Mechatronik und Systemtechnik*. Vorlesungsunterlagen, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Universität Paderborn, 2015.
- [TSG16] TIETZE, U.; SCHENK, C.; GAMM, E.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [VDI82] *VDI 2222 (Blatt 2) – Konstruktionsmethodik. Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1982.
- [VDI94] *VDI 2422 – Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1994.
- [VDI97] *VDI 2222 (Blatt 1) – Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997.
- [VDI03] *VDI 2211 – Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, Berechnungen in der Konstruktion*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2003.

- [VDI04] *VDI 2206 – Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004.
- [VDI09] *VDI 2209 – 3-D-Produktmodellierung. Technische und organisatorische Voraussetzungen, Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen, Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2009.
- [VDI13] *VDI 3633 – Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Begriffsdefinition.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2013.
- [Ver00] VERSTEEGEN, G.: *Das V-Modell in der Praxis.* Hanser Verlag, München, Wien, 2000.
- [VWB+09] VAJNA, S.; WEBER, C.; BLEY, H.; ZEMAN, K.: *CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [W3C15] *The World Wide Web Consortium (W3C).* <http://www.w3.org/XML>. Version: 2015.
- [Wal95] WALLASCHEK, J.: Modellierung und Simulation als Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte. In: *VDI-Berichte 1215 (1995)*, S. 35–50.
- [Win14] *Wincor Nixdorf International GmbH.* <http://www.wincor-nixdorf.com>. Version: 2014.
- [Wol78] WOLFFGRAMM, H.: *Allgemeine Technologie: Elemente, Strukturen und Gesetzmäßigkeiten technologischer Systeme.* VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1978.
- [Wol92] WOLZ, U.: Die Einbindung der technischen Berechnung bei einem Fahrzeugzulieferer in den Entwicklungsprozess. In: *VDI Gesellschaft Fahrzeugtechnik: Berechnung im Automobilbau.* Würzburg, 1992, S. 59–79.
- [WPH+84] WEBSTER, D. B.; PADGETT, M. L.; HINES, G. S.; STROIS, D. L.: Determining the Level of Detail in a Simulation Model. In: *Computers and Industrial Engineering* 8 (1984), S. 215–225.
- [Xu11] XU, K.: *Modellbasierte Analyse und Regelung eines Geldnoten-Vereinzelungsprinzips für Geldautomaten.* Bachelorarbeit, Universität Paderborn, 2011.
- [Xu13] XU, K.: *Modellbildung von strömungsmechanischem Verhalten für die Anwendung in mechatronischen Systemen.* Masterarbeit, Universität Paderborn, 2013.

- [ZW06] ZIRN, O.; WEIKERT, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praxisnahe Einführung.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.

**Das Heinz Nixdorf Institut –
Interdisziplinäres Forschungszentrum
für Informatik und Technik**

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

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

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

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

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

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

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

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 367 SCHWEERS, C.: Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 367, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-86-1
- Bd. 368 SCHIERBAUM, T.: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 368, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-87-8
- Bd. 369 BODDEN, E.; DRESSLER, F.; DUMITRESCU, R.; GAUSEMEIER, J.; MEYER AUF DER HEIDE, F.; SCHEYTT, C.; TRÄCHTLER, A. (Hrsg.): Intelligente technische Systeme. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 369, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-88-58
- Bd. 370 KÜHN, A.: Systematik zur Release-Planung intelligenter technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 370, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-89-2
- Bd. 371 REINOLD, P.: Integrierte, selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 371, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-90-8
- Bd. 372 BÄUMER, F. S.: Indikatorbasierte Erkennung und Kompensation von ungenauen und unvollständig beschriebenen Softwareanforderungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 372, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-91-5
- Bd. 373 ECKELT, D.: Systematik zum innovationsorientierten Intellectual Property Management. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 373, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-92-2
- Bd. 374 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 13. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 23. und 24. November 2017, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 374, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-93-9
- Bd. 375 WESTERMANN, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 375, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-94-6
- Bd. 376 JÜRGENHAKE, C.: Systematik für eine prototypenbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme in der Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 376, Paderborn, 2017 – ISBN 978-3-942647-95-3
- Bd. 377 WEBER, J.: Modellbasierte Werkstück und Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit in NC-Programmen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 377, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-96-0
- Bd. 378 OESTERSÖTEBIER, F.: Modellbasierter Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme mithilfe semantischer Technologien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 378, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-97-7
- Bd. 379 ABELDGAWAD, K.: A System-Level Design Framework for Networked Driving Simulation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 379, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-98-4

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 380 JUNG, D.: Local Strategies for Swarm Formations on a Grid. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 380, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-942647-99-1
- Bd. 381 PLACZEK, M.: Systematik zur geschäftsmodellorientierten Technologiefrühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 381, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-00-2
- Bd. 382 KÖCHLING, D.: Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 382, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-01-9
- Bd. 383 KAGE, M.: Systematik zur Positionierung in technologieinduzierten Wertschöpfungsnetzwerken. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 383, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-02-6
- Bd. 384 DÜLME, C. (Hrsg.): Systematik zur zukunftsorientierten Konsolidierung variantenreicher Produktprogramme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 384, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-03-3
- Bd. 385 GAUSEMEIER, J.: Vorausschau und Technologieplanung. 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 8. und 9. November 2018, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 385, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-04-0
- Bd. 386 SCHNEIDER, M.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung und Analyse von Wertschöpfungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 386, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-05-7
- Bd. 387 ECHTERHOFF, B.: Methodik zur Einführung innovativer Geschäftsmodelle in etablierten Unternehmen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 387, Paderborn, 2018 – ISBN 978-3-947647-06-4
- Bd. 388 KRUSE, D.: Teilautomatisierte Parameteridentifikation für die Validierung von Dynamikmodellen im modellbasierten Entwurf mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 388, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-07-1
- Bd. 389 MITTAG, T.: Systematik zur Gestaltung der Wertschöpfung für digitalisierte hybride Marktleistungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 389, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-08-8
- Bd. 390 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 15. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 21. und 22. November 2019, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 390, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-09-5
- Bd. 391 SCHIERBAUM, A.: Systematik zur Ableitung bedarfsgerechter Systems Engineering Leitfäden im Maschinenbau. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 391, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-10-1
- Bd. 392 PAI, A.: Computationally Efficient Modelling and Precision Position and Force Control of SMA Actuators. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 392, Paderborn, 2019 – ISBN 978-3-947647-11-8
- Bd. 393 ECHTERFELD, J.: Systematik zur Digitalisierung von Produktprogrammen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 393, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-12-5