

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

Interaktiver simulationsgestützter Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme

Peter Maria Andreas Georg Stich

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Albert Albers

Die Dissertation wurde am 27.03.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.07.2017 angenommen.

Die genaue Formulierung eines Problems ist wesentlich schwieriger als dessen Lösung, welche dann nur noch eine Frage des abstrakten Denkens und der experimentellen Kenntnisse ist.

Albert Einstein

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München und der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU).

Mein besonderer Dank gilt den beiden Institutsleitern des *iwb*, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, für die wohlwollende Förderung und die interessante sowie lehrreiche Zeit am Institut. Bei Herrn Prof. Reinhart bedanke ich mich darüber hinaus für die großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Herrn Prof. Zäh gilt mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Sehr gefreut hat mich die Übernahme des Korreferates durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Albers, dem Leiter des Instituts für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Ich bin dabei sehr dankbar für die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit sowie die angeregte Diskussion.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen der beiden Institute, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, allen voran der Themengruppe Automation und Robotik sowie der Abteilung Anlagen- und Steuerungstechnik. Dieser Dank gilt auch allen meinen Studenten und studentischen Hilfskräften, mit denen ich viele Projekte gemeinsam gestalten konnte. Des Weiteren geht mein Dank an Georg Götz, Christoph Richter sowie an Dr.-Ing. Julian Backhaus für die kritische Begutachtung meines Manuskriptes, die wertvollen Anregungen sowie die vielen gemeinsamen Projekte, beruflich wie privat. Besonderer Dank gilt auch meinem früheren Kollegen und Mentor Dr.-Ing. Frédéric-Felix Lacour. Ihm sowie auch Stefan Hüttner, Dr.-Ing. Thomas Hensel und Dr.-Ing. Fabian Meling möchte ich darüber hinaus für die tolle gemeinsame Zeit am *iwb* und darüber hinaus bedanken.

Mein größter und herzlichster Dank aber gilt meiner gesamten Familie, allen voran meinen Eltern und meiner Freundin Lara, die mich in meinem Handeln stets unterstützt und mich dadurch immer weiter vorangebracht haben. Ihr habt mir während meiner Arbeit stets tapfer den Rücken freigehalten, mich immer neu motiviert und mir in schwierigen Situationen neue Kraft gegeben. Ohne Euch hätte ich diese Arbeit nicht in dieser Form vollenden können.

München/Coburg, im September 2017

Peter Stich

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Mechatronische Entwicklungsprozesse im Wandel der Zeit.....	1
1.2 Bestehende Herausforderungen und resultierende Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	8
2 Begriffsbestimmung und Grundlagen	9
2.1 Kapitelüberblick und Definition wesentlicher Begriffe	9
2.2 Grundlagen produktionstechnischer Systeme	11
2.2.1 Prozesse der Produkt- und Produktionsentstehung	11
2.2.2 Produktions- und Verarbeitungssysteme.....	14
2.2.3 Transportprozesse in Produktionssystemen	16
2.2.4 Elemente der System- und Automatisierungstechnik	17
2.3 Grundlagen der Modellbildung und Simulation.....	19
2.3.1 Einsatzgebiete und spezifische Ausprägungen der Simulation.....	19
2.3.2 Aufbau und Ablauf von Simulationsstudien	20
2.3.3 Methoden der Systemanalyse und Modellbildung	21
2.3.4 Qualitätskriterien für die Simulation von Produktionssystemen...	23
2.4 Grundlagen der Informatik und Computergrafik	26
2.4.1 Animation und physikbasierte Simulation	26
2.4.2 Geometrische Modellrepräsentation und Datenformate	28
2.4.3 Diskretisierung und Zerlegung von Geometriemodellen	30
2.4.4 Interaktive Eingabemethoden.....	32
2.5 Grundlagen formlabiler Objekte.....	34
2.6 Zusammenfassung der Grundlagen	36

3	Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1	Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich.....	37
3.2	Systematischer Entwurf mechatronischer Systeme	37
3.2.1	Vorgehensmodelle zur interdisziplinären Entwicklung	37
3.2.2	Methoden zur Unterstützung des Systementwurfs	41
3.2.3	Prinzipskizzen und automatische Skizzeninterpretation	43
3.2.4	Entwicklungsumgebungen zum Systementwurf.....	45
3.2.5	Fazit	47
3.3	Simulationsgestützte mechatronische Entwicklungsprozesse	48
3.3.1	Phasen- und disziplinspezifischer Einsatz der Simulation	48
3.3.2	Mechatronikorientierte Ansätze in der Simulationstechnik	50
3.3.3	Funktionsorientierung und Modularisierung der Modellbildung ..	54
3.3.4	Einsatzbedingungen in der industriellen Praxis.....	55
3.3.5	Fazit	57
3.4	Physikbasierte Simulation mechatronischer Systeme.....	58
3.4.1	Übersicht der physikbasierten Simulation.....	58
3.4.2	Systemstruktur der physikbasierten Simulation	60
3.4.3	Modellbildungsprozess und technische Schnittstellen	63
3.4.4	Entwicklungsumgebungen zur physikbasierten Simulation.....	65
3.4.5	Fazit	66
3.5	Simulation formlabiler Objekte	67
3.5.1	Übersicht bestehender Ansätze.....	67
3.5.2	Detailbetrachtung ausgewählter Simulationsverfahren	69
3.5.3	Modellbildungsprozess zur Abbildung formlabiler Objekte	72
3.5.4	Entwicklungsumgebungen zur Simulation formlabiler Objekte ...	74
3.5.5	Fazit	75
3.6	Zusammenfassung des Standes der Erkenntnisse	76

4	Resultierende Anforderungen an den Systementwurf.....	77
4.1	Kapitelüberblick und Handlungsschwerpunkte.....	77
4.2	Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme	77
4.2.1	Identifikation benötigter Verarbeitungsfunktionen.....	77
4.2.2	Interaktive Definition problemspezifischer Lösungsalternativen .	78
4.3	Erweiterung der physikbasierten Simulation.....	80
4.3.1	Modelle zur Abbildung von Verarbeitungsprozessen.....	80
4.3.2	Adaption und Erweiterung von Modellbildungsprozessen	82
4.4	Technische Integration in Entwicklungsumgebungen.....	84
4.5	Methodische Integration in Entwicklungsprozesse	84
4.6	Zusammenfassung der Handlungsschwerpunkte	85
5	Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Systementwurf ...	87
5.1	Kapitelüberblick und Darstellung des Gesamtkonzepts.....	87
5.2	Physikbasierte Modelle verarbeitungstechnischer Systeme.....	89
5.2.1	Übersicht des Teilkonzeptes.....	89
5.2.2	Formlabiles Objektverhalten mit bestehenden Physik-Engines....	90
5.2.3	Formlabiles Objektverhalten mit diskreten Volumenelementen...	97
5.2.4	Abbildung von Verarbeitungsgütern	101
5.2.5	Abbildung verarbeitungstechnischer Wirkpaarungen.....	103
5.3	Adaption und Erweiterung des Modellbildungsprozesses	106
5.3.1	Übersicht des Teilkonzeptes.....	106
5.3.2	Vorverarbeitung von bestehenden Geometrieelementen	107
5.3.3	Ableitung und Anreicherung des Physikmodells	109
5.3.4	Integration von Verhaltens- und Steuerungsmodellen	113
5.3.5	Skalierbare und modulare Gestaltung physikbasierter Modelle .	115

5.4	Interaktive Skizziertechnik für mechatronische Systeme	118
5.4.1	Übersicht des Teilkonzeptes	118
5.4.2	Syntaktische Interpretation der Skizzenelemente	120
5.4.3	Semantische Interpretation der Skizzenelemente	124
5.4.4	Pragmatik der Skizzeninterpretation und Modellvernetzung	126
5.4.5	Schnittstellen zu bestehenden Entwicklungsumgebungen	129
5.5	Methodische Integration in den Entwicklungsprozess	131
5.5.1	Übersicht des Teilkonzeptes	131
5.5.2	Prozessmodell eines inkrementellen Systementwurfs	132
5.5.3	Zustandsorientierte Funktionsstrukturierung	136
5.5.4	Interaktives Skizzieren von Systeminkrementen	138
5.5.5	Schnittstellen zu bestehenden Entwicklungsprozessen	140
5.6	Zusammenfassung der erstellten Methodik	142
6	Umsetzung und Evaluierung der Entwurfsmethodik	143
6.1	Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich	143
6.2	Softwaretechnische Realisierung der Teilkonzepte	143
6.2.1	Umsetzung der erweiterten physikbasierten Modelle	143
6.2.2	Umsetzung der Skizzeninterpretation	145
6.2.3	Schnittstellen zu Entwicklungswerkzeugen	147
6.3	Struktur einer Entwurfs- und Simulationsumgebung	148
6.3.1	Überlagerte Softwarearchitektur	148
6.3.2	Programmablauf und Interaktionsbeziehungen	149
6.3.3	Installations- und Betriebsvoraussetzungen	150
6.4	Evaluierung im Umfeld der Verpackungstechnik	150
6.4.1	Rahmenbedingungen des Anwendungsbeispiels	150
6.4.2	Identifikation der benötigten Verpackungsfunktionen	151
6.4.3	Interaktiver und simulationsgestützter Systementwurf	152
6.5	Zusammenfassung der Umsetzung und der Evaluierung	154

7	Analyse und Bewertung der Nutzenpotenziale.....	155
7.1	Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich	155
7.2	Einsatzpotenziale und resultierender Nutzen	155
7.2.1	Erweiterung der physikbasierten Simulation	155
7.2.2	Interaktiver simulationsgestützter Systementwurf	157
7.2.3	Technische und methodische Integration	159
7.3	Anwendungsspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	160
7.3.1	Einsparpotenziale im Entwicklungsprozess	160
7.3.2	Wirtschaftliche Bewertung der Einsparpotenziale	162
7.3.3	Spezifische Ausprägungen der Entwurfsmethodik	165
7.4	Zusammenfassung der Nutzenpotenziale	166
8	Resümee und Ausblick	167
8.1	Schlussbetrachtung der Arbeit.....	167
8.2	Ausblick auf weitere Handlungsfelder	168
9	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	171
10	Verzeichnis eigener Veröffentlichungen	177
11	Verzeichnis referenzierter Veröffentlichungen	185

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
3D-PDF	dreidimensionale Darstellung im Portable Document Format
3DXML	XML-basiertes 3D-Datenformat von Dassault Systèmes
Ach	area of convex hull (Fläche des konvexen Hüllkörpers)
Aer	area of enclosing rectangle (Fläche des umschließenden Rechtecks)
Alt	area of largest triangle (Fläche des größten Dreiecks)
AML	Automation Markup Language
API	Application Programming Interface
B-REP	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAS	Computer Aided Styling
CAx	Computer Aided
CMM	Capability Maturity Model
COLLADA	COLLABorative Design Activity
CPU	Central Processing Unit
DIKW	Data-Information-Knowledge-Wisdom

Abkürzung	Bedeutung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
DXF	Drawing Interchange Format
E/A	Ein-/ Ausgangssignale
E-CAD	Electronic Computer Aided Design
EEC	Eplan Engineering Center
EN	Europäische Normen
ERP	Enterprise Resource Planning
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMS	Feder-Masse-Systeme
GPU	Graphics Processing Unit
GUI	Graphical User Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	Internationale Normen
IT	Informationstechnologie
JT	Jupiter Tessellation
k-DOP	k-Discrete Oriented Polytopes
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
LADDER	Language to Describe Drawing, Display and Editing in sketch Recognition

Abkürzung	Bedeutung
Len	length of strokes (Gesamtlänge der skizzierten Striche)
MCD	Mechatronics Concept Designer
ME	Mechatronische Einheiten
MES	Manufacturing Execution System
MDM	Multi-Domain Mapping Matrix
MiL	Model-in-the-Loop
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MKS	Mehrkörpersimulation
NC	Numerical Control (Numerische Steuerung)
NURBS	Nonuniforme rationale B-Splines
Pch	perimeter of convex hull (Umfang des konvexen Hüllkörpers)
PDF	Portable Document Format
PDM	Produktdatenmanagement
PE	Polyethylen
PEP	Produktentwicklungsprozess
Per	perimeter of enclosing rectangle (Umfang des umschließenden Rechtecks)
PLC	Programmable Logic Controller (Speicherprogrammierbare Steuerung)
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
PTCA	Planen-Tun-Checken-Aktion
RC	Robot Control (Robotersteuerung)

Abkürzung	Bedeutung
RPT	Rapid Prototyping
SDK	Software Developer Kit
SiL	Software-in-the-Loop
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modellig Language
ve ³	virtual engineering environment extended
ve	Modul von ve ³ zur Szenenverwaltung
veAPP	Modul von ve ³ zur Ausführung des Programms
veBT	Modul von ve ³ zur Anbindung der Physik-Engine Bullet
veDB	Modul von ve ³ zur Dateiverwaltung
veGUI	Modul von ve ³ zur grafischen Benutzerschnittstelle
veHK	Modul von ve ³ zur Anbindung der Physik-Engine Havok™
veHUI	Modul von ve ³ zur hardwareseitigen Benutzerinteraktion
veNET	Modul von ve ³ zur Kommunikation mit der Steuerungstechnik
veNX	Modul von ve ³ zur Anbindung der Physik-Engine PhysX™
veODE	Modul von ve ³ zur Anbindung der Physik-Engine ODE
veSIM	Modul von ve ³ zur Erstellung der Entwurfsmetaphern und der Implementierung der Simulationsobjekte
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDE	Verband der Elektrotechnik und Elektronik
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

Abkürzung	Bedeutung
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VR	Virtuelle Realität
VRML	Virtual Reality Modelling Language
WPF	Windows Presentation Foundation
XML	eXtensible Markup Language

Formelzeichenverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
a	-	Variable
AfA_{HW}	€	Kalkulatorische Abschreibung Hardware
AfA_{SW}	€	Kalkulatorische Abschreibung Software
e	%	Prozentuale Zeiteinsparung
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
FK_G	€	Jährliche Fixkosten gesamt
FK_{HW}	€	Jährliche Fixkosten Hardware
FK_{SW}	€	Jährliche Fixkosten Software
\in	-	Element aus
G	N	Gewichtskraft
G_{VZ}	€	Jährlicher monetärer Vorteil vor Zins
h	m	Durchbiegung eines Balkens
I_{BS}	€	Investitionskosten Software Betriebssystem
I_{EG}	€	Investitionskosten Eingabegerät
I_{EU}	€	Investitionskosten Software Entwurfsumgebung
I_G	€	Investitionskosten gesamt
I_{HW}	€	Investitionskosten Hardwaresysteme
I_{RE}	€	Investitionskosten Rechneinheit
I_{SW}	€	Investitionskosten Softwaresysteme
I_y	m ⁴	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
K_{BS}	-	Biegesteifigkeitskennzahl
K_E	€	Kostensatz Entwicklungsingenieur

Variable	Einheit	Bedeutung
K_{HW}	€	Kalkulatorische Zinsen Hardware
K_{SW}	€	Kalkulatorische Zinsen Software
l	m	Länge des Balkens
n	-	Variable, vielfaches
N	h/a	Jährliche Nutzungsdauer
R	-	Raum der reellen Zahlen
S	€	Kostenvorteil
T_A	a	Amortisationszeit (statisch)
T_{HW}	a	Nutzungsdauer Hardware
T_{SW}	a	Nutzungsdauer Software
W_{SW}	€	Jährliche Wartungs- und Schulungskosten
x	-	Variable
y	-	Variable
Z_{HW}	%	Zinssatz Abschreibung Hardware
Z_{SW}	%	Zinssatz Abschreibung Software

1 Einleitung

1.1 Mechatronische Entwicklungsprozesse im Wandel der Zeit

„Es ist nicht die stärkste Spezies, die überlebt, auch nicht die intelligenteste, es ist diejenige, die sich am ehesten dem Wandel anpassen kann“ (Charles Darwin¹). Dies gilt auch und insbesondere für die interdisziplinären Entwicklungsprozesse der Produktionstechnik. Veränderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen und sich neu orientierende gesellschaftliche Ansprüche stellen die Industrie vor große Herausforderungen (EßER ET AL. 2001; ABELE & REINHART 2011; RUSSWURM 2013, S. 21–24; LANZINGER & GATTERER 2014). Die Sicherstellung und Ausweitung von Wettbewerbsvorteilen sind dabei Hauptziele der Unternehmen, um im Wandel der Zeit und im internationalen Konkurrenzkampf bestehen zu können (LAUER 2010; FRIEDLI & SCHUH 2012, S. 369; SIMON 2012). Der Schlüssel zum Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit ist, gerade in forschungs- und wissensintensiven Branchen wie dem deutschen Maschinen- und Anlagenbau, eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Unternehmensportfolios (HACHMÖLLER 2006; LINDEMANN & GORNAU 2009; BRECHER 2011). Die dazu notwendigen innovativen Ansätze entstehen in kollektiven Prozessen mit vielen Rückkopplungseffekten und sind durch einen interdisziplinären Charakter geprägt (GAUSEMEIER ET AL. 2001; KRAUSE ET AL. 2007; NUSSER ET AL. 2007).

Die Entwicklungsprozesse innerhalb der Produktionstechnik sind unterschiedlichen Einflussgrößen unterworfen. Neben begrenzt wirkenden Mikro- oder Branchentrends (NEEF 2008; HUBER & KIRIG 2013; SEITZ ET AL. 2014) spielen hierbei vor allem sogenannte Megatrends, wie z. B. die Energie- und Ressourceneffizienz, die Individualisierung oder die Digitalisierung, eine wichtige Rolle (ABELE & REINHART 2011; SCHWENKER & RAFFEL 2012). In diesem Zuge stellt auch der mechatronische Gedanke einen bestimmenden Faktor produktionstechnischer Systeme dar (KRAUSE ET AL. 2007). War diese Tendenz anfänglich stark von der Mechanik und Elektronik geprägt (HARASHIMA ET AL. 1996; ISERMANN 2008), so nimmt heute die Informationstechnik einen immer bedeutender werdenden Aspekt innerhalb der Produkt- und Prozessentwicklung ein (BROY ET AL. 2006; CZICHOS 2008). Demzufolge verlagert sich der Fokus im Kontext einer mechatronischen Entwicklung von einer mechanischen hin zu einer informationstechnischen

¹ Zitiert nach GROTH (2011, S. 12).

Problemstellung (HEIMANN ET AL. 2001; DESILVA 2005; BEHRENDT ET AL. 2006; REINER & SCHAPE 2010; STETTER 2010, S. 26; VDMA 2010; HUTTERER 2012; RUSSWURM 2013; SPUR 2013; BROY & HARHOFF 2015; BMWi 2015). Ehemals systembestimmende mechanische Bestandteile werden, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, durch mechatronische Einheiten mit dezentraler Intelligenz abgelöst (BOLTON 2004, S. 502–518; BROY 2010). Die Maschinen und Anlagen der Zukunft zeichnen sich durch ein mechatronisches Grundprinzip aus. Sie besitzen eine mechanische Grundstruktur, werden elektrisch angetrieben und durch eine kontextspezifische Steuerungssoftware synchronisiert (VDI 2206, S. 10; JAMAL 2009; VDMA 2010; MAUDERER 2013, S. 1; Mensch & Mechatronik 2015; VDMA 2014). Die Mechatronik ist zukünftig nicht mehr nur die Schnittmenge der beteiligten Disziplinen. Vielmehr stellt sie den Rahmen für disziplinübergreifende technische Systeme dar (VDI 2206, S. 10; STETTER & BLUM 2010; EIGNER 2012), in die weitere funktionell erforderliche Technologien integriert werden (TOMIZUKA 2002; CZICHOS 2008, S. 1; VDMA 2014, S. 76). Zukunftsprojekten wie Industrie 4.0 folgend, sind Produktionssysteme und Wertschöpfungsnetzwerke von übermorgen durch ihre intelligenten Bestandteile charakterisiert, die sich lösungsorientiert verknüpfen lassen und somit flexibel auf bestehende Herausforderungen eines zunehmend volatilen Umfelds reagieren können (GANSCHAR ET AL. 2013; POST 2013; SENDLER ET AL. 2013; SPUR 2013; BAUER ET AL. 2014; BAUERNHANSL 2014a).

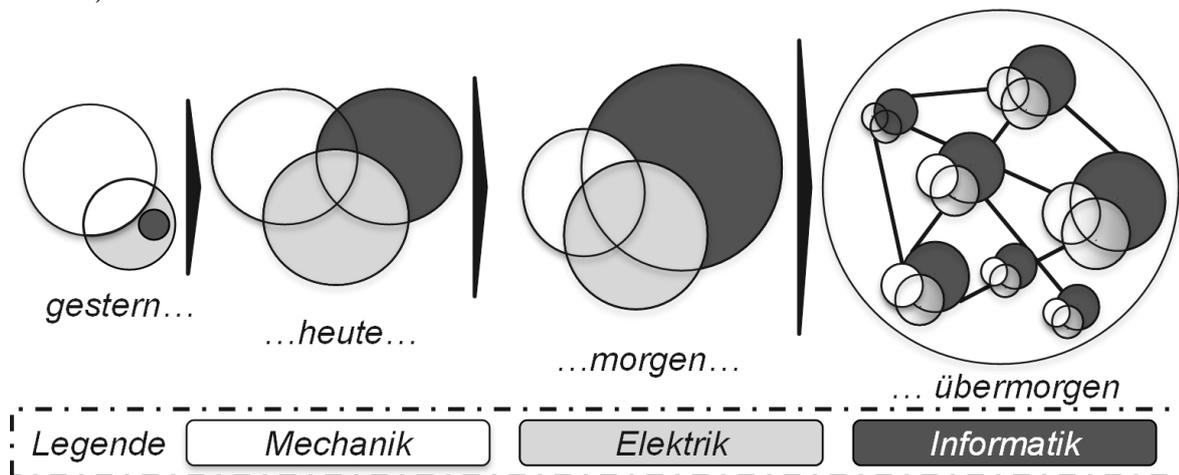


Abbildung 1.1: Veränderung disziplinspezifischer Systembestandteile auf dem Weg zur intelligent vernetzten Produktion (eigene Darstellung der in HEIMANN ET AL. 2001, S. 2; VDE 2005; CZICHOS 2008, S. 1; STETTER & BLUM 2010, S. 70; KAGERMANN ET AL. 2012; BETTENHAUSEN & KOWALEWSKI 2013, S. 4; FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 7; BAUERNHANSL 2014b; MENSCH & MECHATRONIK 2015; REINHART ET AL. 2015 wiedergegebenen Daten).

1.2 Bestehende Herausforderungen und resultierende Zielsetzung

Die frühzeitige Funktionsabsicherung, beispielsweise in einer interdisziplinären Simulation, stellt neben geeigneten Vorgehensweisen zur Synchronisation der Teildisziplinen eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme dar. Nach WESTKÄMPER (2006, S. 131) und (VDI 2235, S. 3) werden 70 Prozent der Gesamtkosten in der Entwicklung festgelegt. Diesbezügliche Fehlentscheidungen, vor allem in frühen Phasen, lassen sich über den zeitlichen Projektverlauf nur mit exponentiell steigendem Aufwand beheben (LANGERMANN 2009, S. 9; EHRENSPIEL ET AL. 2014, S. 10–16; ALBERS ET AL. 2016c). Kürzere Durchlaufzeiten sowie eine erhöhte Flexibilisierung der Produktionssysteme (KOREN 2010; NYHUIS ET AL. 2010, S. 3) bedingen ein frühzeitiges Wissen über das resultierende Systemverhalten (ALBERS ET AL. 2014). „Eine sinnvolle Fehlervermeidungsstrategie im Sinne eines First-Time-Right-Ansatzes besteht [daher] in einer intensiven und sorgfältigen Ausgestaltung der ersten Phase(n) des PEP“² (MEIBNER 2012, S. 5). Hierbei wird zunehmend die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Disziplinen entscheidend (SCHUH ET AL. 2009, S. 14–15; LINDEMANN 2009, S. 155–171; BRACHT ET AL. 2011, S. 56–57).

Im Zuge eines steigenden Anteils der Informationstechnik haben sich für die Steuerung von dynamischen Prozessen, die mit dezentralen Antriebseinheiten umgesetzt werden (HIRSCHMANN 2000, S. 127), numerische Steuerungssysteme etabliert (KAIN 2011, S. 8; MAAG & KRAUSE 2011, S. 30–34; VDMA 2014). Die funktionalen Systemelemente werden bereits in frühen Phasen spezifiziert, in denen noch wenig über das resultierende Systemverhalten bekannt ist. Bisher existieren wenig Möglichkeiten, die Qualität von systembestimmenden mechatronischen Einheiten frühzeitig in der Entwicklung sicherzustellen (KOÇ 2003; FELGEN 2007; BUCHWITZ 2012; EIGNER ET AL. 2012a). Zusätzlich entstehen im Maschinen- und Anlagenbau durch fachdisziplinorientierte (ANDERL ET AL. 2012, S. 17–18) und sequentielle Entwicklungsprozesse (SCHUH ET AL. 2009, S. 15; VERL & HAUBELT 2009, S. 55) Missverständnisse und zeitliche Engpässe, deren Folgen sich in einer mangelnden Qualität widerspiegeln (SCHÄTZ ET AL., S. xi–xii; VDMA 2006, S. 2; WAGNER ET AL. 2008). Weitere Ursachen sind unter anderem eine unzureichende Abstimmung der beteiligten Fachbereiche (WALTHER 2001, S. 4; HELLENBRAND 2013, S. 13), divergierende organisatorische Reifegrade (RAUCHENBERGER 2010;

² ProduktEntwicklungsProzess.

SPIEGELBERGER 2011; BENSIEK 2013) sowie unterschiedliche Sichtweisen auf das Produkt bzw. den Produktionsprozess (DIEHL 2010).

Die virtuellen Techniken zur Unterstützung der Entwicklung, wie CAD- oder E-CAD-Systeme, haben sich von einer zeichnungsorientierten und methodischen Konstruktion auf dem Weg hin zu einem intelligenten digitalen Engineering kontinuierlich weiterentwickelt (KRAMER & NECULAU 1998, S. 360; MELCHINGER & SCHMITZ 2003; BRYCHTA 2004, S. 9; ALTINTAS ET AL. 2005). Sie sind in produkt- und prozessseitigen Entstehungsprozessen vertreten (SPUR 1997, S. 44; WITTEL ET AL. 2009, S. 18) und finden auch in nachgelagerten Phasen im Lebenszyklus einer Produktionsanlage Einsatz (DIERBEN 2002, S. 5; DÖBLER 2008; SCHREIBER & ZIMMERMANN 2012). Jedoch erfordern diesbezügliche Ansätze ein ausgeprägtes Expertenwissen und decken meist nur spezifische Problemstellungen ab (TRANSMECHATRONIC 2010). Dies erschwert den Austausch in interdisziplinären Teams, weshalb vor allem in frühen Phasen immer noch auf eine Digitalisierung verzichtet wird. Vielmehr kommen am Anfang der Entwicklung einfache Hand- und Prinzipskizzen zum Einsatz, die aufgrund einer einfachen und intuitiv verständlichen Abbildung von Entwürfen eine Interaktion zwischen den einzelnen Fachexperten unterstützen (COOK & AGAH 2009; ALVARADO 2011). Diese intuitive und interaktive Gestaltungsmöglichkeit ist in digitalen Entwurfs-umgebungen, vor allem vor dem Hintergrund einer disziplinübergreifenden Entwicklung, nicht oder nur eingeschränkt vorhanden (WACHSMUTH 2011; KOCH ET AL. 2014). Modellgestützte Ansätze, wie beispielsweise SysML, ermöglichen einen strukturierten Entwurf von Systemen (WEILKIENS 2011; ALBERS & ZINGEL 2013). Jedoch kann dem Anwender aufgrund des statischen Modellcharakters kein direktes Feedback über das resultierende dynamische Systemverhalten zurückgespiegelt werden.

Bestehende simulationsgestützte Ansätze zur Abbildung des dynamischen Verhaltens sind meist in einem kontextspezifischen sowie disziplinabhängigen Umfeld entstanden und werden werkzeugseitig singular durch mechatronikorientierte und industriell einsetzbare Lösungen unterstützt (BARFIELD & CLAUDELL 2001, S. 34; DIERBEN 2002, S. 62ff; MAURMAIER ET AL. 2010, S. 14; EIGNER ET AL. 2012a; ROTHHÖFT 2012). Im Kontext einer disziplinübergreifenden Entwicklung wurden Ansätze der Geometriesimulation auf steuerungstechnische Problemstellungen transferiert (DOMINKA 2007; WÜNSCH 2008). Erprobte Simulationsmethoden, wie beispielsweise die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) aus dem Anwendungsgebiet der Werkzeugmaschinen (BAUDISCH 2003), finden jedoch nur zögerlich innerhalb anderer Bereiche des Maschinen- und Anlagenbaus Einsatz (STETTER 2011).

Ursache hierfür ist zum einen die Historie des Ansatzes, zum anderen die Komplexität der Simulation, da die materialflusstechnische Kopplung verschiedener Maschinen zu einer Anlage zusätzliche Simulationsmodelle erfordert (SPITZWEG 2009, S. 2) und eine Systemintegration von verschiedenen Disziplinen voraussetzt (DOHMEN 2002, S. 3–4).

Auch im Zuge eines mechatronikorientierten Systementwurfs rechtfertigt die Aussagekraft von Simulationsstudien aufgrund des hohen, oftmals redundanten Aufwands bei der Erstellung und Pflege von mechatronischen Modellen noch nicht den Einsatz in der industriellen Praxis (DOHMEN 2002, S. 3–4; DÖBLER 2008, S. 23). Kleine und mittelständische Unternehmen, die den Bereich der Verarbeitungstechnik prägen, können oft keine Kapazitäten für eigene Simulationsspezialisten bereitstellen (BRACHT ET AL. 2011, S. 23). Die Rückspiegelung des Erkenntnisgewinns ist zudem erst in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium möglich, da die Synchronisation der notwendigen Daten in einem mechatronischen Modell mit aktuellen Verfahren eine hohe Integrationsdichte der beteiligten Disziplinen sowie ausdetaillierte Entwicklungsartefakte erfordert (JÄGER 2007, S. 2–4; SCHUBERT ET AL. 2008, S. 87; DANGELMAIER 2009; LANGERMANN 2009, S. 9). Dennoch „(..) zeigt sich, dass das verarbeitende Gewerbe die Vorteile aus dem Einsatz von Visualisierungs- und Simulationstechnologien höher bewertet (...)“ (DÖBLER 2008, S. 25) als andere Branchen und somit große Einsatzpotenziale vorhanden sind.

Zur Reduktion des Modellbildungsaufwandes und zur Steigerung der Aussagekraft der Simulationsergebnisse wurden Ansätze einer physikbasierten Simulation in die Virtuelle Inbetriebnahme integriert (SPITZWEG 2009; LACOUR 2012; WÜNSCH 2014; STRAHILOV 2015), die auf Physik-Engines aus der Computergrafik aufbauen. Bestehende Beschränkungen auf wenige Prozessgüter und einfache Geometrien wurden bereits aufgehoben (LACOUR 2012). Jedoch sind aktuelle Lösungen im Umfeld der Produktionstechnik weitgehend auf Starrköpersysteme limitiert und finden erst am Ende des Entwicklungsprozesses Einsatz (STRAHILOV 2015). Die Abbildung und Absicherung definierter Zustände von Verarbeitungsgütern sowie deren Veränderung durch spezifische Verarbeitungsfunktionen ist mit den bisherigen Ansätzen der physikbasierten Simulation nur eingeschränkt bzw. mit Ersatzmodellen möglich (LACOUR 2012). Dies stellt jedoch eine maßgebliche Herausforderung bei der Entwicklung von Verarbeitungssystemen dar (MAJSCHAK 1996, S. 21; BLEISCH ET AL. 2011, S. 3–4).

Im Umfeld des simulationsgestützten Entwurfs mechatronischer Verarbeitungssysteme ist die Beherrschung formlabiler Objektverhaltens eine weitere nur un-

zureichend betrachtete Herausforderung (NEUMANN 2009; VÖLLINGER 2011; LACOUR 2012, S. 136–137). Neben der Automobilindustrie (HERGENRÖTHER 2003, S. 13; NEUMANN 2009), der medizinischen Gerätetechnik (HÜTTNER 2011) oder der Montagetechnik (SCHNEIDER 1999) stellen sich die produkt- und prozessseitigen Problemstellungen bezüglich formlabiler Objekte auch bei verarbeitenden Maschinen und Anlagen, wie der CFK-Verarbeitung (EHINGER 2013) oder der Verpackungstechnik (Grundke 2000; SCHRÖN & FUX 2000; ANDEL ET AL. 2010, S. 79; BLEISCH ET AL. 2011). Die diesbezügliche Komplexität bei der Definition technischer Lösungen „(...) resultiert dabei aus der Notwendigkeit, dass für die Handhabungsvorgänge zum Vereinzeln, Ordnen, Weitergeben, Positionieren und Fügen mechanisiert Kräfte auf die Bauteile aufgebracht werden müssen“ (SCHNEIDER 1999, S. 3), diese durch den Krafteinfluss jedoch eine Verformung in eine oder mehrere Dimensionen erfahren (GÖTZ 1991, S. 27ff). Ansätze zur Simulation formlabiler Objekte (ECKSTEIN 1999, S. 192; WIENSS 2008; NEUMANN 2009; VÖLLINGER 2011) fokussieren maßgeblich die Produktentwicklung und sind auf Absicherung von Produktions- und Verarbeitungssystemen aufgrund der hohen Berechnungszeiten nur eingeschränkt transferierbar.

Zusammenfassend sehen sich Entwickler im Zuge des Entwurfs mechatronischer Verarbeitungssysteme mit folgenden Herausforderungen konfrontiert:

- Ergebnisse des Systementwurfs lassen sich vor der disziplinspezifischen Detaillierung nur mit zusätzlichem Aufwand und einer Synchronisation unterschiedlicher Entwicklungsartefakte absichern.
- Digitale Entwicklungsumgebungen zum mechatronischen Systementwurf bieten wenig intuitive Interaktion zwischen disziplinspezifischen Experten sowie zwischen Entwicklungsumgebung und Anwender.
- Der Einsatz einer disziplinübergreifenden Simulation ist aufgrund der benötigten Datenqualität, der hohen Aufwände zur Modellbildung und Simulation erst spät im Entwicklungsprozess möglich.
- Bestehende Simulationsverfahren für produktionstechnische Systeme sind in der Aussagekraft bezüglich der Abbildung physikalischer Eigenschaften und Verhaltensweisen beschränkt. Speziell können Verarbeitungsfunktionen und -güter sowie formlabiles Objektverhalten nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand abgebildet werden.

Die vorliegende Arbeit zielt daher darauf ab, bestehende Lücken zwischen disziplinspezifischen Ansätzen eines systematischen Systementwurfs zu schließen und die physikbasierte Simulation auf das Anwendungsfeld der Verarbeitungstechnik auszuweiten.

Die übergreifende Zielstellung stellt eine Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme dar. Der Fokus liegt vor allem auf den frühen Phasen der Entwicklung, bei denen die systemtechnische Kopplung einzelner Systemelemente sowie die Auslegung des Anlagenverhaltens eine große Herausforderung darstellen. Aus der übergeordneten Zielsetzung lassen sich vier Leitziele ableiten, die in Abbildung 1.2 dargestellt sind.

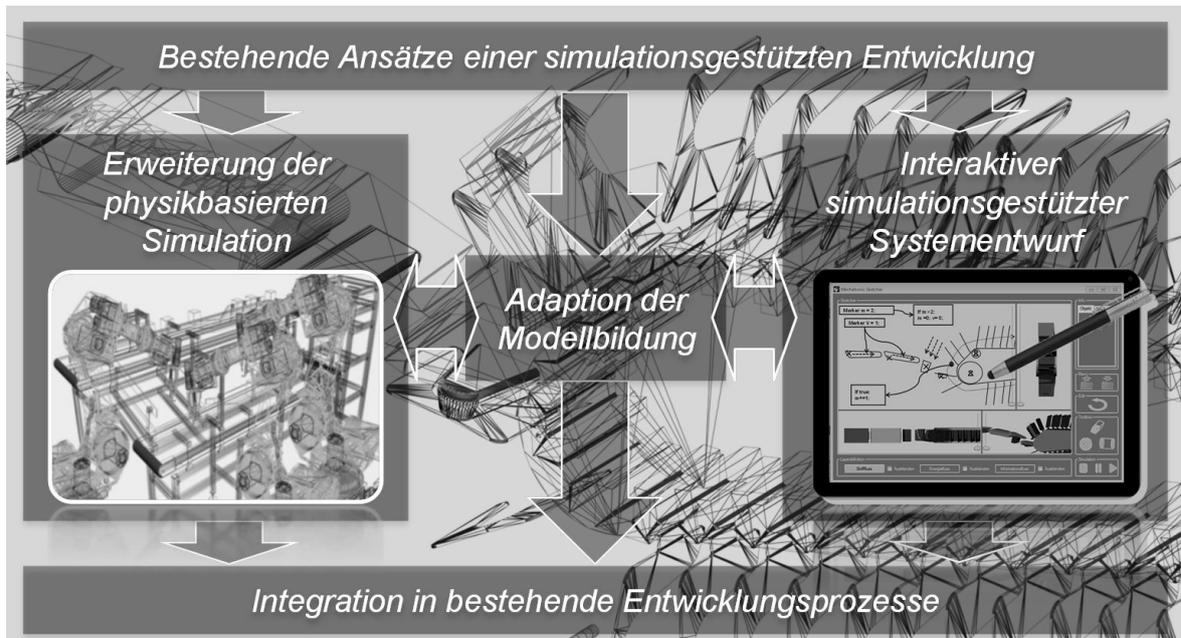


Abbildung 1.2: Leitziele der vorliegenden Arbeit.

Die Leitziele werden in einer Skizzier- und Simulationsumgebung synthetisiert, die unter Verwendung innovativer Eingabemethoden Möglichkeiten zum interaktiven Entwurf mechatronischer Systeme bietet. Zur Analyse des Systemverhaltens kommt eine physikbasierte Simulation zum Einsatz, die es ermöglicht, online im Entwurfsprozess Simulationsstudien auf Basis skizzierter Elemente durchzuführen und dem Anwender das dynamische Systemverhalten unter Berücksichtigung disziplinspezifischer Bestandteile direkt widerzuspiegeln. Neue Verfahren zur Abbildung von Verarbeitungsgütern und -funktionen sowie von formlabilen Objekten stellen sicher, dass die Entwurfsmethodik Problemstellungen der Verarbeitungstechnik abdeckt. Die Erweiterung der physikbasierten Simulation erfordert neue Ansätze der Modellbildung, die eine Transformation der skizzierten Elemente in ein ausführbares Simulationsmodell ermöglichen. Zur Integration der Entwurfsmethodik in bestehende Entwicklungsprozesse wird zudem ein Prozessmodell erstellt, das neben dem Ablauf der einzelnen Entwurfsschritte auch die Schnittstellen zu bestehenden Vorgehensmodellen definiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die notwendigen Schritte zur Erreichung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Leitziele werden innerhalb dieser Arbeit dargestellt, die in acht Kapitel untergliedert ist.

Im Folgenden wird zunächst das Umfeld der Arbeit betrachtet. Nach der Definition wesentlicher Begrifflichkeiten sowie der Darstellung von Grundlagen in **Kapitel 2** liegt der Fokus auf dem Stand der Erkenntnisse im Bereich der simulationsgestützten, mechatronischen Entwicklung, der in **Kapitel 3** beschrieben wird. Basierend auf der Darstellung von Ansätzen zum systematischen Systementwurf, der mechatronikorientierten Simulation, der physikbasierten Simulation sowie der Simulation formlabiler Objekte werden offene Problemstellungen identifiziert.

Die Detaillierung der Methodik folgt der in **Kapitel 4** beschriebenen Analyse, in der die Herausforderungen bestehender Entwurfsprozesse und der Stand der Erkenntnisse in methodischen und technischen Handlungsfeldern synthetisiert werden. In **Kapitel 5** werden darauf aufbauend die Bestandteile der Methodik zum interaktiven Systementwurf sowie die zugrundeliegenden physikbasierten Simulationsmodelle und Modellbildungsprozesse dargestellt. Abschließend werden methodische und technische Rahmenbedingungen für eine Integration der Entwurfsmethodik in bestehende Entwicklungsprozesse spezifiziert.

In den **Kapiteln 6** und **7** wird die Umsetzung der erarbeiteten Methodik sowie deren Evaluation und Bewertung anhand industrieller Anwendungsszenarien beschrieben. Zum einen werden die neuen Ansätze, aufbauend auf der Darstellung der Softwarestruktur und der softwaretechnischen Realisierung der Entwurfs- und Simulationsumgebung, beispielhaft innerhalb eines Entwicklungsprojektes im Bereich der Verpackungstechnik eingesetzt. Zum anderen wird die exemplarische Anwendung in weiteren Industriebereichen ausschnitthaft betrachtet, um die Transferierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen und die erstellten Methoden im produktionstechnischen Umfeld eingehend bewerten zu können.

Eine Schlussbetrachtung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weitere Handlungsfelder innerhalb eines simulationsgestützten, mechatronischen Entwicklungsprozesses in **Kapitel 8** runden die Arbeit ab.

2 Begriffsbestimmung und Grundlagen

2.1 Kapitelüberblick und Definition wesentlicher Begriffe

Im Kontext der fokussierten Themenstellung wird innerhalb dieses Kapitels zunächst eine Definition elementarer Begriffe gegeben. Darüber hinaus werden im Anschluss Grundlagen und weitere Begriffsdefinitionen in den Bereichen der Produktionstechnik (Abschnitt 2.2), der Modellbildung und Simulation (Abschnitt 2.3), der Computergrafik und Informationstechnik (Abschnitt 2.4) sowie des formlabilen Objektverhaltens (Abschnitt 2.5) dargestellt, die für die Einbettung der erarbeiteten Ergebnisse in das Umfeld der vorliegenden Arbeit notwendig sind.

Mechatronisches System

Ein mechatronisches System stellt eine abgegrenzte Anordnung von Elementen dar, die miteinander in Wechselwirkung stehen (VDI 3633-Blatt 1, S. 4; DIN EN 60050-351, S. 21; CZICHOS 2008, S. 9). Hierbei wird die Realisierung der Systemfunktion anteilig durch Bestandteile der Domänen Mechanik, Elektrik und Informationstechnik erbracht, die das Eingangsabbild auf das Ausgangsabbild eines Systems transformieren (VDI 2206, S. 9–16).

Verarbeitungssysteme

Verarbeitungssysteme dienen der Herstellung von Zwischenprodukten oder verkaufsfähigen Endprodukten der Konsumgüterindustrie. Beispiele sind Maschinen zur Verarbeitung von Papier, Kunststoff oder Textilien sowie auch Verpackungsmaschinen. Sie realisieren dabei stoffformende, formändernde und formabhängige Prozesse sowie zugehörige Ort- und Lageveränderungen. (TRÄNKNER 1968, S. 16; BLEISCH ET AL. 2011, S. 136–145; MAJSCHAK 2014b; BERGER ET AL. 2015)

Systementwurf

Der Systementwurf bildet in den frühen Phasen der Entwicklung die gegebenen Kundenanforderungen in konkreten Lösungsalternativen ab und endet mit einem abgesicherten Konzept eines mechatronischen Systems (VDI 2206, S. 29f). In der industriellen Entwicklung werden die Prozessschritte der frühen Phase auch unter dem Begriff Projektierung zusammengefasst (EHRENSPIEL ET AL. 2014, S. 11).

Modell

Ein Modell ist nach VDI-Richtlinie 3633-Blatt 1 (S. 3) eine „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“

Simulation

Eine Simulation ist das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind (...)“ (VDI 3633-Blatt 1, S. 3).

Mechatronische Simulation

Eine Simulation synthetisierter Partialmodelle aus den Disziplinen Mechanik, Elektrik und Informationstechnik, die vor dem Hintergrund erfolgt, zu jeder Phase des Entwicklungsprozesses eine Aussage über das gesamte Systemverhalten treffen zu können, wird im Kontext dieser Arbeit als mechatronische Simulation bezeichnet (REINHART & STICH 2011).

Physikbasierte Simulation

Innerhalb einer physikbasierten Simulation wird ein Modell, das neben der geometrischen Repräsentation eine Charakterisierung der objektspezifischen physikalischen Parameter enthält, mit Hilfe einer Physik-Engine ausgewertet, um Rückschlüsse auf das reale Anlagenverhalten ziehen zu können. Dabei steht in der Produktionstechnik vornehmlich das kinematisch dynamische Verhalten im Vordergrund. (SPITZWEG 2009; LACOUR 2012)

Physik-Engine

Eine Physik-Engine stellt in abstrahierter Form eine Programmbibliothek³ dar, die echtzeitfähige Algorithmen zur Berechnung des physikalischen Verhaltens bereitstellt (EBERLY 2010; MILLINGTON 2010). Im Bereich der Simulation kinematischer Systeme ist dabei vor allem die Kollisionserkennung und -reaktion relevant.

Interaktivität

Interaktivität bezeichnet eine wechselseitige Bezugnahme, bei der implizit Informationen ausgetauscht werden (JENSEN 1998). Dabei müssen nach BORDEWIJK & VAN KAAM (1986) Kommunikationsmuster zur Übertragung, Übersetzung, Erkennung und Bewertung von Informationen gegeben sein, die im Falle einer echtzeitfähigen Interaktion den Prinzipien der Gleichzeitigkeit, Rechtzeitigkeit und Verfügbarkeit genügen müssen (WÖRN & BRINKSCHULTE 2005, S. 317–324).

Formlabile Objekte

Das Verhalten eines formlabilen Objektes zeichnet sich dadurch aus, dass eine geringe Krafteinwirkung eine, in Relation zu den geometrischen Abmaßen, große Verformung hervorrufen kann (GÖTZ 1991; SCHNEIDER 1999).

³ Alternative Bezeichnung: Solver – Programmbibliothek mit Algorithmen zur Lösung eines numerischen Problems.

2.2 Grundlagen produktionstechnischer Systeme

2.2.1 Prozesse der Produkt- und Produktionsentstehung

Die Entstehung eines technischen Systems und somit die Überführung einer anfänglichen Idee zu einem einsetzbaren Produkt erstreckt sich über mehrere Prozessschritte, die je nach Betrachtungsbereich variieren können. Neben dem Lebenszyklus des Produktes, der nach GAUSEMEIER & BERGER (2004), KRAUSE ET AL. (2007, S. 90) und ANDERL ET AL. (2012) Aspekte von der Produktplanung bis zum Recycling beinhaltet, definieren unter anderem WIENDAHL ET AL. (2002, S. 651), VOLKWEIN (2007, S. 12–13), DOMINKA (2007), EHRENSPIEL (2009), GRUNDIG (2009) und WIESINGER (2010) ebenfalls Phasen im Lebenszyklus von Produktionsanlagen (vgl. auch VDI 5200-Blatt 1; VDI 2884). Diese umfassen alle notwendigen Schritte zu deren Planung, Realisierung, Betrieb und Redistribution, die anteilig durch den Hersteller und den Kunden durchlaufen werden (WIENDAHL ET AL. 2002). Im Umfeld der Produktionstechnik ist vor allem die Wechselwirkung der Produkt- und Produktionsentstehung von Bedeutung (WESTKÄMPER 2006). Die anschließende Produktion ist, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, durch eine Abhängigkeit von der Auftragsabwicklung geprägt und erfolgt nach dem Abschluss der Inbetriebnahme und der Anlaufphase durch den Betreiber der Anlage (WIENDAHL ET AL. 2002, S. 651).

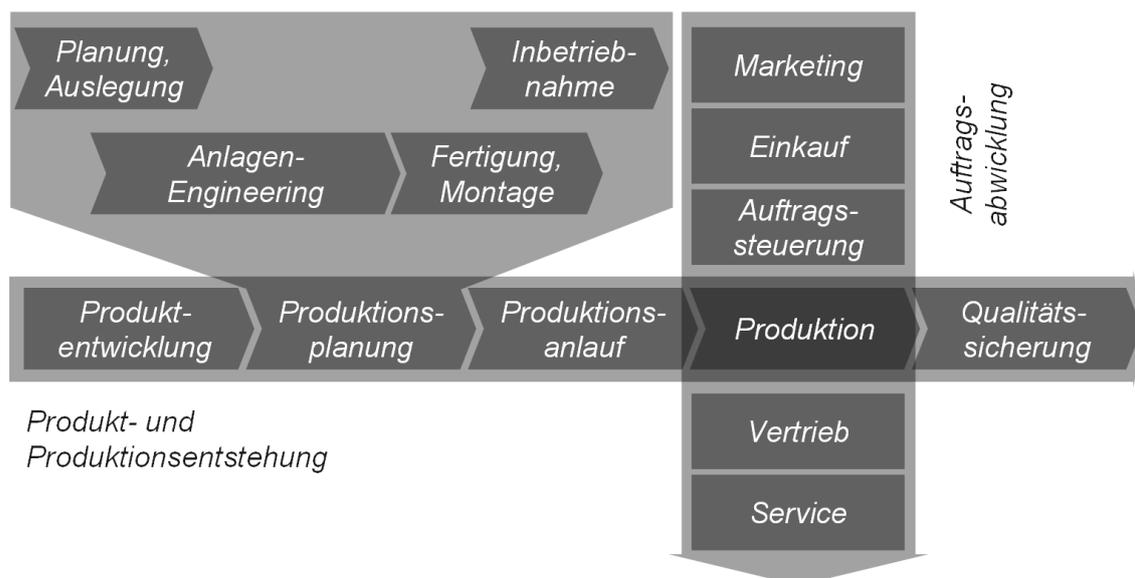


Abbildung 2.1: Entstehungsprozess von Produkten und Produktionsanlagen (in Anlehnung an KUHN ET AL. 2005, S. 4; KÜHN 2006, S. 10; DOMINKA 2007; VDI 4499-Blatt 1, S. 3).

ROPOHL (2009, S. 273) definiert die Entstehung eines technischen Systems und unterscheidet ausgehend von der initialen Aufgabe bis zu einem ersten Prototyp fünf Zwischenstufen: Modell der Funktion, Modell der Struktur, Realisierungsprinzip, Konstruktionsentwurf und Gestaltungsplan. Somit stehen die funktionale und strukturelle Spezifikation des Systems im Fokus der frühen Phase. Diese Prozessschritte bis zum Erreichen eines Realisierungsprinzips fassen VDI 2206 (VDI 2206, S. 32–35), DOHMEN (2002, S. 5), BENDER (2005), ULRICH & EPPINGER (2008), GAUSEMEIER ET AL. (2011, S. 10–12), FRIEDRICH (2011, S. 1), PONN (2011, S. 147), ANDERL ET AL. (2012, S. 11) und FELDHUSEN & GROTE (2013, S. 19–20) unter dem Begriff des Entwurfs zusammen. Der Entwurf im Allgemeinen umfasst nach DAENZER & HABERFELLNER (2002, S. 158) „(...) die Erahnung eines Ganzen, eines Lösungskonzepts, das Erkennen bzw. Finden der dazu erforderlichen Lösungselemente und das gedankliche, modellhafte Zusammenfügen und Verbinden dieser Elemente zu einem tauglichen Ganzen (...)“. Im Entstehungsprozess mechatronischer Systeme werden dabei, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, auf Basis der Kundenanforderungen mehrere Alternativen erstellt und in Form von Prinziplösungen beschrieben (VDI 2206, S. 32). Dabei kann zwischen einem Grobentwurf auf Ebene des Gesamtsystems und einem disziplinspezifischen Feinentwurf unterschieden werden (VDI 2221; VDI 2222-Blatt 1; VDI 2222-Blatt 2).

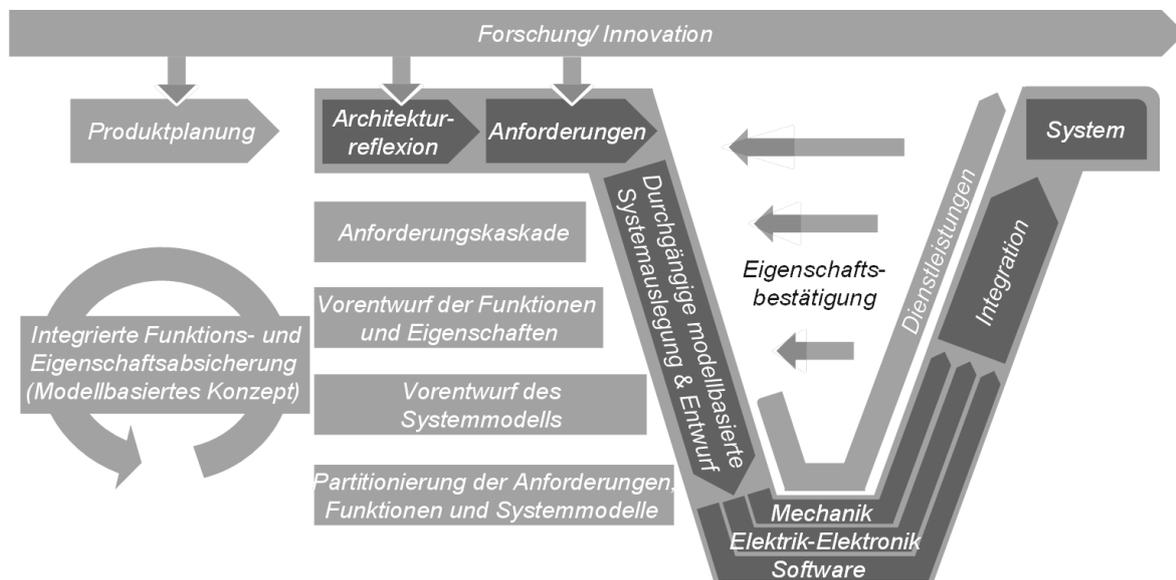


Abbildung 2.2: Einordnung der Aufgaben und Tätigkeiten des Systementwurfs in den Entwicklungsprozess (in Anlehnung an ANDERL ET AL. 2012, S. 11; vgl. auch VDI 2206, S. 32).

Zur Beherrschung der Entstehungsprozesse sind unterschiedliche Vorgehensmodelle entstanden, die sich bezüglich ihrer Granularität je nach betrachteter Phase

und Disziplin differenzieren (BRAUN 2005, S. 29; GRANDE 2011, S. 110ff). LINDEMANN (2009, S. 35–39) definiert den Begriff Vorgehensmodell als die Beschreibung grundsätzlicher Vorgehensmuster für bestimmte Situationen oder spezifische Zielsetzungen und unterscheidet zwischen Modellen mit mikro- und makroskopischer Sicht. Zudem sind beliebige Zwischenstufen möglich, die von elementaren Handlungsabläufen⁴ bis zum übergreifenden und disziplinunabhängigen Prinzipvorgehen⁵ unterschiedliche Aspekte adressieren. Vorgehensmodelle stellen somit den Rahmen dar, wie ein Entwicklungsprojekt durchgeführt werden kann und geben dafür Richtlinien, Methoden und Werkzeuge vor (FRITZSCHE & KEIL 2007, S. 4; GRANDE 2011, S. 109).

Oftmals fokussieren Vorgehensmodelle eine Vorverlagerung von Entwicklungsaktivitäten sowie eine disziplinübergreifende Synchronisation. Eine frühzeitige Allokation von Entwicklungsressourcen, kombiniert mit digitalen Methoden, soll Aussagen über die Funktion, das Betriebsverhalten, sowie die weiteren Eigenschaften eines Systems ermöglichen und Folgefehler in späteren Phasen vermeiden. Dieses Grundprinzip ist auch Bestandteil des Simultaneous Engineering, das „(...) eine zielgerichtete, interdisziplinäre (abteilungsübergreifende) Zusammen- und Parallelarbeit in der gesamten Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung für den vollständigen Produktlebenslauf mit einem straffen Projektmanagement („...“ umfasst (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 31–32). Hierbei werden die einzelnen Arbeitsschritte zeitlich überlappend durchgeführt und durch die Verzahnung von Produkt- und Produktionsentwicklung eine verbesserte Qualität forciert. Dadurch können frühzeitig konstruktionsbedingte Produktionsprobleme und produktionsinduzierte Restriktionen aufgedeckt und behoben werden (KROTTMAIER 1995; BULLINGER ET AL. 1997; DIXIUS 1998; SYSKA 2006).

Im Vergleich dazu stellt das Systems Engineering primär die zentrale Ausrichtung auf die vom Kunden gewünschten Funktionalitäten in den Vordergrund. Im Mittelpunkt steht das System, das durch übergreifende Denkmodelle und Grundprinzipien zweckmäßig und zielgerichtet gestaltet wird. Dadurch wird die klassische Trennung der Disziplinen, auch in der Design-Synthese und Systemüberprüfung, aufgehoben. (EISENRING ET AL. 2012; GAUSEMEIER ET AL. 2013; GAUSEMEIER ET AL.; MÖHRINGER 2012; HABERFELLNER 2015)

⁴ Z. B. der PTCA-Zyklus (Planen-Tun-Checken-Aktion) nach IMAI (1993, S. 86–92).

⁵ Z. B. das Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN (2009).

2.2.2 Produktions- und Verarbeitungssysteme

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Vorgehensmodelle dienen einer effizienten Entwicklung technischer Systeme. Deren Kern ist nach FELDHUSEN ET AL. (2014, S. F1) ein Prozess, „(...) in dem Energien, Stoffe und Signale geleitet werden und/oder verändert werden“. Bezogen auf die Produktion wird dieser Prozess nach EVERSHEIM (1992, S. 2058) in einem System realisiert, das „(...) eine technisch, organisatorische (und kostenrechnerisch) selbständige Allokation von Potential- und Mittelfaktoren zu Produktionszwecken (...)“ darstellt. Produktionssysteme stellen Betriebsmittel, Mess-, Lager- und Transporteinrichtungen sowie Werkstätten, Energie und Informationen bereit, um den System-Input, wie Rohmaterialien, Halbzeuge, Bauteile oder Hilfsstoffe, in die gewünschten Produkte bzw. Fertigteile zu transformieren (MILBERG 1992, S. 1; WESTKÄMPER 2006, S. 195f; DOMINKA 2007, S. 8).

Die Produktionsaufgabe wird durch unterschiedliche Fertigungsanlagen realisiert, die KAIN (2011, S. 9) in Anlehnung an (DIN V 19233, S. 3) als eine Gesamtheit der technischen Einrichtungen spezifiziert, die definiert auf einen technischen Prozess einwirken. Ein Produktionssystem umfasst mehrere Fertigungsanlagen und somit Apparate, Maschinen, Werkzeuge, Geräte, Transporteinrichtungen, sowie andere Betriebsmittel (DIN V 19233, S. 3; DIN IEC 60050-351, S. 33; WIENDAHL ET AL. 2009, S. 177). ROPOHL (2009, S. 122) beschreibt eine Hierarchie der Sachsysteme, die sich von einem Anlagenverbund über Anlagen, Aggregate, Maschinen, Geräte und Baugruppen bis zu Einzelteilen und Werkstoffen erstreckt (vgl. auch NEUHAUSEN 2001, S. 17; SCHULTMANN 2003, S. 176).

Als ein Teilgebiet der Produktionstechnik bilden Verarbeitungssysteme „(...) das letzte Glied der Kette stoffumformender Maschinen“ (TRÄNKNER 1968, S. 16). Die Güter werden in mehreren Arbeitsgängen sukzessiv bis zum Fertigprodukt verarbeitet und nach der Verpackung an die Logistikkette übergeben (MAJSCHAK 2014a, S. F 39). In Anlehnung an den Systembegriff nach CZICHOS (2008, S. 9), ROPOHL (2012, S. 56–57), DIN EN 60050-351 (S. 21) und VDI 3633-Blatt 1 (S. 4) sowie beziehungsweise auf BLEISCH ET AL. (2011, S. 136–145), MAJSCHAK (2014a, S. F 49), RÖMISCH & WEIß (2014, S. 7–13) und DIN 55405 (S. 7) sind Verarbeitungssysteme durch eine Verschaltung elementarer Verarbeitungsfunktionen gekennzeichnet. Sie können bezüglich ihrer Ausprägung je nach Umfang der Kundenanforderung variieren und sowohl kleinere Baugruppen als auch Maschinen oder gesamte Anlagenverbunde umfassen. TSCHUSCHNER (2004, S. 608), BLEISCH ET AL. (2011, S. 251) und MAJSCHAK (2014a, S. F 40) definieren

für ein Verarbeitungssystem Teilbereiche, die sich nach vier korrelierenden Klassen gliedern lassen: Stoff, Energie, Signal und Raum. Im Bereich der Verarbeitungstechnik stellt die Funktion zur Stoffverarbeitung die Hauptaufgabe (Hauptumsatz) dar, während die übrigen Teilbereiche die notwendigen Voraussetzungen (Nebenumsatz) für deren Realisierung schaffen (MAJSCHAK 2014a, S. F 39). Zur Systematisierung der Verarbeitungsfunktionen wurden von TRÄNKNER (1968, S. 34–35) und BLEISCH ET AL. (2011, S. 163–171) sowie von MAJSCHAK (2014a, S. F 40 - F 41) die verschiedenen Verarbeitungsgüter anhand entscheidender Verarbeitungseigenschaften, wie Form oder Fließverhalten, zu Gutgruppen zusammengefasst. TSCHEUSCHNER (2004, S. 609) definiert dazu sieben Vorgangsoperationen, die den Übergang zwischen den einzelnen Gutgruppen im Laufe des Verarbeitungsprozesses beschreiben. Diese sind: Trennen, Fügen, Formen, Speichern, Dosieren, Fördern und Ordnen (vgl. auch TRÄNKNER 1968, S. 34–35). Der Zustandsübergang kann durch eine Wirkpaarung beschrieben werden, wie sie Abbildung 2.3 zeigt.

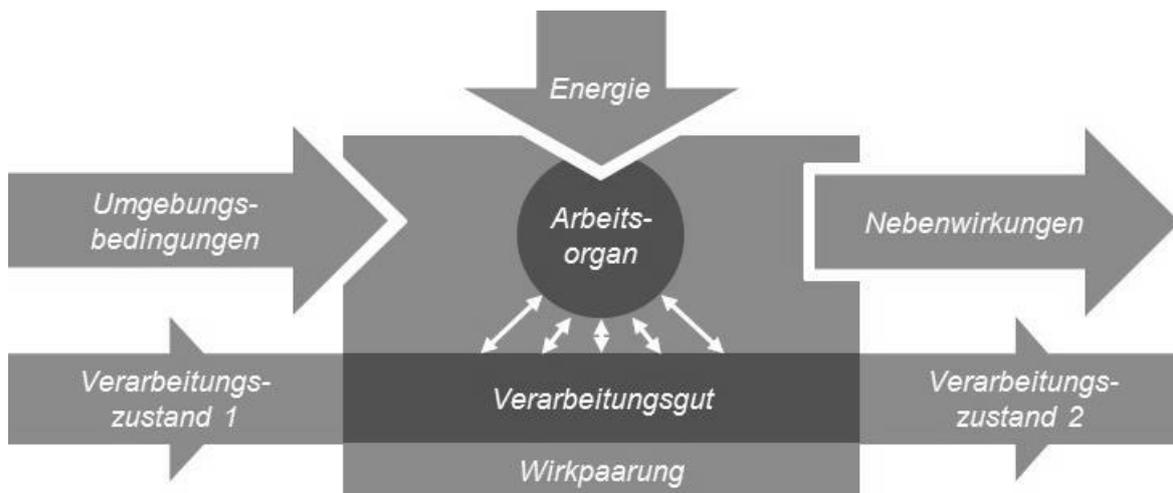


Abbildung 2.3: *Schema eines Verarbeitungsvorgangs (in Anlehnung an MAJSCHAK 2014a, S. F 41; vgl. auch TRÄNKNER 1968, S. 17–21; GOLDHAHN 2006, S. 3; BLEISCH ET AL. 2011, S. 190).*

Die Verarbeitungsfunktion einer Wirkpaarung wird über ein Arbeitsorgan umgesetzt, das Elemente der unterschiedlichen Funktionsbereiche umfasst und somit ein mechatronisches System darstellt (TRÄNKNER 1968, S. 29). Das Steuersignal wirkt über die Antriebseinheiten und die stoffverarbeitenden, meist mechanischen Elemente unter Einbezug weiterer Energie auf den Prozess und somit das Verarbeitungsgut ein (MAJSCHAK 2014a, S. F 41). Dabei steht das Verarbeitungsgut über Reaktionskräfte, wie Verschleiß, an der sogenannten Wirkstelle mit dem Verarbeitungssystem in einer bidirektionalen Wechselwirkung (BLEISCH ET AL. 2011, S. 190–191). Die Realisierung der Verarbeitungsfunktionen erfolgt in an-

wendungsspezifischen Modulen, die geforderte Funktionalitäten in konkreten Wirkprinzipien umsetzen und über Transportprozesse verknüpft sind.

2.2.3 Transportprozesse in Produktionssystemen

Die Verschaltung einzelner Geräte, Werkzeuge und Maschinen zu Anlagen bzw. Anlagenverbänden sowie deren Einbindung in die inner- und überbetriebliche Logistik erfolgt über verschiedenartige Transportprozesse, die sich von der Logistik bis zu den physikalischen Wirkmechanismen erstrecken (DIN 30781-2; KADACHI 2004; PAWELLEK 2007; WANNENWETSCH & COMPERL 2007; WIENDAHL ET AL. 2009; WILDEMANN 2010; HESSE 2013; GÜNTNER 2014). Sie dienen der örtlichen Veränderung von Objekten innerhalb der gesetzten Systemgrenzen und weisen unterschiedliche Ausprägungen hinsichtlich der Stoff- und Datenübertragung auf, die bezüglich zeitlicher und quantitativer Aspekte variieren (DIN 30781-1; VDI 2411; VDI 2860; TSCHUSCHNER 2004, S. 641–649; GÜNTNER ET AL. 2006, S. 11–23; BLEISCH ET AL. 2011, S. 222–235).

Bei Verarbeitungssystemen ist oft ein hoher anlageninterner Materialfluss zum Transport der Verarbeitungsgüter zwischen den einzelnen Wirkpaarungen gegeben, der im Zuge des Systementwurfs zu berücksichtigen ist. LACOUR (2012, S. 16) definiert, unter anderem bezugnehmend auf DIN 30781, S. 2), DIN EN 14943, S. 73) und FISCHER & DITTRICH (1997, S. 3), den Begriff der materialflussintensiven Produktionsanlagen: „Durch eine Vielzahl von Transporteinrichtungen wird die Verteilung zahlreicher, stofflicher Güter innerhalb bestimmter, festgelegter Produktionsbereiche gewährleistet und kann durch Stau, Speicherung, Pufferung sowie Lagerung unterbrochen werden“. Weiterführend ist der Materialfluss nach DANKSAGMÜLLER & FRANK (2004, S. 129) „(...) die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten, sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Dazu gehören im Einzelnen: Bearbeiten, Handhaben, Transportieren, Prüfen, die Aufenthalte und die Lagerung“. Die Transportprozesse zwischen diesen Bereichen lassen sich zudem nach Hauptfluss bzw. Nebenfluss sowie Zusatzaggregaten (z. B. Paletten oder Werkstückträger), Puffern und Speichern gliedern (VDI 2860; VOIGT 2004, S. 5–7; WILKE 2006).

Die anlageninternen Transportprozesse sind bei Produktionssystemen entscheidend, um eine effiziente Fertigungsautomatisierung durch die Verkopplung einzelner Funktionen zu realisieren (KAIN 2011). Der Materialfluss wie auch die dadurch verknüpften Wirkpaarungen eines Verarbeitungssystems werden durch Elemente der System- und Automatisierungstechnik umgesetzt.

2.2.4 Elemente der System- und Automatisierungstechnik

Der Begriff Systemtechnik bezeichnet im Allgemeinen den technischen Rahmen bzw. die technische Handhabung eines Systems (DUDEN 2013). Die einzelnen Elemente, die sich in unterschiedliche Funktionsbereiche aufgliedern lassen, sind innerhalb der Systemgrenzen in einer Aufbau- und Ablaufstruktur angeordnet und bilden anhand einer Ablauflogik die Eingangsgrößen über Zustandsübergänge auf konkrete Ausgangsgrößen ab (CZICHOS 2008, S. 9; VDI 3633-Blatt 1, S. 4). Die Struktur von technischen Systemen besteht dabei aus der Summe der Elemente sowie deren Beziehungen untereinander (MILLER & ELGÅRD 1998, S. 2).

Nach WIENDAHL ET AL. (2009, S. 181) ist der Automatisierungsgrad ein Klassifizierungsmerkmal von Maschinen und Anlagen. Rahmenbedingungen für die Gestaltung von Automatisierungssystemen finden sich beispielsweise in (VDI/VDE 3681, S. 8–10), VDI/VDE 3694, LAUBER & GÖHNER (1999), PRITSCHOW (2006), SCHREIBER & JERENZ (2011, S. 7–10), KNIES & SCHIERACK (2012), LITZ (2013) oder HEINRICH ET AL. (2015). Neben der Automatisierungstechnik an sich, sind auch die Integration der unterschiedlichen Systembestandteile und die Definition von übergreifenden Datenschnittstellen für automatisierte Fertigungssysteme von Bedeutung (VDMA-EINHEITSBLATT 34180).

Wie in Abbildung 2.4 am Beispiel der Verarbeitungstechnik zu sehen ist, wird in einem mechatronischen System kontinuierlich über verschiedenartige Sensoren der aktuelle Zustand des Prozesses erfasst und in einer Steuereinheit ausgewertet. Über Aktoren, wie elektrische Antriebe, die in das Stütz- und Hüllsystem integriert sind, wird auf den Prozess steuernd oder regelnd eingegriffen. Die diesbezügliche Logik ist im Steuerungssystem in standardisierten Programmiersprachen, z. B. nach DIN EN 61131, hinterlegt (vgl. auch ASPERN 2005; RÖHSE & STETTER 2012; VDMA 2014, S. 39). Darüber hinaus müssen vor allem bei hoch automatisierten Anlagen zunehmend weitere Funktionsumfänge, wie beispielsweise Schnittstellen zum Benutzer oder anderen Systemen sowie die Aspekte Security und Safety berücksichtigt werden (BACHTHALER 2000; ATP 2011; HENSEL 2011, S. 5–8).

Die Trennung der Systeme in ihre disziplinspezifischen Komponenten wird sukzessive aufgegeben, da eine Funktion nur selten durch eine Disziplin realisiert werden kann. Für die Entwicklung funktionsintegrierter Systeme lassen sich daher

mechatronische Einheiten⁶ (ME) definieren, die aus funktionaler Sicht atomare Systemelemente und somit die kleinsten, nicht weiter teilbaren Einheiten darstellen, die eigenständig eine Funktion durch die Synthese der beteiligten Disziplinen erbringen. Das zugehörige Datenmodell einer ME stellt die Allokation aller zugehörigen Entwicklungsartefakte dar. (WILKE 2006, S. 34; KIEFER 2007, S. 85; JANSEN 2007, S. 81; VDI 4499-Blatt 2, S. 31–32; GAUSEMEIER ET AL. 2011, S. 18–20; KRUG 2013, S. 95–97)

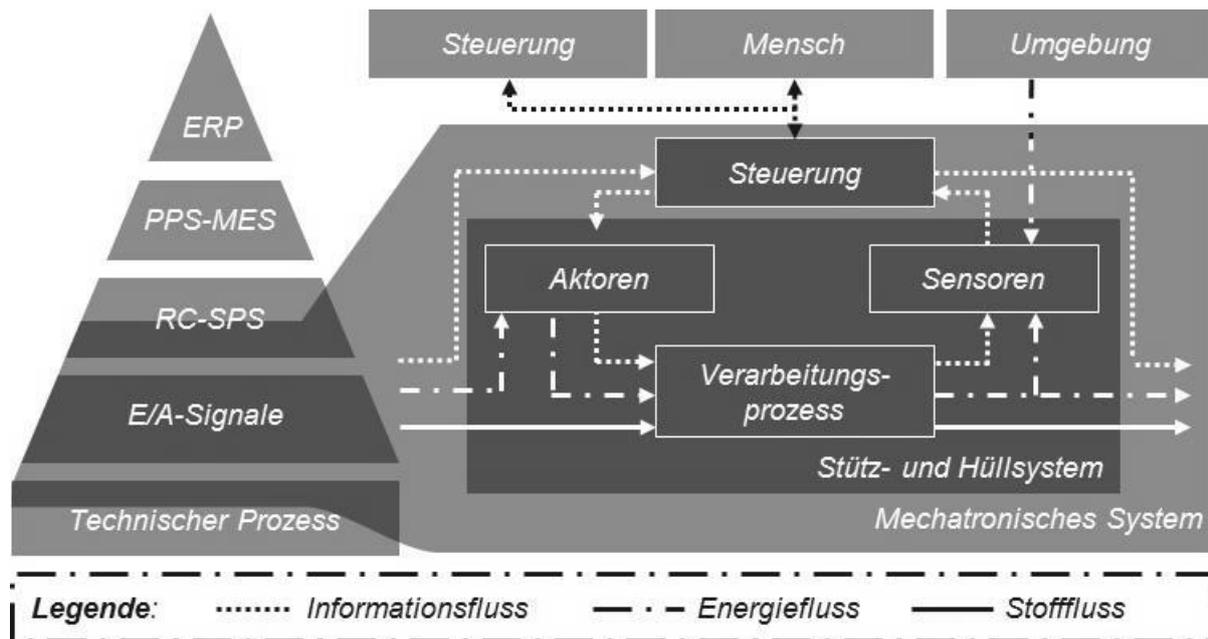


Abbildung 2.4: Bestandteile eines mechatronischen Verarbeitungssystems und Einordnung in die Automatisierungspyramide⁷ (eigene Darstellung der in VDI 2206, S. 14; TSCHEUSCHNER 2004, S. 608; BATHELT 2007, S. 8; BLEISCH ET AL. 2011, S. 190; GROTE & FELDHUSEN 2014, S. F1; MAJSCHAK 2014a, S. F 40 wiedergegebenen Daten).

Mechatronische Einheiten enthalten neben entwicklungsspezifischen Informationen der Fachdisziplinen, wie etwa Bauteilzeichnungen, Schaltpläne oder Softwarefragmente (REINHART ET AL. 2009, S. 373), auch organisatorische und weitere systembeschreibende Daten. Nach WILKE (2006, S. 33–44) lassen sich diese in allgemeine Informationen, Funktions- und Aufgabenbeschreibungen, System-

⁶ Mechatronische Einheiten werden in der Literatur oftmals auch als mechatronische Ressourcenkomponenten (KIEFER 2007, S. 85), Lösungsmuster (GAUSEMEIER ET AL. 2011, S. 18–20), Funktionsbausteine (BONETSMÜLLER 2013), Entwicklungstemplates (STARK & KÖNIGS 2014) oder mechatronische Objekte (STETER 2015) bezeichnet.

⁷ Nach (DIN EN 62264 - Teil 3): ERP – Enterprise Resource Planning, PPS- Produktionsplanung und Steuerung, MES – Manufacturing Execution System, RC – Robot Control, SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung, E/A – Ein/Ausgangssignale auf Bus-/Feldebene.

zustände (z. B. Betriebsart) sowie Schnittstellen von mechanischen, energetischen und steuerungstechnischen Bestandteilen unterscheiden.

Durch die Orchestrierung dieser ME anhand der geforderten Funktionsstruktur kann ein technisches System zusammengesetzt und zugehörige Dokumente abgeleitet werden (ZÄH ET AL. 2004f; GRÄTZ 2006; EHRENSTRABER 2010; HAUSCHKE & RIEXINGER 2013, S. 6). Dies bietet ein großes Potenzial, den Entwurf produktionstechnischer Systeme zu systematisieren und zu verbessern (GÖPFERT 2000; SCHAICH 2001, S. 7; LERCHE ET AL. 2004; KIEFER 2007; WEGMANN 2010; MAAG & KRAUSE 2011). Durch den verstärkten Einsatz vordefinierter Module können über 30 Prozent der im Zuge der Entwicklung anfallenden Kosten eingespart werden (ROLAND BERGER 2012), da bei der Projektierung von kundenspezifischen Fertigungseinrichtungen zum Großteil auf im Vorfeld definierte Lösungsmuster zurückgegriffen wird (VDI 2206, S. 35–38; REINHART ET AL. 2009; MAAG & KRAUSE 2011). Dies eröffnet „(...) auf der Ebene der Konstruktionssystematik die Chance einer weitgehenden Modularisierung und Automatisierung“ (HAUSCHKE 2010, S. 2) und begünstigt als etablierte Maßnahme im Maschinen- und Anlagenbau die Reduktion der technologieinduzierten Komplexität (DÖBELE 2010) sowie den Wandel hin zur Gestaltung mechatronischer Funktionselemente (JULINEK 2011; BONETSMÜLLER 2013).

2.3 Grundlagen der Modellbildung und Simulation

2.3.1 Einsatzgebiete und spezifische Ausprägungen der Simulation

Das Einsatzgebiet der Simulation erstreckt sich über vielzählige Bereiche (REINHART & FELDMANN 1997; LAW & KELTON 2000, S. 1–3; WENZEL 2010). Dabei kommen unterschiedliche Modelle zum Einsatz, die KÜHN (2006, S. 29–30) in physikalische Versuchsmodelle, technische Computermodelle, naturwissenschaftliche Modelle sowie Modelle der Informatik und der Wirtschaftstheorie unterscheidet. Die Analyse des Systemverhaltens in einer Simulation „(...) impliziert eine Dynamik des Modells, welches dem Anwender Parametervariationen erlaubt, um unterschiedliche Zustände des Modells zu überprüfen bzw. zu testen“ (DIERBEN 2002, S. 60). Dies kann erfolgen, ohne dass das System in seiner realen Ausprägung vorliegt beziehungsweise ohne dass in den Betrieb existenter Systeme störend oder unterbrechend eingegriffen wird. Somit können Untersuchungen vorgenommen werden, die am realen System nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich

wären (KÜHN 2006, S. 5). Eine Simulation dient der Entscheidungsunterstützung, der Simplifizierung der Systemkomplexität, der Verbesserung des Systemverständnisses oder der Erfassung von Daten und stellt eine Alternative zu realen Experimenten dar (BRYCHTA 2004, S. 10; BRACHT ET AL. 2011, S. 51–77).

Innerhalb dieser Arbeit bezieht sich die Simulation auf die digitale Analyse des Verhaltens produktionstechnischer Systeme auf Anlagenebene. Diese werden mittels einer Simulationsumgebung untersucht, die nach VDI 3633-Blatt 1 als ein Softwareprogramm für die Erstellung und Ausführung eines Modells definiert ist. Ein Simulatorekern stellt die Modellwelt mit den Modellelementen bereit und steuert den Simulationsablauf sowie die Verwertung der gegebenen Modelldaten. Über eine Datenverwaltung erfolgen die Zuordnung der Modellelemente zu den verwendeten Datentypen und die Anbindung an externe Datenbestände. Der Benutzer interagiert über eine Oberfläche mit dem Simulatorekern und nimmt auf Modellaufbau und die Dateneingabe sowie auf die Laufzeitbetrachtung und Ergebnisdarstellung innerhalb der Simulationsstudie Einfluss. (VDI 3633-Blatt 1, S. 7–9)

2.3.2 Aufbau und Ablauf von Simulationsstudien

„Der Simulationsprozess bildet einen Kreislauf, der iterativ mehrfach durchlaufen werden kann“ (KÜHN 2006, S. 10; vgl. auch VDI 3633-Blatt 1, S. 19; KUDLICH 2000, S. 29; ACKER 2011, S. 39). Ausgehend von einer Analyse des Projektgegenstandes und des Umfeldes sowie einer Kostenbetrachtung erfolgt eine Grundsatzentscheidung, ob die Problemstellung mit bestehenden Simulationsmethoden und Werkzeugen gelöst werden kann (VDI 3633-Blatt 2, S. 2–5; KADACHI 2004). Anschließend werden die Ziele der Simulation detailliert und der Gesamtaufwand abgeschätzt (KÜHN 2006, S. 100; BOCKEL ET AL. 2010).

Simulationsmodelle sind immer nur so gut wie die Datenbasis, die ihnen zugrunde liegt. Daher stellt die Identifikation, die Aufbereitung und die Abstimmung der benötigten Daten einen entscheidenden Arbeitsschritt der Vorbereitung dar. Über eine analytische Grobabschätzung sowie überschlägige Berechnungen werden in diesem Schritt zudem Daten für eine der Simulation nachgelagerten Plausibilitätsprüfung ermittelt. Die Vorbereitung schließt mit der Umsetzung der Datenbasis in ein Modell. (VDI 3633-Blatt 1)

In der Phase der Durchführung wird das experimentierbare Modell initial innerhalb des definierten Betrachtungsbereiches ausgeführt und das resultierende Systemverhalten aufgezeichnet. Über einen Abgleich der Ergebnisse mit den erwarteten

Werten der Grobabschätzung kann das Modell validiert und nach einer gegebenenfalls notwendigen Anpassung für die weiteren Simulationsstudien im Betrachtungsbereich des Systems freigegeben werden. Anschließend wird die Studie geplant (VDI 3633-Blatt 3) und der Variationsbereich der charakteristischen Systemeigenschaften festgelegt. Diese können nach GAUSEMEIER (2005) in die Klassen Struktur, Verhalten und Parameter eingeteilt werden. Einflüsse der Umwelt, des Benutzers sowie des Systems an sich (z. B. Verschleiß) führen zu einer Variation der Eigenschaftswerte über den Zeitverlauf. Die Ergebnisse der Simulation werden je nach Simulationsart in Form einer statistischen Auswertung, eines Monitorings oder einer Animation aufbereitet (VDI 3633-Blatt 1, S. 16–17; vgl. auch VDI 3633-Blatt 11, S. 11) sowie von Simulations- und Prozessexperten analysiert und interpretiert. Iterativ wird die Simulation erneut mit geänderten Rahmenbedingungen durchlaufen, bis die erzielte Datenbasis eine ausreichende Entscheidungsunterstützung für die Ziele der Simulationsstudie darstellt.

2.3.3 Methoden der Systemanalyse und Modellbildung

Die Modellbildung als zentraler Schritt innerhalb einer Simulationsstudie ist ein Prozess der Abstraktion, bei der ein System in einer neuen Beschreibungsform abgebildet wird. Die der Modellbildung vorgelagerte Systemanalyse ist als die systematische Untersuchung eines realen oder gedachten Systems hinsichtlich aller Systemdaten, Systemelemente und deren Wirkungen aufeinander definiert (VDI 3633-Blatt 1, S. 22–25; VDI 3633-Blatt 2, S. 5; KÜHN 2006, S. 33). Dazu gehören die Identifikation der Grenzen des Systems sowie der Ein- und Ausgangsgrößen und eine Spezifikation aller Komponenten und deren Beziehung. Zur Reduktion der Komplexität werden klassische Methoden wie die Kapselung von Funktionalitäten, die Modularisierung, die Abstraktion, die Strukturierung oder die Hierarchisierung angewandt (KÜHN 2006, S. 39–45; ACKER 2011, S. 12–14). Zur Überführung in ein simulierbares Modell können die Ergebnisse der Systemanalyse in unterschiedlichen Modellen abgebildet werden. Diese unterscheiden sich in statische Modellklassen, z. B. zur Untersuchung einer Momentaufnahme eines Systems, und dynamische. Letztere lassen sich nach LIEBL (1995), SCHULTMANN (2003, S. 173–174), KADACHI (2004, S. 12–17), ACKER (2011, S. 38), BRACHT ET AL. (2011, S. 112–126) und VDI 3633-Blatt 1, S. 12), wie in Abbildung 2.5 dargestellt, weitergehend kategorisieren.

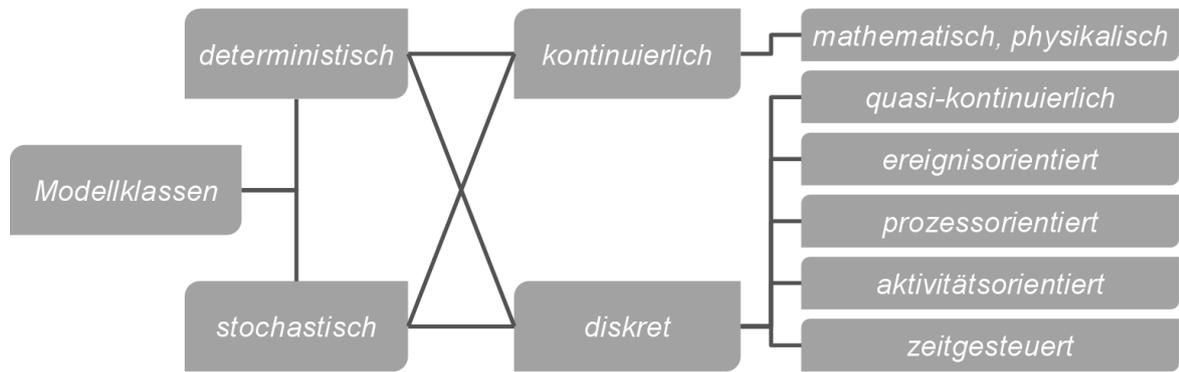


Abbildung 2.5: Klassifizierung von dynamischen Simulationsmodellen.

Je nach eingesetztem Modell unterscheiden sich die Arten der Modellbildung. Mathematische und physikalische Modelle erfordern die Abbildung des Systemverhaltens in Gleichungssystemen, durch deren analytische oder numerische Auswertung Zielgrößen in der Simulation berechnet werden. Aus der Topologie des Systems werden, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, die einzelnen Elemente sowie deren Beziehungen abgeleitet und deren physikalische Wirkzusammenhänge beschrieben (KÜHN 2006, S. 39–45; vgl. auch NOLLAU 2009). Diese bilden die Grundlage für ein mathematisches Gleichungssystem, das durch einen numerischen Algorithmus ausgewertet wird.

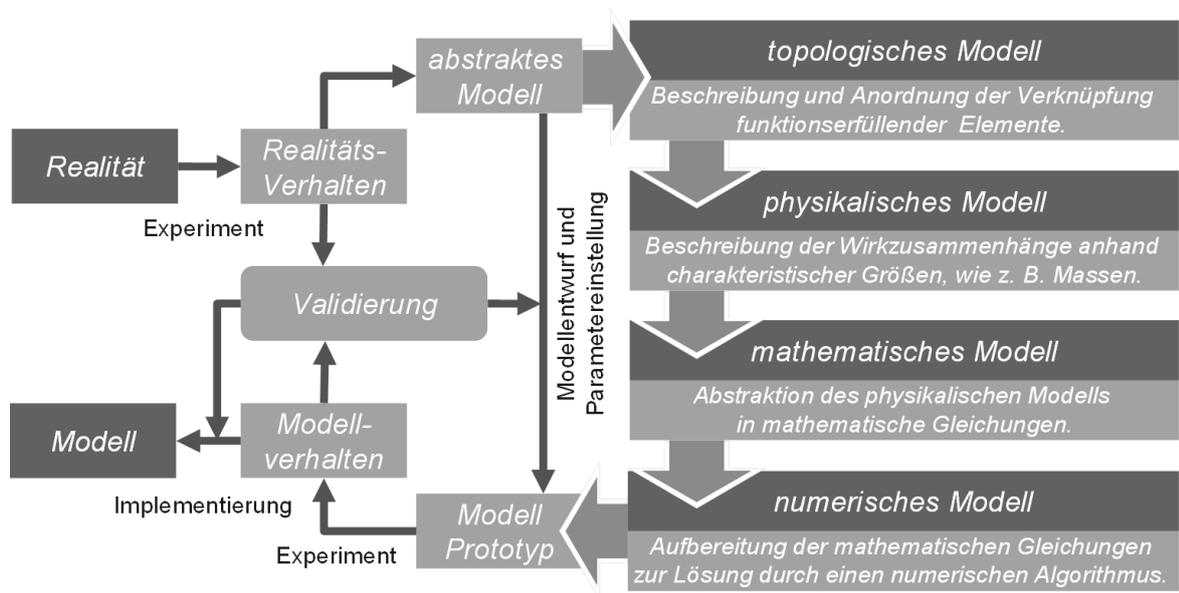


Abbildung 2.6: Exemplarische Modellstufen im Zuge eines iterativen Vorgehens bei der Modellbildung technischer Systeme (eigene Darstellung der in UTHMANN 1991, S. 3f; LAW & KELTON 2000, S. 3–6; KADACHI 2004, S. 12–13; KÜHN 2006, S. 27–51; VDI 2206, S. 51 wiedergegebenen Daten).

Im Vergleich dazu umfasst beispielsweise die Vorbereitung einer ereignisorientierten Simulation die Definition der möglichen Systemzustände sowie die zugehörigen Übergangsbedingungen. Allen Methoden der Modellbildung ist jedoch gemein, dass der generelle Aufbau in zwei Stufen erfolgt: Modellentwurf und Implementierung (VDI 3633-Blatt 1, S. 12–16). Innerhalb der ersten Stufe wird das Originalmodell durch ein abstraktes Modell, das noch nicht ablauffähig und experimentierfähig ist, symbolisch beschrieben. Dieses wird innerhalb der zweiten Stufe in einem Softwaremodell aufbereitet, welches im Zielsystem implementiert werden kann.

Die der Implementierung vorgelagerten Schritte werden, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, iterativ im Zuge der Validierung durchlaufen. Hierzu wird das Modell gegebenenfalls modifiziert, wobei in Teilen die Schritte von der Erstellung der Datenbasis über die Modellierung bis zum Simulationslauf erneut durchgeführt werden. Ist die Validierung erfolgreich, so wird ein ablauffähiges Modell abgeleitet. Im Vorfeld erfolgt die Auswahl des Simulatorkerns, die Festlegung der Datenverwaltung sowie die Definition der Benutzeroberfläche und Schnittstellen zu externen Datenbeständen (VDI 3633-Blatt 1, S. 7–9; VDI 3633-Blatt 2).

2.3.4 Qualitätskriterien für die Simulation von Produktionssystemen

„Grundsätzlich hängt die Qualität der Simulationsergebnisse direkt von der Güte der Eingangsdaten (..)“ (KUDLICH 2000, S. 31) sowie den Modellierungs- und Simulationsverfahren und der Ergebnisinterpretation ab (KÜHN 2006, S. 108). Die Qualität ist dabei im Allgemeinen der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000, S. 18). BECKER (1998) definiert für eine ordnungsgemäße Modellierung sechs Grundsätze, die sich auf die Richtigkeit, die Relevanz, die Wirtschaftlichkeit, die Klarheit, die Vergleichbarkeit sowie den systematischen Aufbau beziehen. MÜLLER-SOMMER & STRABBURGER (2010, S. 63) fassen 15 Merkmale in den Klassen Zweckabhängigkeit, Systemunterstützung, Inhärenz und Darstellungsbezug zusammen. RABE ET AL. (2008b, S. 22–23) nennen die Vollständigkeit, die Konsistenz, die Genauigkeit, die Aktualität, die Eignung, die Plausibilität, die Verständlichkeit, die Machbarkeit sowie die Verfügbarkeit als übergreifende Kriterien.

Im Bereich der Produktionstechnik sind eine fundierte Grundsatzentscheidung bei der Projektvorbereitung, eine konsequente Dokumentation, eine durchgängige Verifikation und Validierung, eine kontinuierliche Integration des Auftraggebers sowie eine systematische Projektdurchführung als entscheidend einzustufen

(WENZEL ET AL. 2008). Die richtige Skalierung und Fokussierung des Systemausschnitts stellt die zielgerichtete Erstellung von Simulationsszenarien sicher (BRECHER & LOHSE 2009), bei der bereits im Vorfeld auf eine Wiederverwendbarkeit für Folgeprojekte zu achten ist (XU 2003; MAYER 2008). Durch eine konsequente Erkenntnisrückführung aus der realen Produktion können diese Modellbestandteile weiter verbessert werden (VDI 3633-Blatt 8, S. 10). KADACHI (2004) definiert mit dem Fokus der Materialflusssysteme Kriterien für deren simulationskonforme Abbildung. Hierbei ist neben der Datenbeschaffung und der Abbildung der Systemstruktur vor allem auch die Ablauflogik für eine zielgerichtete qualitative und quantitative Auswertung der Simulationsstudien relevant.

Die Qualität der Simulation wird innerhalb der Verifikation und Validierung mit verschiedenen Techniken geprüft (BRADE 2000; RABE 2001; WANG & LEHMANN 2007; RABE ET AL. 2008a; RABE ET AL. 2008b; WENZEL ET AL. 2008; MÄRZ ET AL. 2011). Die Verifikation kann als eine Kontrolle dafür definiert werden, „(...) ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert (...)“ (RABE ET AL. 2008b, S. 14) und der Prozess der Modellbildung sowie Transformation somit fehlerfrei durchgeführt wurde. Die Validierung hingegen ist die „(...) kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben“ (RABE ET AL. 2008b, S. 15). Dies wird durch eine Prüfung des Ein- und Ausgangsverhaltens sowie dessen Abhängigkeiten mit den Systemparametern sowie deren Übereinstimmung mit dem realen Systemverhalten sichergestellt (VDI 3633-Blatt 2, S. 5–6).

Im zeitlichen Verlauf des Entwicklungsprozesses stellt sich für die Modellbildung und Simulation die Anforderung, ein für den Abstraktionsgrad hinreichendes Modell bereit zu stellen, das die jeweilige Phase optimal unterstützt und den Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten verbessert (KADACHI 2004, S. 12–17). Der Nutzen und speziell der Wirkungsgrad der Simulation ist von mehreren Faktoren abhängig und variiert, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, im Verlauf eines Entwicklungsprojektes.

Mit fortschreitendem Reifegrad der Entwicklungsergebnisse steigt der Aufwand zur Modellbildung (KUDLICH 2000, S. 28–35). Ebenso ändert sich die Gewichtung der Qualitätskriterien. Diese stehen in Korrelation zur ermöglichten Abstraktion des Modells und zum erforderlichen Berechnungsaufwand. In frühen Entwicklungsphasen werden qualitative Aussagen fokussiert, die der Eingrenzung des Lösungsraums dienen. Demzufolge erhöht sich der Wirkungsgrad einer Simulation kontinuierlich in den ersten Projektphasen, bis eine Verbesserung der Trennschärfe

nur noch begrenzt möglich ist, die geforderte Aussagekraft sowie der Aufwand zur Simulation jedoch weiter steigen.

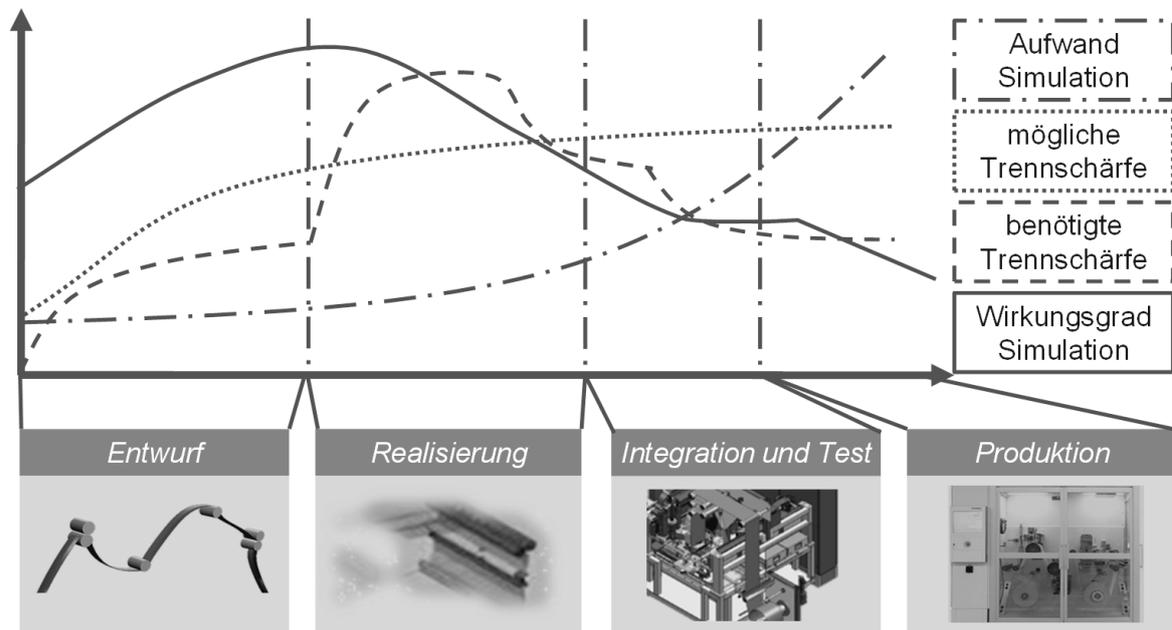


Abbildung 2.7: Qualitativer Verlauf der Qualitätsansprüche an die Simulation (eigene Darstellung der in KOMARNICKI 1980; KUDLICH 2000, S. 28–35; KADACHI 2004, S. 34–36; HEIßING 2009; VAJNA ET AL. 2009, S. 14 wiedergegebenen Daten).

In der Realisierung steht mit der Konkretisierung der Entwicklungsergebnisse die exakte Abbildung des Systems im Vordergrund, um quantitativ korrekte Erkenntnisse erzielen zu können. Jedoch steigt der Modellbildungs- und Simulationsaufwand in dieser Phase exponentiell an, bietet aber im Vergleich zu verfügbaren, realen Versuchen nur noch einen geringen Mehrwert.

Für die Integrationstests am Ende der Entwicklung, beispielsweise durch eine VIBN, können abstrahierte Modelle zum Einsatz kommen, da das Zusammenspiel der Systembestandteile auf einer globaleren Betrachtungsebene im Fokus steht und die Funktionsfähigkeit der Teilsysteme bereits im Vorfeld abgesichert wurde. Die Simulation findet auch parallel zum Produktionsbetrieb zur Optimierung Anwendung, wobei nur Teilbereiche der Anlage im Fokus stehen. Für eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens kommt hierfür aber maßgeblich das reale System zum Einsatz.

2.4 Grundlagen der Informatik und Computergrafik

2.4.1 Animation und physikbasierte Simulation

Die physikbasierte Simulation hat ihren Ursprung in der Animationstechnik und stellt einen Teilbereich der Computergrafik (PARENT 2012) dar. Für eine Animation werden „computergenerierte Einzelbilder, die zum Beispiel durch Visualisierung entstanden sind, zu einem Video zusammengefügt“ (HERGENRÖTHER 2003, S. 13; vgl. auch VDI 3633-Blatt 11, S. 3), um den Eindruck einer Bewegung zu erzeugen. Die einzelnen Bilder werden über Prinzipien des Keyframing (WHITAKER & HALAS 1981; PARENT 2012) oder der expliziten, mathematischen Definition von Bewegungskurven erstellt (LACOUR 2012, S. 26–27). Dabei ist nicht zwangsläufig ein physikalisches bzw. mathematisches Modell hinterlegt, da der Fokus auf einer visuell ansprechenden Darstellung des gewählten Szenarios liegt. Eine Animation stellt somit eine über den Zeitverlauf starre Aufbereitung und Dynamisierung von Modellen dar.

In einer physikbasierten Simulation hingegen wird das betrachtete System in ein ausführbares Modell überführt. Dieses bietet die Möglichkeit, Rahmenbedingungen und Eigenschaften der Modellbestandteile innerhalb der Berechnungszyklen zu variieren, um Studien bezüglich des resultierenden Verhaltens generieren zu können. Nach HERGENRÖTHER (2003, S. 13) sind die Grenzen zwischen Animation und Simulation fließend. Erste Ansätze zur physikbasierten Simulation in der Computergrafik wurden in den 1980er Jahren von BARZEL & BARR (1988) oder BARAFF (1989; 1990; 1991) aufgezeigt. Auch in der Medizintechnik werden ähnliche Berechnungsverfahren zur Verbesserung von chirurgischen Eingriffen seit längerem eingesetzt (KÜHNAPFEL ET AL. 1995). Die Geometriemodelle wurden um eine physikalische Repräsentation und somit eine Nachbildung der Eigenschaften des Körpers erweitert (KUHN 1997, S. 6). Erste Ansätze für Physik-Engines etablierten sich über die Computergrafik in der Film- und Spieleindustrie, da die gestiegene Rechenleistung (MOORE 1965) die Abbildung realitätsnaher Effekte ermöglichte. Innerhalb dieser Middlewaresysteme⁸ sind einzelne, zuvor explizit programmierte physikalische Effekte zusammengefasst. Dies hat den Vorteil, dass mit der gleichen Physik-Engine unterschiedliche Simulationen situationsspezifisch erstellt werden können. Dadurch wurde der hohe Aufwand zur Änderung der Modelle und somit auch der Konfiguration der Simulation reduziert.

⁸ Middlewaresysteme sind Programmbibliotheken, die Algorithmen zur Berechnung und Visualisierung bereitstellen.

Die echtzeitfähige Abbildung des Systemverhaltes wird in der physikbasierten Simulation durch den Einsatz von Näherungsverfahren, wie z. B. der expliziten bzw. impliziten Euler-Integration, dem Runge-Kutta-Verfahren oder der Verlet-Integration erreicht (ERICSON 2005; BENDER 2007; SPITZWEG 2009; MILLINGTON 2010; BENDER 2014). Im Vergleich zu Ansätzen der Ingenieurwissenschaften, wie der FEM-Simulation (KNOTHE & WESSELS 2008), lassen sich keine hochpräzisen Simulationsstudien durchführen. Die Ergebnisse der Simulation sind jedoch ausreichend, um ein für die Analyse des Gesamtverhaltens hinreichend genaues Systemabbild zu ermitteln (BOEING & BRÄUNL 2007). Aufgrund der Berechnungseffizienz von Physik-Engines ist online im Simulationsverlauf eine Modellvariation möglich, was eine Grundvoraussetzung für eine Interaktivität zwischen Benutzer und Simulationsmodell darstellt.

Die Berechnung und Visualisierung des physikalischen Verhaltens erfolgt zyklisch nach der vorgegebenen Taktfrequenz⁹. Aus den Eigenschaften der Simulationsobjekte, die durch den Benutzer modifiziert werden können, sowie deren Geometrien und Posen¹⁰ werden innerhalb der Kollisionserkennung die bestehenden Kontaktstellen und -bedingungen ermittelt (vgl. Abbildung 2.8). Hierbei wird zwischen einer impuls- und beschränkungs-basierten Starrkörpersimulation unterschieden. Die berechenbare Kollisionsreaktion, z. B. ein reibungsbehafteter Stoß oder eine Verformung, führt im nächsten Berechnungsschritt zu einer Änderung der Objekteigenschaften und somit auch des Simulationsszenarios.

Die größten Berechnungsaufwände der physikbasierten Simulation resultieren aus der Abbildung von Kollisionsreaktionen. Dazu wurden effiziente Methoden zur Kollisionsdetektion sowie zur Berechnung der Kollisionsinformationen entwickelt. Neben einer stufenweisen Berechnung der Kollision in der sogenannten Broad- bzw. Narrow-Phase werden unterschiedliche Näherungsverfahren und Hüllkörpermethoden eingesetzt, um den Kontaktbereich einzugrenzen. Den Simulationsobjekten werden dafür Kollisionskörper zugeordnet, die nicht oder nur ansatzweise der geometrischen Originalrepräsentation entsprechen. So kann ein Objekt zu Gunsten des Berechnungsaufwandes durch Boxen, Kugeln oder weitere Hüllkörper, wie z. B. k-Discrete Oriented Polytopes (k-DOP), abstrahiert werden (BOURG 2002; ERICSON 2005; BOURG ET AL. 2013).

⁹ Anwendungen im Bereich der Produktionstechnik erfordern teilweise höhere Frequenzen für die Berechnung der Effekte, um z. B. ein Signalabbild für eine SPS echtzeitfähig zu erzeugen.

¹⁰ Eine Pose ist eine Kombination der Positions- und Orientierungsinformationen eines Körpers im dreidimensionalen Raum (DIN EN ISO 8373) und wird oftmals in homogenen Koordinaten dargestellt. Durch elementare homogene Transformationsmatrizen reduziert sich die Berechnung von Bewegungsvorgängen auf Matrix-Multiplikationen.



Abbildung 2.8: Ablauf einer physikbasierten Simulation (eigene Darstellung der in ERICSON 2005; SPITZWEG 2009, S. 23–41; MILLINGTON 2010; PARENT 2012; BENDER 2014, S. 84 wiedergegebenen Daten).

Weiterführende Informationen zur physikbasierten Simulation und Animation aus dem Bereich der Computergrafik sowie den diesbezüglichen Berechnungsverfahren zur Kollisionsdetektion und Kollisionsreaktion finden sich unter anderem in ECKSTEIN (1999), BOURG (2002), LENNERZ (2002), VAN DER BERGEN (2004), KIRMSE (2004), EBERLY (2005), ERLEBEN (2005), ERICSON (2005), KLEIN (2005), BENDER (2007), COUMANS (2007), NGUYEN (2008), EBERLY (2010), MILLINGTON (2010) PARENT (2012), BOURG ET AL. (2013), BENDER (2014), PARENT (2015) oder BATTY (2015).

2.4.2 Geometrische Modellrepräsentation und Datenformate

Die Ermittlung des Systemverhaltens erfordert je nach Simulationsart unterschiedliche Modelle. Bei der Absicherung produktionstechnischer Systeme und im Speziellen der physikbasierten Simulation sind vor allem die dynamischen Eigenschaften der Maschinen und Anlagen entscheidend, die in 3D-Modellen abgebildet sind. Die Definition der geometrischen Repräsentation variiert je nach eingesetztem CAD- bzw. Entwicklungswerkzeug.

Die reine Darstellung der geometrischen Information, wie durch Kanten-, Flächen- oder Volumenmodelle ist für eine Simulation oftmals nicht ausreichend. Daher

werden in Mehr-Informations-Modellen Charakteristika des Objektes, wie die Materialeigenschaften, mit gespeichert. Für eine Analyse und Variation der Topologie von Objekten ist in vielen Fällen die Definition von parametrischen Modellen sinnvoll, bei denen die geometrischen Merkmale über veränderbare Regeln verknüpft sind und einfach modifiziert werden können. (LIN & GOTTSCHALK 1998, S. 38; VAJNA ET AL. 2009, S. 173)

Je nach vorhandenem Modell differenzieren sich die zugehörigen Datenformate, die z. B. nach VDI/VDE 3681 (VDI/VDE 3681, S. 5–8) kategorisiert werden können. Kriterien sind die formale Basis, die Verhaltensbeschreibung, die Zeitdarstellung, die Struktur, die Synchronisation, die geometrische Darstellung sowie die gegebene Werkzeugunterstützung. SCHNIEDER (1999, S. 125–126) unterscheidet hinsichtlich pragmatischer und paradigmatischer Klassifizierungsmerkmale. Letztere beinhalten natürliche und algebraisch-logische sowie implementierungs-, struktur-, ablauf- und zustandsorientierte Beschreibungsmittel. FRIEDRICH (2011, S. 67) nennt im Umfeld der mechatronischen Entwicklung Anforderungen, die von einer Datenbasis für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bis hin zur Fähigkeit der Werkzeugunterstützung reichen. Für den Bereich der Geometrieinformationen und somit maßgeblich der mechanischen Konstruktion bezeichnen VAJNA ET AL. (2009) unter anderem die Initial Graphics Exchange Specification (IGES), das Drawing Interchange Format (DXF) sowie den Standard for the Exchange of Product model data (STEP) als die wichtigsten Formate. Im Bereich der Visualisierung haben sich die Formate der Virtual Reality Modelling Language (VRML), das 3D-PDF, der Jupiter Tessellation (JT) sowie das XML¹¹-basierte Format COLLaborative Design Activity (COLLADA) etabliert (ARNAUD & BARNES 2006; RÖHL & FRÖHLICH 2012).

Neben disziplinspezifischen Formaten fokussieren Normungsaktivitäten für Datenformate übergreifende Schnittstellenkonzepte. Ein Beispiel hierfür ist die Arbeitsgruppe AutomationML (AML), die einen neuen Standard für ein übergreifendes Dachformat in Anlehnung an die CAEX¹² IEC 62424 entwickelt (DRAHT & MIEGEL 2010; DRAHT ET AL. 2011; PRINZ ET AL. 2011). Dabei werden übergreifende Informationen zur Anlagentopologie definiert, die durch zusätzliche Informationsmodelle detailliert sind: beispielsweise PLCopen¹³ für Elemente der Steuerungs-

¹¹ eXtensible Markup Language (XML) ist eine Auszeichnungssprache zur hierarchisch strukturierten Darstellung von beliebigen Informationen in Form von Textdateien (BERNERS-LEE & JAFFE 2015).

¹² Computer Aided Engineering Exchange.

¹³ PLCopen ist eine industrielle Interessensgemeinschaft zur Entwicklung von übergreifenden Standards für Steuerungsprojekte im Umfeld der DIN EN 61131. Beispiele sind Motion-Control-Bibliotheken oder XML-basierte Austauschstandards von Projektdaten.

logik oder COLLADA für Geometrie- und Kinematikinformationen (DRAHT & MIEGEL 2010, S. 128–130; LÜDER 2014). Zudem haben sich Beschreibungsformen etabliert, mit denen Wirkzusammenhänge in komplexeren Systemen lösungsunabhängig abbildbar sind. Beispiele hierfür sind die VDI 3682, die Unified Modelling Language (UML) bzw. deren Konkretisierung für technische Systeme, die Systems Modeling Language - SysML (OMG 2015; WEILKIENS 2008). Informationen zu disziplinspezifischen und übergreifenden Beschreibungssprachen finden sich z. B. in VDI 2219, VDI 2249, VDI/VDE 3681, VDI/VDE 3690-Blatt 1, WEILKIENS (2008), DÖBELE (2010), WITSCH & SCHÜNEMANN (2010), BRACHT ET AL. (2011, S. 189–198), FRIEDRICH (2011, S. 34–39), SELIG (2011) oder REUTER (2013).

2.4.3 Diskretisierung und Zerlegung von Geometriemodellen

Volumenbasierte Simulationsverfahren, wie die Finite Elemente Methode (FEM), setzen im 3D-Bereich auf eine Vielzahl von Volumenprimitiven, aus denen sich ein komplexerer Volumenkörper zusammensetzt. Für die Generierung diskreter Elemente wird zunächst eine Polygonisierung der CAD-Geometriemodelle vorgenommen, die mittels einer Delaunay-Triangulation (KLEIN 2005a), dem Verfolgungsalgorithmus nach HARTMANN (1998), dem cutting cube Algorithmus nach SCHMIDT (1993) oder anderen Verfahren erfolgen kann. Basierend darauf werden diskrete Volumenkörper, beispielsweise über die Advancing-Front-Methode (SCHÖBERL 1997), erzeugt. Die Qualität der Diskretisierung hinsichtlich der Auflösdichte und deren Gleichmäßigkeit beeinflussen die Ergebnisse der späteren Simulation.

Auch in der Computergrafik ist die Diskretisierung von Objekten eine gängige Problemstellung. Ein Beispiel ist die Rasterung einer dreidimensionalen Szene zur Darstellung in einem zweidimensionalen Bild. Dazu wird vorab die zu betrachtende Szene eingegrenzt und das Objekt über Raycasting- oder Raytracing-Verfahren¹⁴ diskretisiert. Diese Algorithmen können ebenfalls für die Diskretisierung von Volumenkörpern in gleichmäßige Gitterstrukturen genutzt werden. Über einen dem Objekt zugeordneten Hüllkörper, z. B. ein k-DOP, wird zunächst der Betrachtungsraum eingegrenzt und ein gleichmäßiges Gitter erzeugt (MÜLLER ET AL. 2004, S. 2). Die Auswertung der Intersektionen des sogenannten Sehstrahls entlang einer

¹⁴ Raycasting bezeichnet das Abtasten einer virtuellen dreidimensionalen Szene durch Sehstrahlen eines definierten Blickpunktes. Daraus ergibt sich ein zweidimensionales Bild. Raytracing ist eine Erweiterung des Raycasting und ermöglicht eine sogenannte Verdeckungsberechnung. Dies wird benötigt, um die Sichtbarkeit von Objekten im dreidimensionalen Raum zu ermitteln. (BRÜDERLIN & MEIER 2001, BUNGARTZ ET AL. 2002, BUNGARTZ 2009)

definierten Achse mit dem Oberflächennetz des Volumenkörpers ergibt für jedes Gitterelement einen Aufschluss darüber, ob dieses innerhalb des Körpers liegt (NGUYEN 2008, S. 29.5). Analog lässt sich dies über das Depth Peeling Verfahren¹⁵ nach EVERITT (2001) ermitteln. Dabei werden von einem 3D-Objekt virtuelle Tiefenbilder erzeugt, durch deren Überlagerung die dem Körper zugehörigen Gitterelemente identifiziert werden können. Aufgrund der Einsatzmöglichkeit eines Grafikprozessors (GPU) kann bei diesem Verfahren die Berechnungsdauer für die Ermittlung der Diskretisierung gesenkt werden.

Die Abbildung eines Objektes mit einem regelmäßigen Gitter wird auch als Voxelisierung bezeichnet (FRÜHAUF 1997). Die einzelnen Voxel können innerhalb der Simulation über Partikel (Kugeln), wie in Abbildung 2.9 zu sehen, oder andere Volumenprimitive repräsentiert werden. Die Gleichmäßigkeit der diskreten Elemente hat dabei jedoch eine schlechtere Abbildung der Oberflächenstruktur zur Folge, die je nach Auflösung der Diskretisierung variiert (SCHÄFER 2010b; SCHREIBER & ZIMMERMANN 2012). Für einzelne Simulationsverfahren wurden spezielle Techniken entwickelt, die ein geometrisches Objekt in die für die Simulation optimale Diskretisierung überführen. Beispiele hierfür sind Generalized Moving Least Squares (GMLS), einer Weiterentwicklung des Moving Least Squares (MARTIN ET AL. 2010), oder die konvexe Zerlegung (LACOUR 2012, S. 86–89). Innerhalb dieser Arbeit ist die Diskretisierung als die Zerlegung von Volumenkörpern in beliebige Teilkörper definiert, die unter der möglichst exakten Einhaltung der geometrischen Repräsentation des Körpers erfolgt.

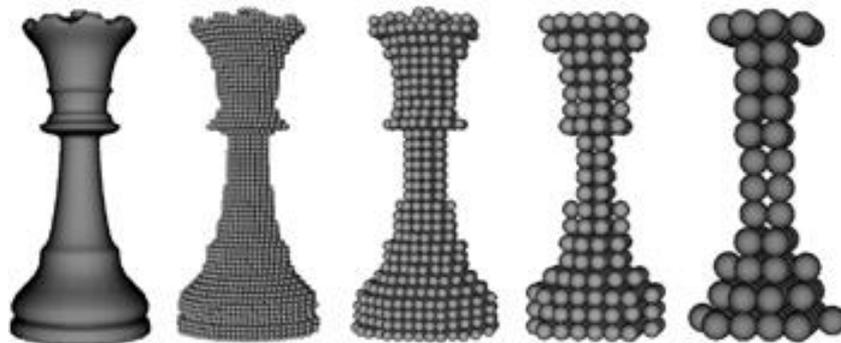


Abbildung 2.9: Exemplarische Diskretisierungsstufen eines Volumenkörpers (NGUYEN 2008, S. 29.5).

¹⁵ Depth Peeling Verfahren werden in der Computergrafik primär zur Darstellung transparenter Objekte eingesetzt.

2.4.4 Interaktive Eingabemethoden

„Zeichnen ist notwendig, will man seine Fähigkeiten zum visuellen Denken voll ausschöpfen. Es ermöglicht sowohl die Aufnahme und Speicherung als auch die Manipulation und Kommunikation (...)“ von Wissen (ADAMS 1984, S. 98). Aufgrund der großen Aussagekraft von bildlichen Darstellungen im Problemlösungszyklus nutzen Entwickler vor allem in frühen Phasen Freihandskizzen als eine schnelle und einfache Möglichkeit, Ideen und Konzepte zu visualisieren und zu dokumentieren (ADAMS 1984, S. 94–101; COOK & AGAH 2009, S. 1; ALVARADO 2011, S. 19). Neue Eingabetechnologien wie z. B. Touch-Displays oder Digitalstifte ermöglichen es, diese Skizzierprozesse zu digitalisieren. Die Basis dazu stellen Verfahren dar, die sich mit der Interpretation von Vektorzügen und deren Umwandlung in geometrische Objekte oder andere Datenelemente befassen. Spezielle Algorithmen analysieren die einzelnen Vektoren der skizzierten Elemente und leiten anhand von Regeln, z. B. Interpretationssprachen wie LADDER¹⁶ (HAMMOND & DAVIS 2003, 2005, 2010), den wahrscheinlichsten Objekttyp ab. Die Erkennung von einzelnen Elementen erfolgt beispielsweise durch einen iterativen Ausschluss von möglichen Formen, wie es in Abbildung 2.10 dargestellt ist.

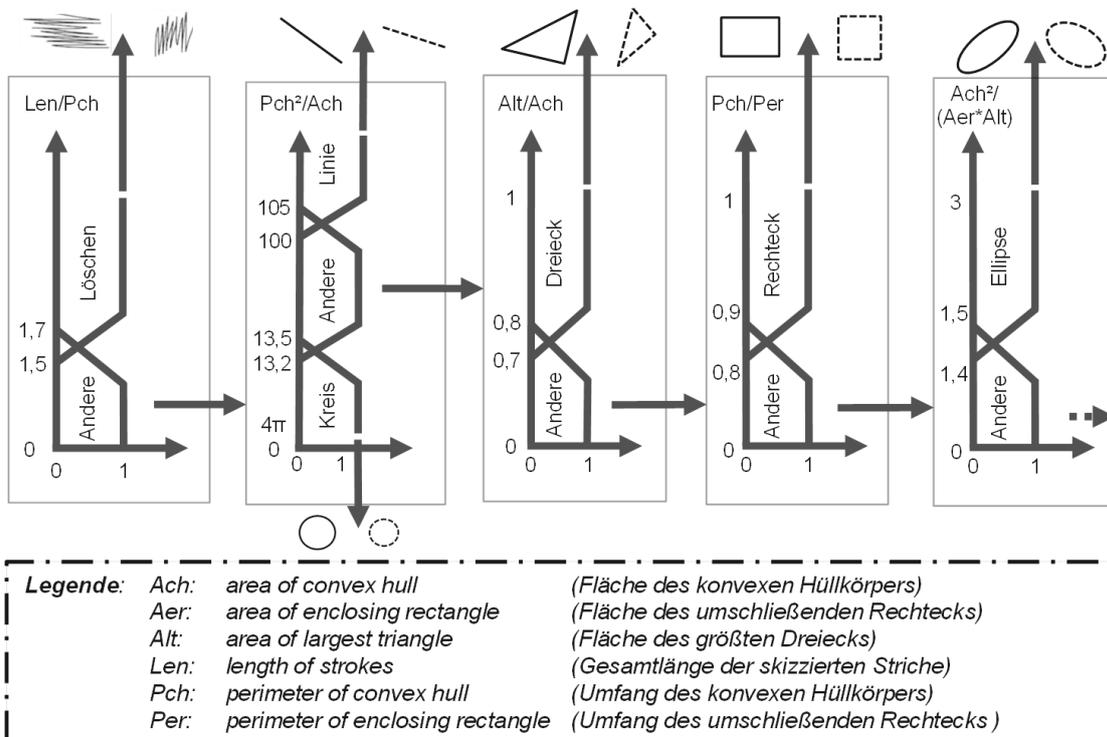


Abbildung 2.10: Entscheidungsbaum und Fuzzy-Logiken zur Interpretation einer Grundgeometrie (in Anlehnung an JORGE & FONSECA 2000).

¹⁶ LADDER: LAnguage to Describe Drawing, Display and Editing in sketch Recognition.

Im dargestellten Beispiel werden über ein Set von Fuzzy-Logiken binäre Entscheidungen (horizontale Achse) auf Basis des Verhältnisses bestimmter Kenngrößen des skizzierten Elements (vertikale Achse) getroffen. Ist beispielsweise das Verhältnis der Länge des Vektorzuges zum Umfang des konvexen Hüllkörpers größer als 1,7, so wird das skizzierte Element als Löschen interpretiert. Sinkt dieser Wert unter 1,5, sind weitere Kenngrößen für eine Auswertung nötig. Dies erfolgt iterativ, bis die zugehörige skizzierte Form, z. B. ein Dreieck, identifiziert wurde oder das Ende des Algorithmus erreicht ist. In diesem Fall sowie an den Übergangsbereichen der Fuzzy-Logiken ist eine weitere Eingabe bzw. Anpassung durch den Bediener notwendig.

Neben der Interpretation von geometrischen Objekten ist auch die Erkennung von Buchstaben oder Wörtern aus digitalen handschriftlichen Notizen möglich. Zudem können aus der Kombination unterschiedlicher Elemente implizite Inhalte abgeleitet werden. Eine dafür notwendige Hierarchisierung der zugrundeliegenden Daten und die Ableitung von Informationen ist beispielsweise in der DIKW¹⁷-Hierarchie definiert (ACKOFF 1989; BODENDORF 2006; ROWLEY 2007). Dieser Informationsgewinn ist die Grundvoraussetzung für eine interaktive Eingabe, bei der das System mit einer Rückkopplung von Informationen reagiert.

Die Interaktivität ist im Allgemeinen durch einen impliziten Austausch von Informationen gekennzeichnet (STRZEBKOWSKI 1995; JENSEN 1998; PREIM 1999). Über einen kontinuierlichen Rollentausch zwischen Sender und Empfänger wird das Wechselspiel zwischen zwei Instanzen und somit eine Rückkanalfähigkeit realisiert (BIEBER & LEGGEWIE 2004). Nach BAUMGARTNER (1997) ermöglicht dies dem Benutzer, in den Informationsaustausch bezüglich der Inhalte und deren Sequenz gestaltend einzugreifen. Mit dem Anwendungsfeld der Lernprogramme definiert HAACK (1997) anhand der Anzahl an Eingriffs- und Steuermöglichkeiten für den Benutzer unterschiedliche Ausprägungen der Interaktivität. Diese reichen von einem einfachen Informationszugriff über kontextspezifische Zusatzinhalte bis hin zu einem intelligenten automatischen Feedback oder einer Integration weiterer Personen. Analog dazu stellt SCHULMEISTER (2002) für die Interaktivität eine allgemeine Taxonomie auf, die sechs Stufen unterscheidet: betrachten und rezipieren einzelner Objekte; betrachten und rezipieren multipler Darstellungen; Variation der Repräsentationsformen; Modifikation der Komponenteninhalte;

¹⁷ Data-Information-Knowledge-Wisdom.

Gestaltung der Inhalte und deren Repräsentation; Gestaltung der Inhalte und deren Repräsentation mit intelligenter Rückmeldung des Systems.

Bezugnehmend darauf ist in dieser Arbeit der interaktive Systementwurf als ein Vorgang definiert, bei dem implizierte Inhalte des Anwenders in einer digitalen Skizze automatisch identifiziert und interpretiert werden, so dass diese in ein ausführbares Modell überführt werden können. Dieses ist die Basis einer Simulation, deren Visualisierung den bidirektionalen Informationsaustausch abschließt. Der interaktive Entwurf ist der Stufe sechs der Interaktionstaxonomie nach SCHULMEISTER (2002) zuzuweisen, bei dem der Gegenstand der Repräsentation gestaltet wird und eine Variation des entworfenen Systems in intelligenten Rückmeldungen des Systems resultiert.

2.5 Grundlagen formlabiler Objekte

Formlabile Objekte, oftmals synonym als nicht formstabil, forminstabil oder deformierbar bezeichnet (SCHNEIDER 1999, S. 6), besitzen nach HERGENRÖTHER (2003, S. 12) „(...) eine veränderbare Objektgeometrie, d. h., die Geometrie kann sich bezüglich ihres lokalen Koordinatensystems über einen bestimmten Zeitraum verändern, was bei starren Objekten nicht möglich ist“. Neben den veränderbaren Abständen der Körperpunkte (KUHNS 1997, S. 18) sind formlabile Objekte zusätzlich durch die Eigenschaft charakterisiert, nur eingeschränkt äußere Kräfte aufnehmen zu können (BURGER ET AL. 1987). Im Konkreten bedeutet dies, dass eine kleine Krafteinwirkung, je nach Material und geometrischer Form des Objektes, eine große Verformung zur Folge haben kann. Die Beanspruchung des Objektes lässt sich hinsichtlich Biegung, Torsion und Schub unterteilen (VÖLLINGER 2011, S. 9–10). Reduziert sich die Möglichkeit der äußeren Verformung auf eine Biegebeanspruchung, werden diese Objekte auch als biegeschlaff bezeichnet (WÖßNER 2009). Neben dem Aspekt der Biegesteifigkeit fasst REINHART (1996, S. 9–29; vgl. auch SCHNEIDER 1999, S. 37–51) insgesamt 19 charakteristische Klassifizierungsmerkmale formlabiler Bauteile in vier Gruppen zusammen, die im Nachfolgenden dargestellt sind. Anhand der Bewertung eines Objektes bezüglich dieser Klassen sowie der Merkmalskombination kann qualitativ der Aufwand zur Handhabung des formlabilen Objektes abgeleitet werden (REINHART 1996, S. 9f).

Grundklassifizierung: Die erste Gruppe der Klassifizierungsmerkmale orientiert sich an verhaltensbestimmenden Objekteigenschaften. Dazu gehören der Aggregatzustand, der Formzustand, der Grad der Biegesteifigkeit, der Grad der Volumen-

änderung unter Krafteinfluss, die Elastizität sowie grundlegende Formmerkmale. Die Biegesteifigkeit bezeichnet dabei die Neigung eines Objektes, sich unter Schwerkräfteinfluss durchzubiegen und kann anhand der Biegesteifigkeitskennzahl K_{BS} bewertet werden, die in einem Biegeversuch als Verhältnis zwischen der Durchbiegung h sowie der Länge l des Balkens ermittelt wird. Alternativ ist eine analytische Bestimmung auf Basis der resultierenden Gewichtskraft G , dem Elastizitätsmodul E sowie dem Quadrat der Länge des Bauteils l^2 und dem Flächenträgheitsmoment I_y des Balkenquerschnitts um die Biegeachse (in diesem Fall die y -Achse) möglich.

Die Elastizität eines Körpers lässt sich aus dem Verhältnis der dem Körper zugeführten Formänderungsarbeit und der frei werdenden mechanischen Arbeit durch Rückbildung der Formänderung ermitteln. Hierbei kann in elastische Körper, die dem Hook'schen Gesetz unterliegen, sowie plastische Körper unterschieden werden, bei denen nach Überschreiten der Fließgrenze ein Betrag der Formänderung zurückbleibt. Bezüglich der Formmerkmale werden die Objekte nach blockförmiger, flächenförmiger und langgestreckter (offen oder geschlossen) Geometrie klassifiziert. Diese Einordnung erfolgt anhand des Längenverhältnisses der längsten vorliegenden zur geringsten vorliegenden Seite sowie dem verbleibenden Projektionsmaß eines Objektes. (REINHART 1996, S. 10–19; SCHNEIDER 1999, S. 39–47)

Geometrische Merkmale: Neben den Formmerkmalen der Grundklassifikation sind zudem weitere geometrische Merkmale für die Klassifikation relevant. Diese beziehen sich zum einen auf den Querschnitt des Objektes, der hinsichtlich der Größe, der geometrischen Außenkontur sowie dessen Änderung über die Länge bewertet wird. Zum anderen ist die Symmetrie relevant, aus der sich die Anzahl der möglichen Lagen, Orientierungen sowie Freiheitsgrade eines Objektes bestimmen lassen. Zudem werden Objekte in dieser Merkmalsgruppe anhand von Oberflächenmerkmalen, wie Durchbrüchen, zentrierenden Elementen oder unregelmäßigen Profilen, unterschieden. (REINHART 1996, S. 20–23; SCHNEIDER 1999, S. 47–49)

Materialigenschaften: Neben den Materialkennwerten, die bereits innerhalb der Grundklassifikation erfasst sind, haben die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes bzw. die diesbezüglichen Materialkennwerte (haftend, glatt etc.) einen Einfluss auf das Objektverhalten. In dieser Merkmalsgruppe ist zudem der Grad der Luftdurchlässigkeit sowie der Magnetisierung enthalten. (REINHART 1996, S. 24–25; SCHNEIDER 1999, S. 49–50)

Bauteilverhalten: Die letzte Merkmalsgruppe bezieht sich auf Objekteigenschaften, die das Verhalten des Bauteils beeinflussen. Dazu zählt neben dem Gewicht und der Lage des Massenschwerpunkts die Neigung der Objekte zum Verhaken, Verklemmen und zur Überlappung sowie zur Randhaftung. Zudem ist die Anzahl der mechanisch stabilen Werkstücklagen zu berücksichtigen. (REINHART 1996, S. 25–28; SCHNEIDER 1999, S. 50–51)

Die dargestellten Eigenschaften wurden ermittelt, um den Aufwand zur automatisierten Handhabung formlabiler Objekte abzuschätzen. Dieser steht in Korrelation zur Möglichkeit der exakten Beschreibung des dynamischen Objektverhaltens. Als Analogie lassen sich daraus die notwendigen Modellcharakteristika für die Abbildung formlabiler Objekte in der physikbasierten Simulation ableiten.

2.6 Zusammenfassung der Grundlagen

Die vorangegangenen Abschnitte bilden die Grundlage für die nächsten Kapitel. Dabei wurde das Umfeld der Arbeit systematisch von den Produktionssystemen im Allgemeinen zu den Grundlagen der Informatik und einer Betrachtung formlabilen Objektverhaltens dargestellt. Die in dieser Arbeit fokussierte Methodik zur Verbesserung des Systementwurfs von Verarbeitungsmaschinen erfordert eine Einordnung in die Produktionstechnik sowie den zugrundeliegenden Funktionseinheiten und zugehörigen Entwicklungsprozessen. Als Basis für die simulationsgestützte Entwicklung wurden grundlegende Vorgehensweisen der Modellbildung und Simulation dargestellt. Zur Implementierung der Simulationsmodelle sind die Grundlagen der Informatik und Computergrafik erforderlich, um ablauffähige Modelle aus der abstrakten Beschreibung mechatronischer Systeme zu erhalten. Innerhalb der Verarbeitungstechnik, die den Anwendungsfokus dieser Arbeit darstellt, ist die Abbildung formlabiler Objekte eine Voraussetzung, um die Simulation in diesem Bereich zu etablieren. Hierfür wurden die wichtigsten Eigenschaften charakterisiert, die für eine simulative Abbildung der formlabilen Verarbeitungsgüter und Betriebsmittel im Zuge des Systementwurfes zu berücksichtigen sind.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich

Innerhalb dieses Kapitels werden der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung mechatronischer Systeme dargestellt und offene Herausforderungen in einem Fazit zusammengefasst. Diese werden nachgelagert in Kapitel 4 weitergehend analysiert und Anforderungen an die simulationsgestützte Entwurfsmethodik abgeleitet. Einer Darstellung methodischer Ansätze zum systematischen Systementwurf in Abschnitt 3.2 folgen Verfahren zur interdisziplinären Simulation (Abschnitt 3.3), in der aktuelle Möglichkeiten der digitalen Validierung dargestellt werden. In Abschnitt 3.4 wird mit der physikbasierten Simulation eine Möglichkeit zur effizienten Modellierung und Simulation von Produktionssystemen gezeigt, deren technischer Reifegrad aktuell nur einen Einsatz zur Abbildung von Starrkörpersystemen erlaubt. Die Behebung dieser Restriktion ist Gegenstand mehrerer Forschungsaktivitäten, die in Abschnitt 3.5 gezeigt werden. Die Mehrheit der Verfahren zur Abbildung und Simulation formlabiler Objekte sind dabei im Bereich der Computergrafik entstanden. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse in Abschnitt 3.6 rundet das Kapitel ab.

3.2 Systematischer Entwurf mechatronischer Systeme

3.2.1 Vorgehensmodelle zur interdisziplinären Entwicklung

Für die Entwicklung mechatronischer Systeme existiert eine Vielzahl an Vorgehensmodellen, deren Übersicht z. B. in GAUSEMEIER (2008) oder EIGNER (2014) dargestellt ist. In vielen Bereichen hat sich die VDI-Richtlinie 2206 als Standard etabliert (JÄGER 2007; BERTSCHE ET AL. 2009; CROSTACK 2010, S. 12), die in Abbildung 3.1-A zu sehen ist. Das an das V-Modell der Softwareentwicklung (siehe DRÖSCHEL & WIEMERS 2000) angelehnte Vorgehensmodell ist als Erweiterung zur VDI/VDE 2422 entstanden und definiert analog zur VDI 2221 Prozessschritte zur Entwicklung mechatronischer Systeme (VDI 2206, S. 8).

Ausgehend von den Kundenanforderungen erfolgt nach einem übergreifenden Systementwurf die Realisierung in den spezifischen Entwicklungsdisziplinen. Die entstehenden Entwicklungsartefakte, d. h. alle materiellen und immateriellen

Projektergebnisse (VDI/VDE 3695-Blatt 1, S. 6), werden in der anschließenden Integrationsphase, in der zudem ein Abgleich mit den Kundenanforderungen und eine Eigenschaftsabsicherung erfolgt, zu einem Gesamtsystem orchestriert. Die einzelnen Schritte werden zyklisch durchlaufen, wobei der Reifegrad des betrachteten Systems, von einem Prototyp bis zu einem verkaufsfähigen Produkt, kontinuierlich steigt. Die Modellbildung und Simulation stellt phasenübergreifend einen festen Bestandteil dar, um das Zusammenwirken der beteiligten Disziplinen und die Funktionserfüllung analysieren zu können. (VDI 2206)

Diese Ansätze sind auch im 3-Ebenen Vorgehensmodell der Mechatronik nach BENDER (2005) erkennbar, das in Abbildung 3.1-B skizziert ist. Ausgehend von der Funktionalität des Gesamtsystems werden die Entwicklungsartefakte in unterschiedlich abstrahierten Stufen auf Subsystem- und Komponentenebene spezifiziert. Daran anschließend erfolgen die Realisierung in den Einzeldisziplinen und die Integration zum Gesamtsystem.

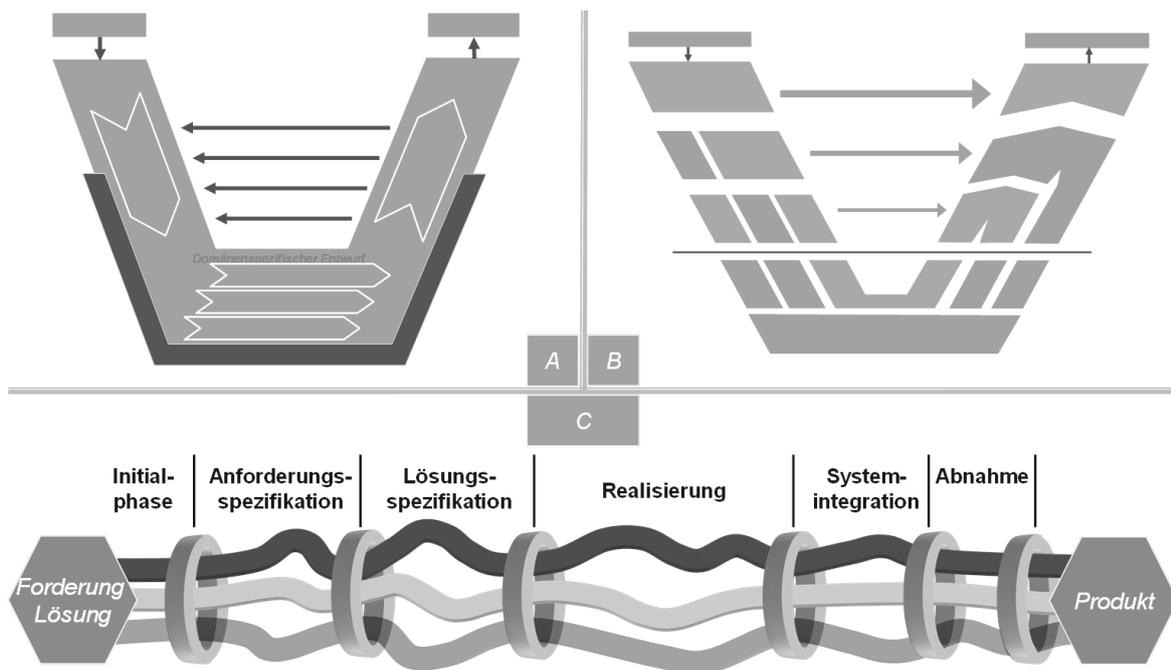


Abbildung 3.1: Evolution ausgewählter Vorgehensmodelle der Mechatronik: V-Modell der Mechatronik (A: VDI 2206), 3-Ebenen Vorgehensmodell (B: BENDER 2005) und Quality-Gate-Konzept der Mechatronik (C: GEISBERGER & SCHMIDT 2004; VDMA 2006).

Ziel der ersten Arbeitsschritte bei allen Vorgehensmodellen ist es, die meist abstrakten Kundenwünsche in quantifizierbare Anforderungen und erste übergreifende Konzeptentwürfe zu überführen. Im Zuge des „(...) System-Entwurfs wird das Produkt erstmals in einem noch abstrakten Plan dargestellt, der vor allem

die (Haupt-)Funktionen des Produktes sowie deren Abhängigkeiten untereinander berücksichtigt“ (VDMA 2006, S. 14). Dazu müssen nach VDI 2206, S. 32–35) die Anforderungen abstrahiert und Vorfixierungen auf Lösungen aufgehoben werden. Daraus lassen sich die Gesamtfunktion sowie Teilfunktionen ableiten. Diesem Prozessschritt schließt sich die Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen an, die zu prinzipiellen Lösungen konkretisiert werden. „Ergebnis des Systementwurfs ist ein domänenübergreifendes Lösungskonzept, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts und die Art und Anordnung seiner Komponenten beschreibt“ (VDI 2206, S. 35). Das Quality-Gate-Konzept der Mechatronik, eine Weiterentwicklung des 3-Ebenen-Modells der Mechatronik, bezeichnet dies als Lösungsspezifikation (GEISBERGER & SCHMIDT 2004). Das im VDMA Leitfaden Softwarequalitätssicherung (VDMA 2006) zusammengefasste Vorgehensmodell gibt dafür Dokumentklassen vor, die bei der Erreichung der in Abbildung 3.1-C dargestellten Quality-Gates¹⁸ vorliegen müssen. Beispiele hierfür sind Systemstrukturpläne oder Softwarespezifikationen (VDMA 2006, S. 22).

ALBERS ET AL. (2016a; siehe auch MEBOLDT 2008; SEDCHAICHARN 2010; BRAUN 2013) beschreiben die konsequente Weiterentwicklung von Prozessmodellen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM). Dieses stellt ein Rahmenwerk für die Entwicklung dar, das auf den Kerngedanken der Systemtheorie und dem Systems Engineering basiert. In einem generischen Metamodell werden die Produktentstehung und die Problemlösung in einer Aktivitätenmatrix verknüpft. Diese bildet zusammen mit einem Ressourcensystem sowie einem Phasenmodell das Handlungssystem, das ein Zielsystem in ein Objektsystem überführt. In Abgrenzung zu einer klassischen Charakterisierung von Entwicklungsprojekten¹⁹ definieren ALBERS ET AL. (2015b; siehe auch ALBERS ET AL. 2017b; ALBERS ET AL. 2016b) den Begriff der Produktgenerationsentwicklung. Hintergrund ist dabei eine stringente und ökonomische Produktentwicklung auf der Basis von Referenzprodukten, aus denen durch grundlegende Aktivitäten der Prinzip-, Gestalt- und/oder Übernahmevariation neue Teilsysteme generiert werden. Aufgrund einer zeitlichen Degeneration von einzelnen Produktmerkmalen nach dem KANO-Modell sind kontinuierliche Innovationszyklen notwendig, aus denen Differenzierungs-

¹⁸ Das Konzept der Quality-Gates beschreibt im Allgemeinen eine Methode, bei der an bestimmten Punkten im Verlauf eines Prozesses Ergebnisse anhand vorab definierter Kriterien geprüft werden. In den meisten Fällen wird der Erfüllungsgrad anschaulich mit einem Ampelsystem visualisiert. Das Konzept kann auch als eine Hierarchie von Quality-Gates aufgebaut werden und findet in unterschiedlichen Bereichen wie der Informatik, Betriebswirtschaft oder Produktion Anwendung. (COOPER 2002, PFEIFER & SCHMITT 2014)

¹⁹ Z. B. eine Unterteilung in Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion nach FELDHUSEN & GROTE (2013).

merkmale zum Referenzprodukt resultieren. Bei einer Übernahmevariation bleiben dabei die Gestalt und das Lösungsprinzip bei einer Veränderung der Systemgrenze erhalten. Größere Änderungen erfolgen im Rahmen einer Prinzipvariation, bei der, im Gegensatz zur Gestaltvariation, das grundlegende Lösungsprinzip geändert wird.

Im Umfeld der Produktgenerationsentwicklung kommt auch der frühen Phase eine große Bedeutung zu, die nach ALBERS ET AL. (2017a) „mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die schließlich das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt“. Zur Unterstützung der frühen Projektphasen können die Differenzierungsmerkmale und -potenziale einer neuen Produktgeneration, z.B. in Form eines Innovationsportfolios, aufbereitet werden, um zielgerichtet Handlungsschwerpunkte für die nächste Entwicklung abzuleiten. Diese bilden die Ausgangsbasis für eine Einschätzung des technischen Risikos und dem folgend den Bedarf an weiterführenden Validierungen der neu generierten Teilsysteme. (ALBERS ET AL. 2017a; ALBERS ET AL. 2016b)

Beispiele für weitere Vorgehensmodelle und Entwicklungsleitfäden sind unter anderem in GAUSEMEIER (2008), ISERMANN (2008), SCHILLER (2010), EIGNER (2014) oder VDMA (2015) dargestellt. In der industriellen Praxis sind darüber hinaus Projektmanagementhandbücher, unternehmensspezifische Checklisten, Best-Practices oder Referenzmodelle als unterstützende Leitfäden für die Projektbearbeitung vorhanden. Des Weiteren werden zunehmend Vorgehensmodelle anderer Disziplinen für die Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme adaptiert. Vor allem Ansätze der agilen Entwicklung finden diesbezüglich immer mehr Anwendung. Ein repräsentatives Beispiel ist das Vorgehensmodell SCRUM, dessen agile Elemente auch auf den mechatronischen Entwicklungsprozess übertragen werden können (GLOGER 2011; KOMUS 2012; KLEIN & REINHART 2013; KLEIN 2016). Das Vorgehensmodell untergliedert den Entwicklungsprozess in kleinere Teilschritte, sogenannte Sprints, innerhalb derer lauffähige Produktinkremente konzeptioniert, realisiert und getestet werden. Die Basis bildet das Product-Backlog, das eine priorisierte Sammlung von Kundenanforderungen in User-Stories darstellt, die iterativ über den Entwicklungsprozess abgearbeitet werden. Weitere Informationen finden sich z. B. in BECK ET AL. (2001), PICHLER (2008), ROOCK & WOLF (2015) oder WINTERSTEIGER (2015). In Anlehnung dazu ist im Entstehungsprozess eines Produktionssystems ein Wandel innerhalb der digitalen mechatronischen Entwicklung zu beobachten. Im Vergleich zu sequenziellen Prozessen wird eine iterative und inkrementelle Entwicklung forciert, in der kontinuierlich abgeschlossene und funktionsfähige Systembestandteile

erstellt werden (KLEMM 2009; VERL ET AL. 2010; WÜNSCH 2011, 2012; WELGE ET AL. 2012; EIGNER 2014, S. 21–42; STETTER 2015).

3.2.2 Methoden zur Unterstützung des Systementwurfs

Am Anfang eines Systementwurfs steht die Analyse der Anforderungen (HAMMERS 2012; SCHIERBAUM ET AL. 2012). Dabei werden allgemein die Phasen Ermitteln, Analysieren, Spezifizieren und Validieren unterschieden (DAVIS 2005; SCHEDL 2009; GILZ 2014). Diese gehen in vielen Anwendungsfällen fließend ineinander über und werden im Verlauf eines Entwicklungsprojektes iterativ durchlaufen (RUPP 2007). Die Anforderungserhebung steht im Fokus der Arbeiten von POHL & RUPP (2015), die unterschiedliche Methoden von der rein textuellen bis hin zur modellbasierten Anforderungsdokumentation darstellen.

Zur Ermittlung der Systemanforderungen hat sich beispielsweise im Bereich der Montageplanung die Ableitung von Montagevorgangsgraphen auf der Basis von Produktinformationen etabliert (LIEBERMAN & WESLEY 1977; FAZIO & WHITNEY 1987; BOURJAULT 1988; WILSON & LATOMBE 1994; JONAS 2000). Dies wird als „Assembly-by-Disassembly“ bezeichnet (KAUFMAN ET AL. 1996). Das Grundprinzip ist dabei, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, die schrittweise Zerlegung eines Endproduktes in montierbare Einheiten bzw. Unterbaugruppen bis ausschließlich Einzelteile vorliegen (KAUFMAN ET AL. 1996). Das diesbezügliche Grundprinzip fokussiert jedoch nur den Bereich der Montagetechnik.

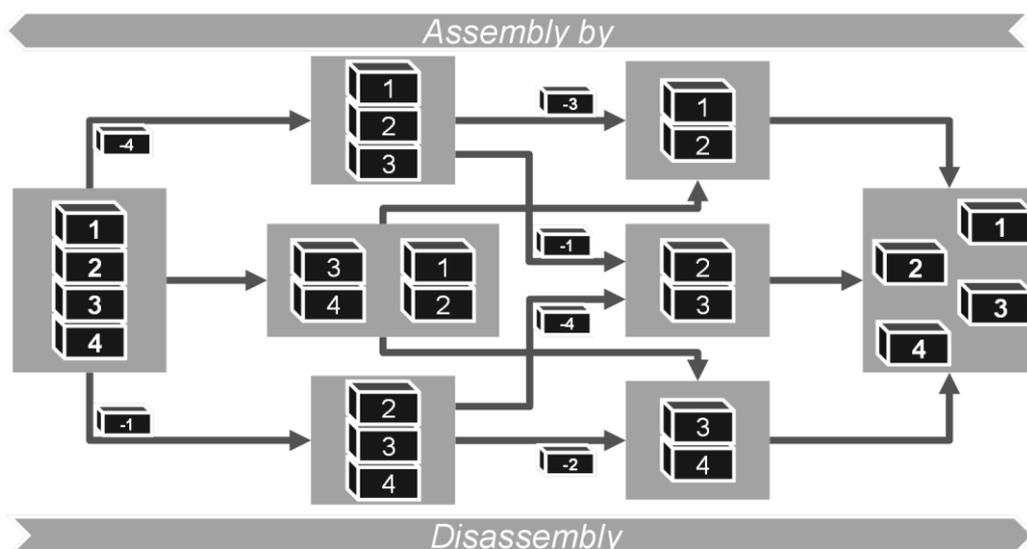


Abbildung 3.2: *Assembly by Disassembly und resultierender Zustandsgraph mit möglichen Routen am Beispiel eines Turms aus vier Blöcken (in Anlehnung an BÜSCHER ET AL. 2013, S. 589).*

Die Ergebnisse der Erhebung und der Analyse von Systemanforderungen werden in einer Anforderungsspezifikation festgehalten und anschließend bewertet (JUNG 2006; SCHEDL 2009; SCHIERBAUM ET AL. 2012; HACKENBERG ET AL. 2014; IEEE 830; IEEE 1998). Die gesammelten Anforderungen sind z. B. in Form eines Lastenheftes dokumentiert, aus dem das Pflichtenheft abgeleitet wird (VDI/VDE 3694). Nach VDMA (2000) können Lasten- und Pflichtenheft auch in einer Systemspezifikation zusammengefasst werden, die ebenfalls Lösungsvorschläge enthält. Ausgehend davon wird das Gesamtsystem strukturiert und Teilbereiche für die Entwicklung definiert.

Modellgestützte Verfahren zur Strukturierung des Systementwurfs basieren im Allgemeinen auf einer einheitlichen Beschreibung von Modellelementen, wie sie beispielsweise in SysML definiert sind (FRIEDENTHAL ET AL. 2014; ALBERS & ZINGEL 2013; ALBERS ET AL. 2015a). Die im Bereich des Softwareengineering entstandenen Ansätze (STAHL ET AL. 2012), finden mittlerweile auch bei der Entwicklung mechatronischer Systeme Einsatz (WEILKIENS 2011). Darüber hinaus wurden weitere spezifische Modellierungsmethoden entwickelt, wie Funktionsmodelle für die virtuelle Absicherung mechatronischer Systeme (BOTASCHANJAN ET AL. 2009; HUMMEL 2011; HENSEL 2011). HACKENBERG ET AL. (2014) greifen diese Ansätze auf und entwickeln sie mit dem Fokus eines mechatronischen Systems Engineering weiter. Zur Unterstützung des Systementwurfs definieren GAUSEMEIER ET AL. (2009) acht kohärente Partialmodelle, die das Zielsystem, das Umfeld, die Anwendungsszenarien, die Anforderungen, die Funktionen, die Wirkstruktur sowie die Gestalt und das Verhalten eines Systems abdecken. Die Synthese beginnt mit der Suche nach Lösungsmustern und hat ein modularisiertes Gesamtsystem zum Ziel, das in der Analyse bewertet und in eine Prinziplösung überführt wird (GAUSEMEIER ET AL. 2011, S. 10–12).

Ausgehend von ersten Systemmodellen und dem Trend der Modularisierung im Maschinen- und Anlagenbau folgend (LERCHE ET AL. 2004; WÜRSLIN & WASCHER 2008), ist die Erstellung der Anlagenmodelle über konfigurierbare Standardbausteine ein weiterer Ansatz, um mechatronische Entwicklungsprozesse zu verbessern (ZÄH ET AL. 2007). Dadurch verlagert sich der Aufwand von einer disziplinspezifischen Konstruktion hin zu einer Konfiguration (HAUSCHKE 2010), die eine schnelle Generierung eines Anlagenkonzepts ermöglicht, „(...) in das die Änderungswünsche des Kunden und des Anlagenbauers ohne Probleme eingearbeitet werden können“ (PIELOTH 2013, S. 2). Der aus vordefinierten Elementen erzielbare „(..) Entwicklungsstand wird häufig als ‘80%-Stand‘ bezeichnet“

(REINHART ET AL. 2009). Auch für spezielle Anwendungsfälle, wie beispielsweise in der Verarbeitungstechnik (TRÄNKNER 1968, S. 23–35), wurden ähnliche Ansätze definiert. MAJSCHAK (1996) stellt dafür ein rechnergestütztes Auswahlssystem vor. Dabei können auf Grundlage von modellierten Wissenskomponenten Verarbeitungsgüter und die zugehörigen Vorgangsoperationen spezifiziert und über definierte Regeln verarbeitungstechnischen Prinzipien und Lösungsmustern zugeordnet werden.

Der gesteigerte Automatisierungsgrad bei der Planung von Produktionssystemen impliziert die Integration von intelligenten Verfahren in die Planungsmethoden, wie beispielsweise eine Ontologie (SABOV & KRÜGER 2009; GAAG 2010), semantische (OESTERSÖTEBIER ET AL. 2012) oder regelbasierte Verfahren (FRANK 2011; GROß & RUDOLPH 2012), agenten- (KRIPPNER 2010) sowie aufgabenorientierte Ansätze (MICHNIEWICZ & REINHART 2014; BACKHAUS 2016).

3.2.3 Prinzipskizzen und automatische Skizzeninterpretation

Eine weitere Methode zur Unterstützung des Systementwurfs sind Prinzipskizzen. Diese dienen der schematischen Darstellung von Systemelementen und deren Eigenschaften (HESSE 2013). Zu deren Systematisierung wurden disziplinspezifische Skizzenelemente definiert, die ergänzend zu frei erstellbaren Skizzen standardisierte Wirkprinzipien repräsentieren. Eine Auswahl von exemplarischen Skizzenelementen unterschiedlicher Disziplinen findet sich in Abbildung 3.3.

Durch die Reduktion auf wesentliche Merkmale führt die Vereinfachung in einer Skizze im Entwurfsprozess dazu, dass die Definition von Lösungen nur auf einem höheren Abstraktionsgrad erfolgen kann. Skizzenelemente sind meist vor dem Hintergrund spezifischer Disziplinen und Einsatzzwecke entstanden. Dadurch lässt sich ein mechatronisches System gesamtheitlich nur durch die Kombination einzelner Partialmodelle darstellen. Für deren Gestaltung existieren unterschiedliche Notationen, was eine standardisierte Beschreibung in der frühen Phase erschwert.

Darüber hinaus erfolgt die Erstellung von Prinzipskizzen nicht in digitalen Systemen, da diese nicht den intuitiven Charakter einer Freihandskizze aufweisen (ALVARADO & RANDALL 2001; COOK & AGAH 2009). Daher entstehen nachgelagerte Aufwände, um die skizzierten Konzepte in ausführbare Modelle zu überführen. Aus diesem Grund wurden für Teilaspekte der Entwicklung Methoden für eine automatische Skizzeninterpretation entwickelt. Erste Ansätze zum digitalen Skizzieren für die Erstellung von Volumenkörpern sind z. B. in GRIMSTEAD &

MARTIN (1995) dargestellt. Hierbei sind jedoch auf die einzelnen Linien der zwei-dimensionalen Skizze Kennzeichnungsmerkmale anzubringen, die auf ihre relative Position im Raum rückschließen lassen. Verdeckte Linien und Flächen werden in einem nachgelagerten Schritt automatisch durch eine Auswertelogik rekonstruiert und die einzelnen Flächenelemente in einem B-REP-Modell zusammengeführt.

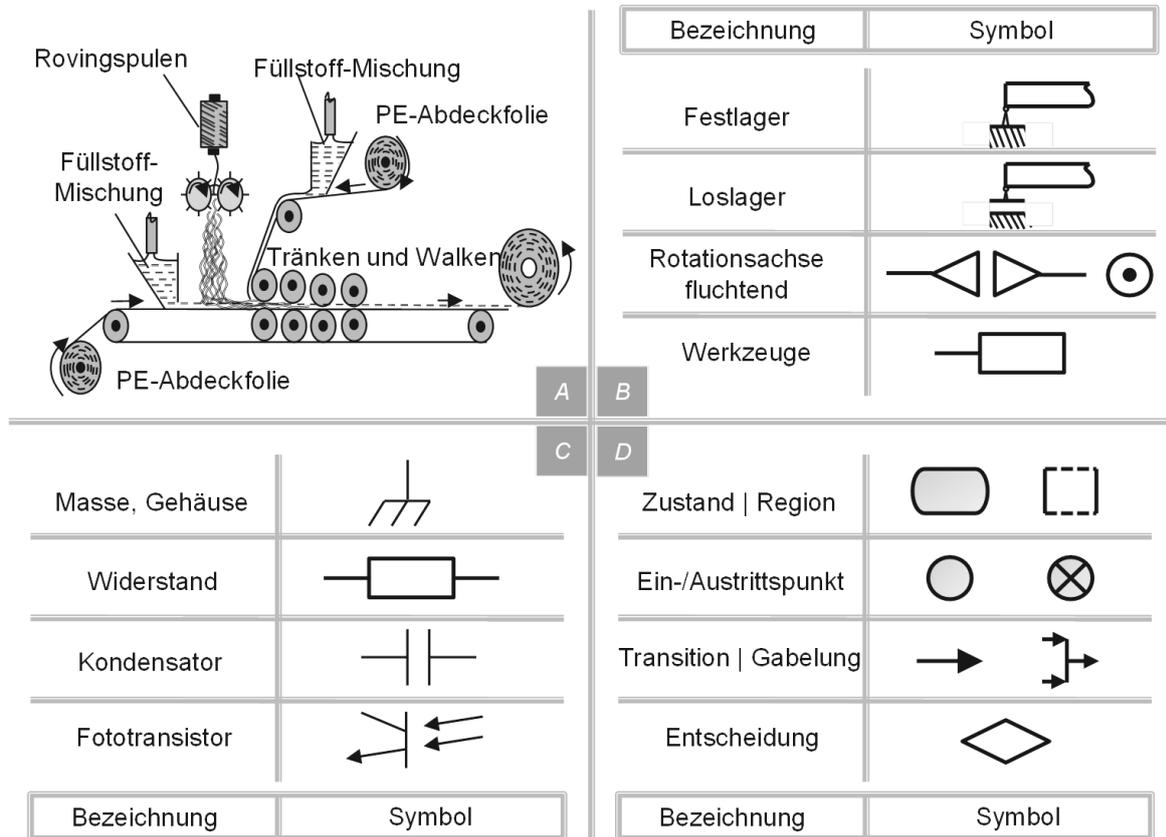


Abbildung 3.3: Exemplarische Prinzipskizze (A, HESSE 2013) sowie ausgewählte Skizzenelemente der Mechanik (B, MVM 2015), der Elektronik (C, IEC 60617) und Informationstechnik (D, MID 2015).

Für eine schnelle konzeptionelle Gestaltung von dreidimensionalen Körpern sind daraufhin mehrere Prototypen wie SKETCH (ZELEZNIK ET AL. 1996) oder TEDDY (IGARASHI ET AL. 1999) entstanden, mit denen sich einfache geometrische Modelle erstellen lassen. LEVET ET AL. (2006) stellen ein Verfahren vor, bei dem durch die Überlagerung einer skizzierten Profil- und Silhouettenkurve eine Vielzahl an Objekten erzeugt werden kann. Eine vergleichbare Methode definieren CHERLIN ET AL. (2005). Der Grundkörper wird skizziert und dieser über weitere Konstruktionslinien verfeinert. Diese können entweder bei der Erstellung der Körper oder im Editiermodus hinzugefügt werden und lehnen sich der klassischen Skizziertechnik an. Beispiele sind die Spiral-Methode für Volumenkörper, die Scribble-Methode für

Faltenwürfe oder die Bending-Methode, bei der ein Ausgangskörper gedanklich gebogen wird. MASRY ET AL. (2005) stellen ein Verfahren für die Freihandzeichnung von geometrischen Objekten in CAD-Systemen vor. Einen ähnlichen Ansatz, der bezüglich der Objektidentifikation auf einer Invertierung der Projektion basiert, beschreiben LIPSON & SHPITALNI (2007; vgl. auch YOON ET AL. 2010). Ausgehend von einer 2D-Skizze werden unterschiedliche räumliche Körper erzeugt, deren Projektion in den zweidimensionalen Raum mit dem skizzierten Objekt übereinstimmt. Aus dem generierten Lösungsraum kann im Anschluss über definierte Regeln der wahrscheinlichste Volumenkörper aus einer Datenbasis ausgewählt werden. Eine Übersicht und Bewertung von Verfahren zum intuitiven Skizzieren geometrischer Objekte und deren Anwendung findet sich z. B. in CHERLIN ET AL. (2005), YOON ET AL. (2010) oder JORGE & SAMAVATI (2011).

Die Interpretation von Skizzen kann nach OLSEN ET AL. (2009) unterschiedliche Hintergründe haben: die Generierung von 2D- bzw. 3D-Modellen, die Anreicherung von bestehenden Modellen oder deren Veränderung. Die große Herausforderung sind dabei die vielfältigen Interpretationsmöglichkeiten einer zweidimensionalen Skizze. Ausgehend von der Erfassung der skizzierten Elemente werden diese zunächst gefiltert und über Interpretationsalgorithmen ausgewertet. OLSEN ET AL. (2009) klassifizieren diese anhand der Kriterien Erstellungsmethode, Oberflächentyp, Bearbeitungsmöglichkeit und Benutzerschnittstelle. Die einzelnen Ansätze fokussieren neben der Modellbildung geometrischer Objekte auch die Unterstützung der mechanischen Konstruktion und sind teilweise schon in einzelnen Entwicklungsumgebungen wie CATIA-Sketch oder Google-Sketch-Up integriert.

Auch für andere Anwendungsgebiete existieren Verfahren zur Interpretation disziplinspezifischer Elemente aus einer Handskizze. Beispiele finden sich bei der Interpretation von Molekularstrukturen aus der Chemie (OUYANG & DAVIS 2011), elektrischen Schaltplänen (ALVARADO 2011), dem Rapid Prototyping von User Interfaces (COYETTE ET AL. 2007) oder Skizzen im Bereich der Architektur (YI-LUEN DO 2005). Jedoch ist die integrierte skizzenbasierte Modellierung von mechatronischen Systemen und speziell Verarbeitungssystemen in den verfügbaren Ansätzen nicht abgedeckt.

3.2.4 Entwicklungsumgebungen zum Systementwurf

Entwicklungsumgebungen zur Unterstützung von Entwurfsprozessen fokussieren die Gestaltung von Systemen auf einer grobgranularen Ebene und setzen teilweise

auf Simulationsmethoden auf, die im Zuge der folgenden Abschnitte 3.3 bis 3.5 weiter detailliert werden.

Die Modellierung mechatronischer Systeme wird nicht nur seitens der Maschinen- und Anlagenbauer fokussiert. Auch Komponenten- und Systemlieferanten bieten hierfür Standardbausteine an, die im Zuge des Systementwurfs kombiniert werden können. REINHART ET AL. (2009, S. 374) benennen die Softwarelösungen Eplan Engineering Center (EEC; Eplan Software & Services GmbH), Siemens Automation Designer (Siemens AG) und das Werkzeug COMOS (Innotec GmbH) als bekannteste Vertreter. Letztere wurden vollständig in die Systemlandschaft von Siemens PLM integriert und stellen neben weiteren Tools unterschiedliche Funktionen für den disziplinübergreifenden bzw. -spezifischen Entwurf bereit (HEUCHEMER 2012). Der Mechatronik-Concept-Designer umfasst Funktionen, die von der Anforderungsanalyse über die Konzeptionierung bis zur mechatronik-orientierten Systemabsicherung unterschiedliche Stufen der Entwicklung unterstützen (HEUCHEMER 2012).

Auch im Bereich des industriellen Designs, beispielsweise in der Automobilindustrie, werden bereits in der Konzeptphase vermehrt digitale Werkzeuge wie das Computer Aided Styling (CAS) oder das Computer Aided Industrial Design (CAID) verwendet. Diese wurden sukzessiv um interaktive Eingabemöglichkeiten erweitert, um die Kreativität der Designer zu unterstützen (BOCK 2000). Ein Beispiel einer diesbezüglichen Entwicklungsumgebung ist das CATIA Natural Sketch der Firma Dassault Systems, das ein intuitives digitales Zeichnen von Geometrieobjekten in 3D ermöglichen soll. Die Basis stellt eine sogenannte virtuelle Tonmodellierung dar, die eine einfache Gestaltung von 3D-Modellen mithilfe von Methoden der NURBS²⁰-Flächenmodellierung und der Direct Solid Modeling Technik ermöglicht (STACKPOLE 2011; HÖLTKEMEIER 2012). Für den Entwurf einfacher kinematischer Systeme ist der Einsatz der Software Working Model 2D der Firma Design Simulation Technologies Inc. möglich. Damit können auf Basis einfacher zweidimensionaler Prinzipskizzen über vordefinierte Modellelemente animierte Modelle von kinematischen Ketten aufgebaut werden, die eine rudimentäre Abschätzung von Konzepten ermöglichen.

Jedoch liegt der Fokus der Entwicklungsumgebungen immer noch auf den mechanischen Anteilen eines Systems. Die einfache Gestaltung weiterer Anteile

²⁰ Nonuniforme rationale B-Splines (NURBS) sind als Verallgemeinerungen von nicht-rationalen B-Splines im Bereich der computergestützten Konstruktion (CAD) und Fertigung (CAM) Teil zahlreicher Industriestandards für die Darstellung von Kurven und Flächen. (SCHIELE 2012, S. 48–50)

eines mechatronischen Systems sowie dessen übergreifende Absicherung sind nur eingeschränkt möglich.

3.2.5 Fazit

Die gestiegene Komplexität produktionstechnischer Systeme erfordert vor dem Hintergrund einer Zunahme funktionsbestimmender mechatronischer Einheiten eine Orchestrierung unterschiedlicher Ansätze aus den beteiligten Fachdisziplinen. In den letzten Jahren sind viele methodische Ansätze zur Systematisierung und Unterstützung des Systementwurfs entstanden, die jedoch gerade in frühen Phasen die geforderte Agilität der Entwicklung nur eingeschränkt unterstützen. In der industriellen Praxis besteht, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, noch immer eine Diskrepanz zwischen einer theoretischen Lösung und deren Umsetzung. Dies spiegelt sich in der Erstellung von Konzepten wider, die sich in der späteren Detaillierung als nicht umsetzbar herausstellen. Dies führt zu aufwändigen Rücksprüngen in der Entwicklung und Mehraufwänden im Zuge der Realisierung.

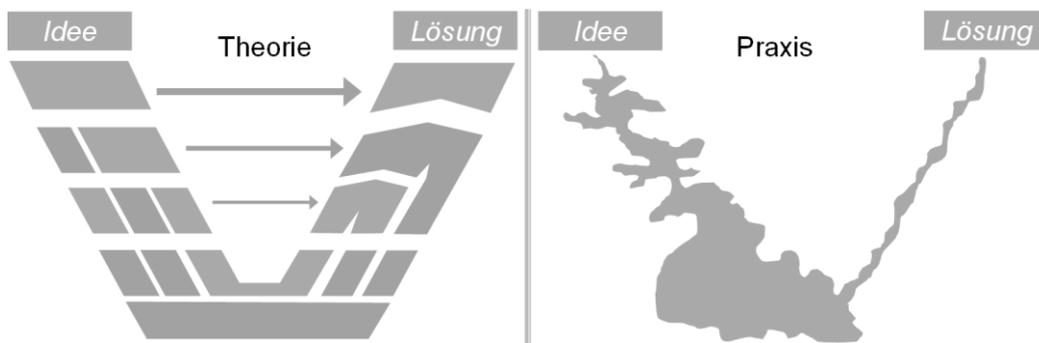


Abbildung 3.4: *Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis in interdisziplinären Entwicklungsprojekten (BENDER 2005; STETTER 2010).*

Vorhandene Ansätze eines modellgestützten Entwurfsprozesses bilden als Hilfsmittel zur Systematisierung der Entwicklungsprozesse nur eine statische Sicht auf die Wechselwirkungen der Systeme. Die Ergebnisse erster Entwicklungsschritte, die beispielsweise als Skizzen auf einem Flip-Chart festgehalten sind, müssen digitalisiert und aufbereitet werden, ehe sie bewertet und für weitere Absprachen genutzt werden können. Dies ist nur für einzelne Bestandteile einer Skizze automatisiert möglich. Zudem mangelt es an Methoden und Werkzeugen, um die Kundenanforderungen in einem kreativ-synthetischen Prozess effizient in neue Funktionsmodule umzusetzen. Für die Eigenschaftsabsicherung in späten Phasen wurden hingegen bereits vielfältige Ansätze entwickelt, die nachfolgend dargestellt werden.

3.3 Simulationsgestützte mechatronische Entwicklungsprozesse

3.3.1 Phasen- und disziplinspezifischer Einsatz der Simulation

Die frühzeitige Analyse von Wechselwirkungen in technischen Systemen und die Funktionsabsicherung werden immer bedeutender (BERTSCHE ET AL. 2009). Vor diesem Hintergrund kommt in Teilbereichen der Produktionstechnik bereits seit längerem die Simulation zum Einsatz (NOCHE & WENZEL 1991; REINHART & FELDMANN 1997; KUHN & RABE 1998). Neben der Verfahrenstechnik (ASTRATH 2012) nimmt hierbei die Automobilindustrie eine Vorreiterrolle ein (BÄR ET AL. 2010; SCHENK 2011). Entlang des Entwicklungsprozesses kommen im Rahmen der Digitalen Fabrik verschiedene Simulationsverfahren zum Einsatz (BRECHER 2006; KÜHN 2006; BRACHT ET AL. 2011; VDI 3633-Blatt 8; VDI 4499-Blatt 1; VDI 4499-Blatt 2), die sich gemäß der Granularität ihres Betrachtungsraums klassifizieren lassen (DIERßEN 2002, S. 61). In Anlehnung an die Automatisierungspyramide nach *DIN EN 62264 - Teil 3* nimmt der Detaillierungsgrad der Simulation, ausgehend von einer ereignisorientierten und fabrikübergreifenden Simulation (BANGSOW 2008; VÖLKER & SCHMIDT 2010; BRACHT & SCHLANGE 2010; ELEY 2012), über die verhaltensorientierten Ansätze der unterlagerten Fertigungslinien bzw. -zellen (KIEFER 2007; EHRENSTRABER 2010) bis hin zu der Geometrie- und Prozesssimulation (KÜHN 2006; HEHENBERGER 2011, S. 159–177), sukzessive zu. Je nach Abstraktionsebene verfolgen die eingesetzten Simulationsmethoden einen unterschiedlichen Planungsinhalt, wie er in Abbildung 3.5 exemplarisch dargestellt ist.

LENORD (2007) gliedert die Simulationsarten nach deren Einsatzzweck im Entwicklungsprozess sowie den Kategorien ereignis-, verhaltens- und geometrieorientiert. Ausgehend von einer betriebswirtschaftlichen Simulation auf Unternehmensebene definiert DIERßEN (2002, S. 59–66) den Simulationseinsatz auf Fabrik- und Werkstattebene als Planungsinhalt der Produktion und Logistik. Auf den unterlagerten Ebenen kommt hingegen eine technische Simulation zum Einsatz, die einzelne Maschinenkomponenten wie Positionierachsen fokussiert. Weitere Ansätze, speziell zur Planung automatisierter Fertigungssysteme, sind zum Beispiel in BRACHT & BERGBAUER (2003), ZÄH & REINHART (2004b), KÜHN (2006), SCHACK (2008), BRACHT ET AL. (2011), SCHENK (2011), MANTWILL (2012), SCHENK (2012) oder MANTWILL (2014) zusammengefasst.

Eine wirtschaftliche und zielgerichtete Simulation ist nur durch eine Abstraktion des Betrachtungsraumes möglich (BRECHER & LOHSE 2009). Zudem stellen die Synchronisation der kontextspezifischen Simulationsansätze und der Ergebnis-

transfer weiterhin eine große Herausforderung innerhalb des Entwicklungsprozesses dar. Die große Anzahl und Verschiedenartigkeit der Simulationenethoden und der zugehörigen Werkzeuge führt heute dazu, dass auf den in Abbildung 3.5 dargestellten Ebenen Insellösungen eingesetzt werden (SCHENK 2009). Daraus resultieren hohe Aufwände für die problemspezifische Modellierung und eine eingeschränkte Durchgängigkeit sowie Konsistenz der Daten (JENSEN 2007; MAYER 2008; STRAßBURGER ET AL. 2010).

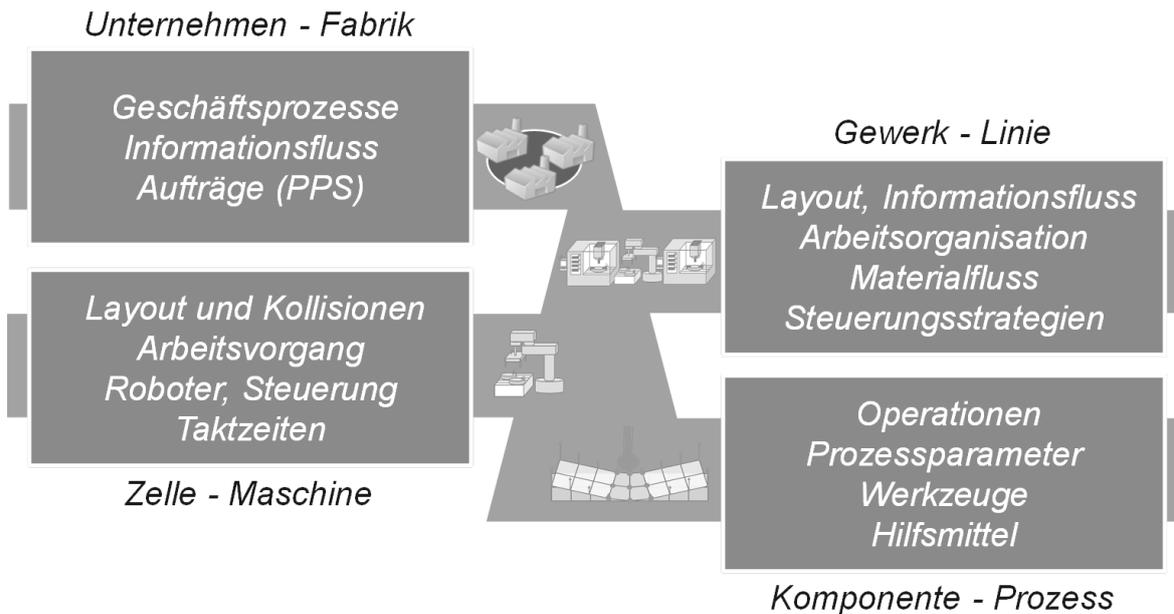


Abbildung 3.5: Planungsinhalte von Simulationenethoden in unterschiedlichen Stufen der Automatisierungspyramide²¹ (eigene Darstellung der in KÜHN 2006; KIEFER 2007, S. 37; LENORD 2007; SCHACK 2008; BRECHER & LOHSE 2009; BRACHT ET AL. 2011; BAUERNHANSL 2014a; VDI 3633-Blatt 4; VDI 4499-Blatt 2 wiedergegebenen Daten).

Trotz der Erkenntnisse bezüglich des erzielbaren Nutzens verzichten viele Unternehmen auf den Einsatz der Simulation, da neben den klassischen Akzeptanzproblemen, dem Einarbeitungsaufwand, der Komplexität der Verfahren oder der aufwändigen Datenbeschaffung insbesondere die Quantifizierung des Nutzens für eine konkrete Anwendung nur schwer bzw. häufig erst nach Jahren möglich ist (KÜHN & RABE 1998, S. I). Darüber hinaus ist die horizontale und vertikale Vernetzung von Simulationenethoden notwendig, um phasen- und disziplinübergreifende Erkenntnisse zu generieren. Nach KIEFER (2007, S. 37; vgl. auch KÜHN 2006, S. 16) können die Ausgangsdaten einer Simulationenethode die Basis für

²¹ In Anlehnung an (DIN EN 62264 - Teil 3).

eine Simulation auf einer höheren Abstraktionsstufe darstellen. Beispielsweise können für eine Geschäftsprozesssimulation Durchlaufzeiten aus einer Ablaufsimulation auf Bereichs- bzw. Linienebene genutzt werden. Aber auch auf Ebene der Geometriesimulation kann eine Mehrkörpersimulation (MKS) durch eine Berechnung der Bauteilverformung mittels einer Finite Elemente Simulation (FEM) detailliert werden, wie es unter anderem im Simulationstool Recurdyn der Firma FunktionBay möglich ist. Ähnliche Ansätze verfolgen DISTEL ET AL. (2012), die physikbasierte Modelle der Computergrafik mit einer FEM-Simulation verknüpfen. Zudem existieren Ansätze einer horizontalen Kopplung einzelner Simulationsmodelle über die Grenzen einer Disziplin hinweg (KÜHN 2006, S. 16). Diese Ansätze, die eine mechatronikorientierte Absicherung von Produktionssystemen auf Anlagen- und Steuerungsebene fokussieren, werden im nächsten Abschnitt näher dargestellt.

3.3.2 Mechatronikorientierte Ansätze in der Simulationstechnik

Die simulationsgestützte Entwicklung findet auch verstärkt in der Steuerungstechnik Einsatz. Dazu wurden etablierte Simulationsansätze um elektro- und informationstechnische Aspekte zur maschinennahen Simulation erweitert (VDI 3633-Blatt 8). In diesem Zuge wurden die Verfahren der sogenannten Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) entwickelt, um den Steuerungstest in den späteren Projektphasen und damit die Inbetriebnahme sowie den Hochlauf eines mechatronischen Produktionssystems zu unterstützen (VDI 4499-Blatt 1; SPATH & LANDWEHR 2000; FEDROWITZ 2004; GRÄTZ 2006; BERGERT ET AL. 2009). LACOUR (2012, S. 42) fasst unterschiedliche Ansätze und Definitionen zusammen und beschreibt die Virtuelle Inbetriebnahme in der Produktionstechnik als „(...) die Validierung der Steuerungslogik einer Produktionsanlage. Die Produktionsanlage kann sowohl real gefertigt als auch digital modelliert sein. Die Steuerungslogik ist dabei in dem einzusetzenden Steuerungssystem implementiert, sie kann aber auch virtuell abgebildet sein“. Dabei wird über eine Kopplung der realen bzw. simulierten oder emulierten Steuerung²² mit einem Modell der Anlage der abschließende Steuerungstest virtuell vorweggenommen (ZÄH ET AL. 2004c; WÜNSCH & ZÄH 2005; KIEFER 2007, S. 42; WÜNSCH 2008, S. 33; BERGERT ET AL. 2009; FEDROWITZ ET AL. 2010). Ausgehend vom Bereich der Werkzeugmaschinen (BAUDISCH 2003; ZÄH ET AL. 2004d; ZÄH ET

²² Eine Softwaresimulation bezeichnet die softwaretechnische Nachbildung der Steuerung. Im Gegensatz dazu ist die Emulation eine Portierung des identischen Codes der Steuerung auf eine andere Hardware. Damit sind die internen Abläufe identisch zur originalen Hardware, können jedoch zeitlich skaliert werden. (DIERBEN 2002, S. 57–58)

AL. 2004a; PRITSCHOW ET AL. 2005; RÖCK 2007; WABNER ET AL. 2014) wurden diese simulationsgestützten Ansätze auch auf weitere Anwendungsfelder, wie Montagesysteme (ZÄH ET AL. 2004b; KUFNER 2012), Verpackungsmaschinen (STETTER 2006a; WEIß ET AL. 2011; MAJSCHAK 2015) und Produktionsanlagen im Allgemeinen (KIEFER 2007; WÜNSCH 2008; KÖVARI 2011), ausgeweitet.

Durch eine frühzeitige Eigenschaftsabsicherung an mechatronischen Anlagenmodellen lassen sich erhebliche Einsparpotenziale innerhalb der Entwicklung und Inbetriebnahme sowie eine Qualitätssteigerung der Automatisierungssysteme erzielen (BISCHOFF & KAZI 2004; REINHART & WÜNSCH 2006; ZÄH ET AL. 2006a; WEGENER 2009). Die „(...) digitale Absicherung realer Steuerungsprogramme und anderer produktionsnaher IT-Systeme ohne Vorhandensein der realen Fertigungssysteme“ (KIEFER 2007, S. 42) kann den Anwender frühzeitig bei der Identifikation und Behebung konstruktiver Mängel der Produktionsanlage oder Fehler in der Steuerungslogik unterstützen und dadurch Inbetriebnahmezeiten um bis zu 75 Prozent reduzieren (ZÄH ET AL. 2006a, 2006b). Die VIBN dient darüber hinaus nach KIEFER (2007, S. 42) nicht nur dem Steuerungstest sondern vielmehr auch „(...) der frühzeitigen Beurteilung und Optimierung des gesamten Anlagenverhaltens unter Verwendung digitaler Produkt- und Ressourcen- sowie realer Prozessdaten (Steuerungsdaten)“. Ein weiterer Nutzen lässt sich aus der Wiederverwendung der Simulationsmodelle für die Optimierung der Anlage oder der Schulung von Bedienern gewinnen (DIERBEN 2002, S. 5; POTTMANN & ENGL 2010; TIMMER & LAUSCHER 2010; KAIN 2011; REINHART ET AL. 2011a; SCHREIBER & ZIMMERMANN 2012; PIELOTH 2013, S. 2). Jedoch wird eine ausgereifte Datenbasis benötigt, um die Realität ausreichend genau abzubilden (HOFFMANN ET AL. 2010).

Die virtuelle Anlage kann, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, als die Verknüpfung der Steuerung, der verhaltens- und geometriebasierten Komponentensimulation sowie der Visualisierung der Ergebnisse interpretiert werden (DIERBEN 2002). Diese stellen nach ZÄH & WÜNSCH (2005, S. 699) ein mechatronisches Modell „(...) der mechanischen, hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Bestandteile einer Maschine“ dar. Neben den steuerungstechnischen Anteilen seitens der Roboter- und SPS-Programmierung sowie dem zugehörigen HMI umfasst ein Simulationsmodell zur Virtuellen Inbetriebnahme sogenannte Verhaltensmodelle. Diese bilden die hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Bestandteile und somit die Aktorik eines mechatronischen Systems ab. Für die Sensorik werden zum einen ebenfalls Verhaltensmodelle definiert, wenn der Wirkbereich des physikalischen Sensorprinzips für die Simulation von Bedeutung ist. Andererseits kommen logische

Ersatzmodelle zum Einsatz, die auf den Ergebnissen des Geometrie- oder Verhaltensmodells basieren.

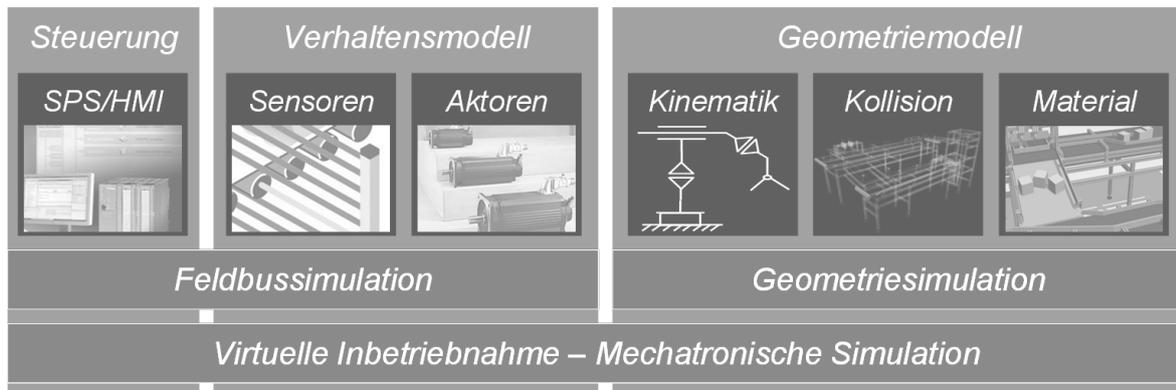


Abbildung 3.6: Bestandteile einer Virtuellen Inbetriebnahme²³ (eigene Darstellung der in DIERßEN 2002, S. 9; WISCHNEWSKI 2007/2008; KIEFER 2007, S. 43; WÜNSCH 2008; BERGERT ET AL. 2009; EHRENSTRÄßER 2010, S. 24; LACOUR 2012, S. 45; BÄR & DAMRATH 2014; VDI 3633-Blatt 8 wiedergegebenen Daten).

Ein Teilaspekt der VIBN ist die Feldbussimulation, in der die korrekte Zuordnung des Ein-/Ausgangsverhalten der Steuerung auf Sensor-Aktor-Ebene überprüft wird (BERGERT ET AL. 2009). Für die Geometriesimulation wird ausgehend von den Layoutdaten sowie den CAD-Daten der einzelnen Betriebsmittel ein virtuelles Abbild des Systems erzeugt. Zudem können Kinematik- und Kollisionsmodelle abgeleitet werden, die das dynamische Anlagenverhalten berechnen und in einer Visualisierung aufbereiten. In bestimmten Fällen werden gesonderte Modelle hinterlegt, die bei materialflussintensiven Anlagen den Weg des Produktes durch die Anlage, z. B. Werkstückträger auf einem Förderband, skriptbasiert²⁴ definieren.

Die unterschiedliche Ausprägung der einzelnen Partialmodelle ermöglicht eine Klassifizierung unterschiedlicher VIBN-Ansätze. Eine Variante ist die Software-in-the-Loop Simulation (SiL), die BENDER (2005) als eine Evaluationsmethode definiert, bei der sowohl die Steuerungssoftware als auch das digitale Modell des technischen Systems auf einem Computer laufen. Eine Vorstufe der SiL ist die Model-in-the-Loop Simulation (MiL). Hierbei existiert noch keine lauffähige SPS-Software. Vielmehr wird ein abstraktes Modell der Steuerungslogik im Simulationsverbund geprüft. Innerhalb der industriellen Praxis hat sich für die VIBN die Hard-

²³ Bildquelle: Steuerung: Siemens, Aktoren: SEW Eurodrive.

²⁴ Hierbei wird der Materialfluss in das Modell programmiert. Dies ermöglicht eine umfassendere Simulationsstudie, ist jedoch hinsichtlich der Flexibilität der abbildbaren Szenarien beschränkt und erfordert großen, meist manuellen, Aufwand bei der Änderung und Pflege der Materialflussmodelle.

ware-in-the-Loop Simulation (HiL) etabliert, bei der die reale Steuerungshardware eingesetzt wird (STETTER 2006b; RÖHSE & SCHÖLZKE 2009; WEGENER 2009; KIEFER ET AL. 2009; EHRENSTRAßER 2010, S. 24; REINHART ET AL. 2011b). Im Vergleich zu anderen Ansätzen kann das getestete Steuerungssystem im Anschluss direkt mit dem realen Produktionssystem verbunden werden (SPITZWEG 2009, S. 19). DOMINKA (2007) definiert den Übergang von der VIBN zur realen Inbetriebnahme als hybride Inbetriebnahme. Hierbei wird die digitale Repräsentation des technischen Systems sukzessive durch reale Module der Maschine ersetzt und das System somit inkrementell in Betrieb genommen. Weiterführende Detaillierungen zur Virtuellen Inbetriebnahme produktionstechnischer Systeme und deren Unterkategorien finden sich unter anderem in ZÄH & REINHART (2006), DOMINKA (2007), KIEFER (2007, S. 41–44), ROßMANN & WISCHNEWSKI (2007), WÜNSCH (2008), BERGERT ET AL. (2009), KLEMM (2009), SPITZWEG (2009, S. 17–22), LINDWORSKY (2011, S. 39–46), REINHART & ZÄH (2011), LACOUR (2012, S. 40–48) oder SCHREIBER & ZIMMERMANN (2012).

Vor dem Hintergrund eines steigenden Softwareanteils innerhalb des Maschinen- und Anlagenbaus (Mensch & Mechatronik 2015) werden steuerungsbezogene Absicherungsmethoden der VIBN durch die Verwendung skalierbarer Simulationsmodelle auf den gesamten Entwicklungsprozess ausgeweitet (KIEFER & BERGHOLZ 2006; KIEFER 2007; REINHART & WÜNSCH 2007). Die mechatronische Simulation zielt nach BRADE (2000) darauf ab, neben den steuerungsorientierten Aspekten auch spezifische Eigenschaften von Betriebsmitteln zu berücksichtigen. „Kritische Maschinenbestandteile können somit detailgetreu simuliert und auf ihre Funktionalität überprüft werden“ (DIERßEN 2002, S. 68). Auch im Betrieb eines Produktionssystems kann mittels einer betriebsparallelen Simulation, bei der die Prozessüberwachung z. B. über virtuelle Sensoren ergänzt wird, eine weitere Absicherung von kritischen Prozessbereichen erfolgen (KAIN 2011). Durch die digitale Absicherung ist es zudem möglich, produktionsbedingte Änderungen der Betriebsmittel ohne einen Eingriff in den laufenden Anlagenbetrieb abzusichern und so Standzeiten der Produktionsanlagen zu minimieren (WEYRICH & STEDEN 2011).

Für den Übergang von der VIBN zur entwicklungsübergreifenden mechatronischen Simulation stellt SCHÄFER (2010) ein Stufenkonzept vor. Die Phasen im Bereich der Entwicklung des Produktionssystems umfassen dabei das Pre-, Konzept-, Detail- und Realisierungs-Engineering. Die VIBN wird aus bestehenden digitalen Anlagenmodellen abgeleitet, die auf einem mechatronischen Baukasten basieren (SCHÄFER 2010a). Weitere Ansätze zur Skalierung der mechatronikorientierten Simulationsmethoden finden sich in KÖVARI (2011).

3.3.3 Funktionsorientierung und Modularisierung der Modellbildung

Die in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen mechatronischen Einheiten können um simulationsspezifische Inhalte ergänzt und somit für den Aufbau von Simulationsmodellen genutzt werden. Hierbei werden die Steuerungs-, Verhaltens- und Geometriemodelle in die bestehende Datenbasis integriert. Eine Spezifikation von notwendigen Simulationsdaten ist beispielsweise in KADACHI (2004, S. 59–74), KÜHN (2006, S. 87) sowie VDI 3633-Blatt 1 und VDI 3633-Blatt 8 dargestellt. Derartig zusammengefasste Entwicklungsartefakte können nach EIGNER ET AL. (2012b; siehe auch WEGMANN 2010) in Bibliotheken verwaltet und als Bausteine für standardisierte Funktionalitäten im Rahmen einer mechatronikorientierten Entwicklung für den Anwendungsfall instanziiert werden. Die merkmalsbezogene und standardisierte Beschreibung mechatronischer Einheiten ermöglicht eine integrierte Modellierung und Nutzung mechatronischer Systeme im Engineering von Fertigungssystemen (PRINZ ET AL. 2011; HUNDT ET AL. 2011). „(...) die virtuelle Maschine einer geplanten Anlage lässt sich aus diesen Bausteinen zusammensetzen; dies kann sogar bis zu einem gewissen Grad automatisiert werden, was die Entwicklungszeiten verkürzt“ (PIELOTH 2013, S. 2). Dabei wird das verwendete Simulationsmodell anhand der gegebenen Funktionsstruktur aus einer mechatronischen Ressourcenbibliothek zusammengesetzt (ZÄH ET AL. 2004e; KIEFER 2007; EHRENSTRABER 2010; WEGMANN 2010; HENSEL 2011).

Die Modelldaten müssen für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. DIERBEN (2002, S. 38–39) beschreibt hierfür mit dem Fokus der Geometriemodelle ein stufenweises Vorgehen, das eine Feature-Suppression, einen Objekt-Filter, eine Modifikation der Bauteil-Struktur sowie Aspekte der Datenkonvertierung umfasst. LINDWORSKY (2011) nimmt eine Aufteilung in ein Funktions- und ein technisches Ressourcenmodell vor. Ersteres wird in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses definiert. Durch die Allokation von Ressourcen, wie z. B. Aktoren oder Sensoren, zu den spezifischen Funktionen werden die Entwicklungsdokumente (z. B. CAD-, E-CAD- Modelle) der spezifizierten Anlage zusammengestellt und ein Bezug zur Konstruktionsebene hergestellt. Der disziplinübergreifende Entwurf sowie die simulative Bewertung von Lösungsansätzen und die konsistente Verwaltung von diesbezüglichen Entwicklungsdaten unterschiedlicher Disziplinen standen zudem im Fokus der Arbeiten von BOTASCHANJAN ET AL. (2009), ZÄH ET AL. (2009), BOTASCHANJAN ET AL. (2010), HUMMEL (2011) und HENSEL (2011).

KIEFER ET AL. (2009, vgl. auch BERGERT ET AL. 2010b, 2010a) beschreiben am Beispiel des Karosseriebaus die Verhaltensmodellierung mechatronischer Betriebs-

mittel. Die Basis bildet eine standardisierte Beschreibung der Systembestandteile, aus der z. B. im System WinMod automatisch Verhaltensmodelle aus einem Baukasten zusammengestellt und problemspezifisch parametrisiert werden. Die Instanziierung von Simulationsmodellen analog zum Gestaltungsprinzip der Objektorientierung ist auch im Fokus von FRITZSON (2004) und MORIZ ET AL. (2011), die eine Umsetzung mit den Standards Modelica bzw. AutomationML beschreiben.

Weitere Konzepte zum (teil-)automatischen Modellaufbau und zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen finden sich beispielsweise in XU (2003), BAUDISCH ET AL. (2007), JENSEN (2007), BÖHME ET AL. (2009), VERL & HAUBELT (2009), FOLLMER ET AL. (2011), VERL ET AL. (2010), KUFNER (2012), VOß (2012) oder STERN (2012).

3.3.4 Einsatzbedingungen in der industriellen Praxis

Die mechatronikorientierte Simulation und vor allem die Virtuelle Inbetriebnahme haben das Forschungsstadium überschritten und finden bereits vielfältig bei der Entwicklung von Produktionssystemen Einsatz (APPEL 2006; KIEFER & BERGHOLZ 2006; LUTZ 2006; RÖHSE & SCHÖLZKE 2009; BERGERT ET AL. 2009; KIEFER 2011; SCHOCH 2011; STETTER 2011; RUSINA ET AL. 2012; PIELOTH 2013; BÄR & DAMRATH 2014; SCHÄFER & NAU 2014). Je nach Anwendungsfall kommen hierfür unterschiedliche Simulationssysteme zum Einsatz. Im Bereich der Absicherung automatisierter Anlagen des Automobilbaus wird oftmals eine Kombination der Software WinMOD (Fa. Mewes&Partner) und der RF:Suite²⁵ (Fa. EKS InTec) für die Verhaltens- und Peripheriesimulation bzw. die Kinematik- und Robotersimulation genutzt. Einen ähnlichen Funktionsumfang bieten die Systeme Delmia Automation der Fa. Dassault Systems und Process Simulate Commissioning der Fa. Siemens PLM. Ergänzend zur VIBN bietet Siemens PLM auch Möglichkeiten einer frühzeitigen Absicherung mechatronischer Systeme mit Hilfe des Mechatronik-Concept-Designers (MCD, HEUCHEMER 2012). Als Bestandteil des Konstruktions-tools Siemens NX bietet der MCD den Vorteil einer erhöhten Datendurchgängigkeit im Konstruktionsprozess. Der daraus resultierende starke Bezug zur mechanischen Entwicklung hindert jedoch den Einsatz als umfängliche disziplinübergreifende Kommunikations- und Entwicklungsplattform.

Während die VIBN in vielen Entwicklungsprojekten der Anlagenplanung der Automobilindustrie bereits Standard ist (DRESCHER ET AL. 2013; BÄR & DAMRATH

²⁵ Ehemals INVISION der Fa. Rücker EKS GmbH.

2014), setzen im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau nur ca. 50 Prozent der Firmen diesbezügliche Methoden und Werkzeuge ein (LINKE 2011). Neben dem System WinMOD kommen hierfür vor allem die VIBN-Werkzeuge Simit der Fa. Siemens, TrySim der Fa. Cephalos und Virtuos der Fa. ISG sowie weitere spezialisierte Systeme zum Einsatz (LINKE 2011). Dabei wird meist eine abstrahierte Repräsentation als Grundlage für eine Simulationsstudie genutzt, die nur die Kernprozesse der fokussierten Anlage abbildet. Dies erfolgt zum einen, um den Aufwand zur Modellierung gering zu halten. Zum anderen hat eine detaillierte Simulation in unterschiedlichen Phasen nur einen begrenzten Mehrwert bezüglich der Aussagekraft der Simulation. Vor allem bei einer makroskopischen Simulation, in der das Zusammenspiel der einzelnen Systembestandteile aus Mechanik, Elektrik und Software im Vordergrund steht, ist oftmals nur die Betrachtung der Kernfunktionalitäten relevant. Anlagendetails, wie Stütz- und Hüllsysteme, Schrauben etc. können in der Simulation ausgeblendet werden, sofern sie nicht für den betrachteten Produktionsprozess relevant sind.

Neben den Investitionskosten und den teils noch hohen Modellierungsaufwänden hindern auch das notwendige Expertenwissen sowie Rahmenbedingungen in den Unternehmen einen flächendeckenden Einsatz der mechatronischen Simulation. „Praktische Erfahrungen aus Pilotprojekten belegen, dass eine virtuelle Inbetriebnahme nur wirksam eingesetzt werden kann, wenn gewisse Voraussetzungen gegeben sind“ (WÜNSCH 2008, S. 69; vgl. auch APPEL 2006; ZÜLCH & STOCK 2010). Eine Kenngröße ist der mechatronische Reifegrad eines Unternehmens, der das Fähigkeitslevel einer Organisation hinsichtlich bestimmter Methoden repräsentiert (RICHTER 2013; BALAZOVA 2005; RAUCHENBERGER 2010). Ein fortgeschrittener mechatronischer Reifegrad ist nach SPIEGELBERGER (2011, S. 76) durch definierte Prozesse gekennzeichnet, die gelebt und weiterentwickelt werden sowie eine systematische, toolgestützte Abstimmung aller Disziplinen ermöglichen. Diese Charakteristika müssen auch erfüllt sein, um die Potenziale einer mechatronischen Simulation optimal nutzen zu können. Analog zu mechatronischen Reifegradmodellen sind in den Normen VDI/VDE 3695-Blatt 1, VDI/VDE 3695-Blatt 2, VDI/VDE 3695-Blatt 3, VDI/VDE 3695-Blatt 4 und VDI/VDE 3695-Blatt 5 Zielzustände einer repräsentativen Anlagenentwicklung sowie zugehörige Voraussetzungen dargestellt. Diese beziehen sich auf Prozesse, Methoden, unterstützende Hilfsmittel und Aufbauorganisation. WÜNSCH (2008, S. 69–78) definiert Anforderungen für die Einführung einer VIBN und zugehörige Meilensteine. Dabei sind der Erfahrungsrückfluss aus der realen Inbetriebnahme, die Konsistenz und Vollständigkeit digitaler Daten, die Dokumentgenerierung sowie mechatronische

Standards und Konstruktionsrichtlinien Erfolgsfaktoren für eine Integration in den Entwicklungsprozess. Die Prozessintegration einer Maschinensimulation ist beispielsweise auch ein Teilaspekt der Arbeiten von KÜHN (2006, S. 185–202), KIEFER (2007) oder WEYRICH & STEDEN (2011).

3.3.5 Fazit

Die integrierte digitale Eigenschaftsabsicherung produktionstechnischer Systeme, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, gewinnt innerhalb der Entwicklungsprozesse des Maschinen- und Anlagenbaus zunehmend an Bedeutung.

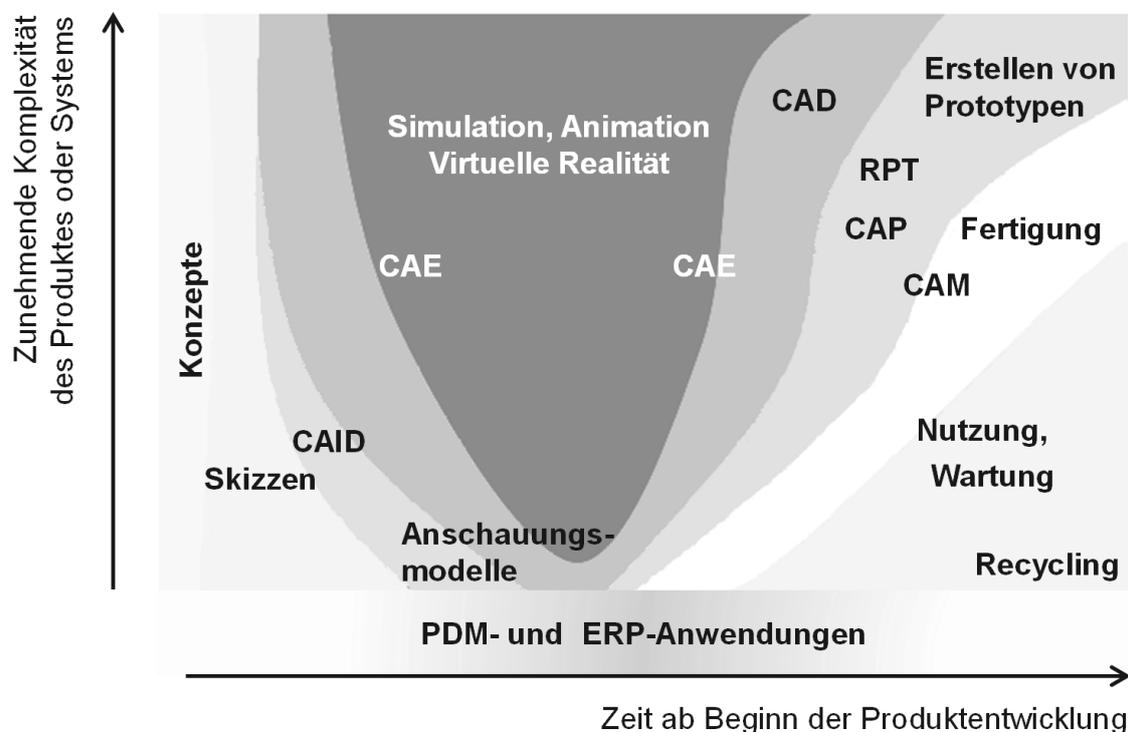


Abbildung 3.7: *Problemspezifischer Einsatz computergestützter Verfahren²⁶ im Verlauf des Entwicklungsprozesses (in Anlehnung an OTTOSSON 2004; zitiert nach VAJNA ET AL. 2009, S. 15; vgl. auch SCHACK 2008, S. 25).*

Dennoch stehen den vorliegenden Einsatzpotenzialen noch immer methodische und technische Herausforderungen gegenüber, die einen entwicklungsübergreifenden Einsatz verhindern. In einem iterativ gestalteten Entwicklungsprozess resultieren aus der Transformation von bestehenden Entwicklungsdaten in eine Simulation

²⁶ CAID: Computer Aided Industrial Design, CAE: Computer Aided Engineering, CAD: Computer Aided Design, CAP: Computer Aided Planning, RPT: Rapid Prototyping.

kontinuierlich Modellierungsaufwände. Viele Systeme unterstützen die direkte Übernahme von Änderungen aus den Konstruktions- und Entwicklungsumgebungen nur bedingt. Gerade in frühen Entwicklungsphasen, in denen sich die Charakteristika der Anlage mehrmals ändern, stellt die Simulation somit eher eine Datensenke dar.

Zudem findet die Simulation als Hilfsmittel zur Eigenschaftsabsicherung in frühen Phasen bei der konzeptionellen Gestaltung neuer Lösungen nur wenig Anwendung (SCHUBERT ET AL. 2008, S. 87). Vielmehr werden erste gedankliche Entwicklungen mit einfachen Skizzen und Anschauungsmodellen detailliert. Diese meist papiergebundenen Ergebnisse müssen im Anschluss aufwändig in einen digitalen Entwicklungsprozess zurücktransformiert werden und bieten zudem wenig Interaktivität bezüglich der Änderungen der Systemeigenschaften. Daher „(...) weisen herkömmliche Entwicklungsprozesse eine zu späte Verifikation auf, die zu zeit- und kostenaufwendigen Änderungsschleifen führt. Eine weitere Schwachstelle ist die zu kurze Konzeptphase bzw. eine zu frühe Festlegung auf ein Konzept“ (LANGERMANN 2009, S. 9). Darüber hinaus ist der interdisziplinäre Charakter der Entwicklungs- und Simulationswerkzeuge nur schwach ausgeprägt (FOLLMER ET AL. 2011). Vor allem bei sehr komplexen oder materialflussintensiven Anlagen übersteigt trotz modularer und wiederverwendbarer Simulationsmodelle der Aufwand bei der disziplinübergreifenden Modellbildung schnell den Nutzen der Methode (XU 2003).

Um den Modellbildungsaufwand, vor allem für die Verhaltens- und Geometriemodellierung, zu senken und die Aussagekraft der Simulation zu erhöhen, wurden Modelle der physikbasierten Simulation (vgl. Abschnitt 2.4.1) in Anwendungsbereiche wie die Virtuelle Inbetriebnahme bzw. mechatronische Simulation von Produktionssystemen transferiert, die im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

3.4 Physikbasierte Simulation mechatronischer Systeme

3.4.1 Übersicht der physikbasierten Simulation

Die physikbasierte Simulation ermöglicht eine aufwandsarme Abbildung des dynamischen Verhaltens eines Produktionssystems (BENDER 2007; RÖCK 2007; RÖCK & PRITSCHOW 2007; WISCHNEWSKI 2007; ROBMANN & JUNG 2008) und reduziert den Modellierungsaufwand auf eine Parametrierung der Eigenschaften und eine Kinematisierung der Modelle (SPITZWEG 2009; WÜNSCH 2010; LACOUR

2012; STRAHILOV 2015). Erste Ansätze einer physikbasierten Simulation in der Produktionstechnik wurden von STETTER (1993) beschrieben. Vor dem Hintergrund einer Effizienzsteigerung des Robotereinsatzes, speziell der Bahn- und Greifplanung, wurde durch die Integration physikalischer Effekte die Realitätsnähe von dynamischen Simulationsszenarien verbessert (STETTER 1993, S. 46–67). Die einzelnen Effekte wurden jedoch spezifisch für gegebene Anwendungsfälle implementiert. Die physikalische Abbildung anlageninterner Transportprozesse, speziell spurgebundener Transportsysteme, stand im Fokus der Arbeit von WISCHNEWSKI (2007). Um Effekte wie Staudruckszenarien oder andere Materialflussszenarien auf Geometrieebene effizient abbilden zu können, wird ein logisches Ersatzmodell auf Basis von atomaren Modellelementen, wie Knoten, Segmenten, Trägern oder Antrieben erstellt. Diesen ist ein spezifisches physikalisches Verhalten aufgeprägt, das im Simulationsverlauf ausgewertet sowie in der geometrischen Repräsentation visualisiert wird. HOHER ET AL. (2012; vgl. auch HOHER ET AL. 2011) beschreiben mit dem Fokus auf Stückgutprozessen einen geometrie- und geschwindigkeitsbasierten Simulationsansatz, der auf Grundlage von physikbasierten Modellen für mikro- bzw. makroskopische Betrachtungsszenarien skaliert werden kann. RÖCK (2007; vgl. auch PRITSCHOW ET AL. 2005; RÖCK & PRITSCHOW 2007) stellt einen Ansatz zur echtzeitfähigen Abbildung von Produktionssystemen im Rahmen der VIBN dar, der auf einem reduzierten FEM-Ansatz basiert. Die Berechnung des Anlagenverhaltens über finite Elemente ist nur eingeschränkt nutzbar, wenn eine Vielzahl an Objekten in einem Kollisionsraum abzubilden ist.

Für die Abbildung vielzähliger Objekte hat sich der Einsatz von Physik-Engines aus der Computergrafik bewährt. Eine wichtige Grundlage ist das Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen nach SPITZWEG (2009). Diese Ansätze einer physikbasierten Virtuellen Inbetriebnahme greifen unter anderem REINHART & STICH (2011), LACOUR (2012), WÜNSCH (2012), BÄR & DAMRATH (2014) sowie STRAHILOV (2015) auf und entwickeln neue Verfahren zur Modellbildung, zur Ausweitung der physikbasierten Simulation auf neue Anwendungsbereiche in der Produktionstechnik sowie zugehörige Vorgehensmodelle zur Integration in bestehende Entwicklungsprozesse. Die physikbasierte Simulation ermöglicht eine quasi-parallele Modellerstellung zum Entwicklungsprozess. Im Vergleich zur VIBN am Ende eines Entwicklungsprozesses kann somit aufwandsarm ein „kontinuierlicher Abgleich aller Disziplinen/ Arbeitsschritte durch Simulation von der ersten Idee bis zur Produktion“ erfolgen (WÜNSCH 2012, S. 9). Hierfür muss jedoch die Aussage der Simulation valide sein.

BOEING & BRÄUNL (2007) bewerten unterschiedliche Physik-Engines, wie NVIDIA® PhysX®, Bullet oder ODE bezüglich der physikalischen Abbildungstreue sowie der Rechengeschwindigkeit. Dazu wurden für Starrkörpermodelle die Materialparameter (z. B. Reibung, Stoßverhalten etc.), die Stabilität von Gelenkverbindungen, die mögliche Kollisionsauflösung sowie das Verhalten bei statischen Umgebungsbedingungen (z. B. Stapelprozesse) anhand repräsentativer Szenarien untersucht. Eine diesbezügliche Evaluation von Physik-Engines wurde auch von HUMMEL ET AL. (2012) durchgeführt. Zusammenfassend ist die erzielbare Qualität der Simulationsergebnisse nicht mit einer FEM- bzw. MKS-Simulation vergleichbar, jedoch ausreichend für eine Absicherung des kinematischen Verhaltens im Zuge einer interdisziplinären Simulation auf Anlagen- und Steuerungsebene.

Die physikbasierte Simulation wird aktuell auf weitere Anwendungsfelder transferiert. WINKES & AURICH (2013) beschreiben einen Ansatz zur Integration von Physik-Engines in die Montagesimulation, um auf Basis der Physikmodelle die Krafterückkopplung in der Virtuellen Realität und damit die Immersion des Anwenders zu verbessern. Die Abbildung kleiner Bauteilabmessungen und Zuführprozesse eines Vibrationswendelförderers ist im Fokus von HOFMANN (2014). Über dimensionslose Kennzahlen wird eine Skalierung im Zeit- und Geometriebereich vorgenommen, wodurch die Restriktion bestehender Physik-Engines für kleine Bauteile umgangen werden kann. Die daraus resultierende Simulation ist jedoch, abhängig von der Komplexität des betrachteten Szenarios, nicht mehr online ausführbar. DAMRATH ET AL. (2014) erweitern bestehende Ansätze der physikbasierten VIBN um Auswertemöglichkeiten der Energieeffizienz von Anlagen. Bei der digitalen Bewertung von Anlagenalternativen werden zusätzliche Kriterien definiert und die Energieverbräuche der einzelnen Betriebsmittel in der Simulation visualisiert. Die physikbasierte Simulation ist auch Gegenstand der Arbeiten von ROBMANN ET AL.; ROBMANN ET AL. (2009; 2010), die eine Starrkörperdynamik- und Schüttgutsimulation für die Forst- und Bauindustrie sowie eine Bodenmechaniksimulation im Bereich der Luft- und Raumfahrt untersuchen. Hierbei werden jedoch speziell entwickelte Physik-Engines eingesetzt, die zu Lasten der Berechnungsgeschwindigkeit quantitativ bessere Aussagen zulassen.

3.4.2 Systemstruktur der physikbasierten Simulation

Das Hauptziel der physikbasierten Simulation ist die Reduktion des Modellbildungsaufwandes im Zuge einer Simulationsstudie. Die Systemelemente der

physikbasierten Simulation sowie die zugehörige Systemarchitektur werden im Folgenden in Anlehnung an SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012) dargestellt.

Die einzelnen Modellbestandteile der physikbasierten Simulation sind in Abbildung 3.8 zu sehen. Die Grundlage zur Berechnung der physikalischen Effekte stellt ein geometrisches Objekt dar. Dieses kann einerseits durch eine exakte konkave Kollisionsgeometrie repräsentiert werden. Andererseits ist eine Abstraktion über konvexe Hüllkörper oder geometrische Primitive wie Quader oder Kugeln denkbar, um eine schnellere Berechnung der Objektwechselwirkungen zu ermöglichen.

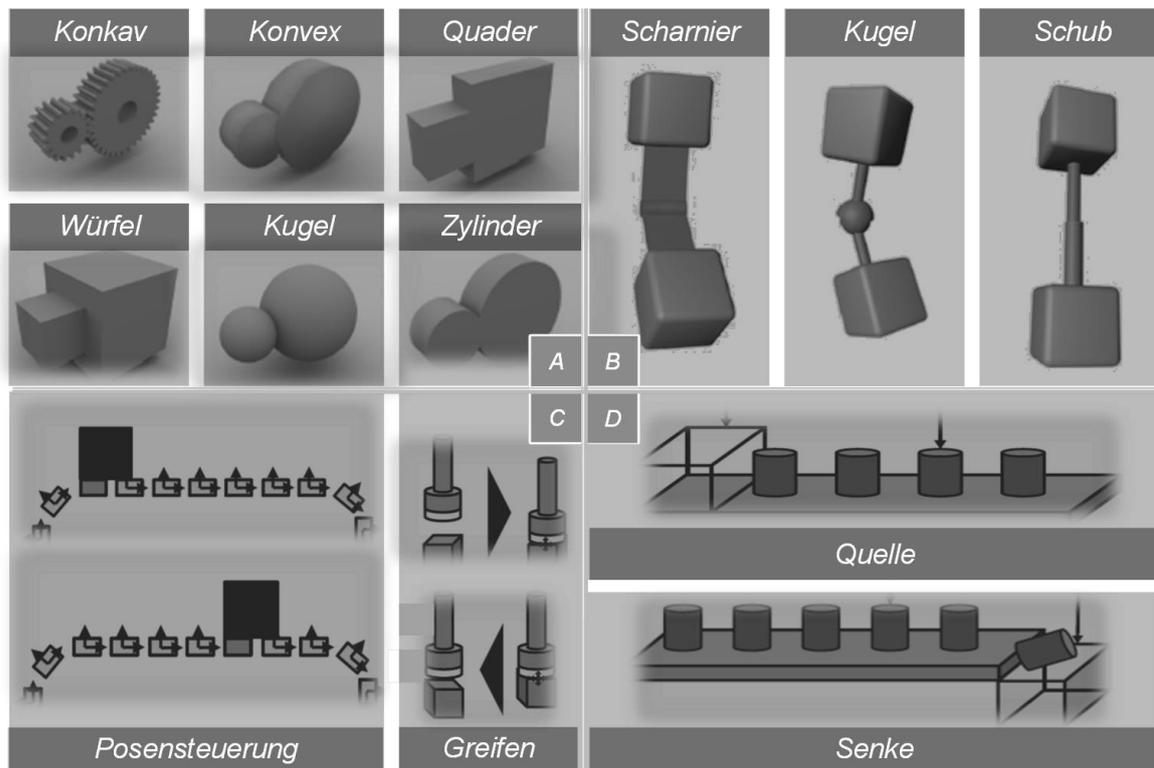


Abbildung 3.8: Exemplarische Modellelemente: Kollisionsobjekte (A), Gelenktypen (B), Funktionselemente (C) und Entwurfsmetaphern (D) (in Anlehnung an LACOUR 2012; vgl. auch SPITZWEG 2009).

Über geometrische Zwangsbedingungen können kinematische Ketten im Modell erstellt werden. Hierbei ist neben klassischen Scharnier- oder Kugelgelenken auch die Definition eigener Gelenktypen möglich, bei denen die Freiheitsgrade problem-spezifisch eingeschränkt und parametrisiert werden können. Eine zusätzliche Erweiterung von Gelenktypen stellen Antriebe dar, die so parametrisiert werden, dass gemäß eines definierbaren Geschwindigkeitsprofils oder einer externen Vorgabe eine Bewegung entlang des gegebenen translatorischen oder rotatorischen Freiheitsgrades erfolgt. Zur Abbildung produktionstechnischer Prozesse kommen Funktions-

elemente zum Einsatz. Diese basieren auf einer Kollisionsgeometrie bzw. einer Zwangsbedingung. So kann eine Manipulation von Objekten über eine direkte Posensteuerung und eine externe Sollwertvorgabe erfolgen, um z. B. ein Förderband abzubilden. Ein weiteres Beispiel ist eine Greiferdeklaration, bei der Objekte bei Kollision mit den Greiferbacken automatisch an die Kinematik gekoppelt werden.

Des Weiteren können Produktionsprozesse über Entwurfsmetaphern abstrahiert dargestellt werden. Diese entsprechen „(...) einem Hilfsmittel, das zur vereinfachten Beschreibung komplexer Abläufe dient und somit die Erstellung von Anwendungsszenarien erleichtert“ (LACOUR 2012, S. 65). Entwurfsmetaphern sind zum einen Quellen und Senken, mit denen gezielt Simulations- bzw. Materialflussobjekte erzeugt bzw. aus der Simulation entfernt werden können. Zum anderen können über sogenannte abstrakte Verarbeitungsmaschinen Geometrieobjekte gezielt verändert werden, ohne dass eine detaillierte Abbildung der Fertigungs- oder Bearbeitungsprozesse notwendig ist. Eine Unterkategorie der abstrakten Verarbeitungsmaschine stellt eine Pufferstrecke dar. Hierbei erfolgt keine Veränderung der Objekteigenschaften, sondern lediglich eine zeitweise Ausblendung von Simulationsobjekten. Während die Kollisionsobjekte und die geometrischen Zwangsbedingungen in den meisten Physik-Engines als vordefinierte Objekttypen verfügbar sind, stellen die Funktionselemente und abstrakten Verarbeitungsmaschinen Simulationsbestandteile dar, die speziell für die physikbasierte Simulation produktionstechnischer Systeme entwickelt wurden.

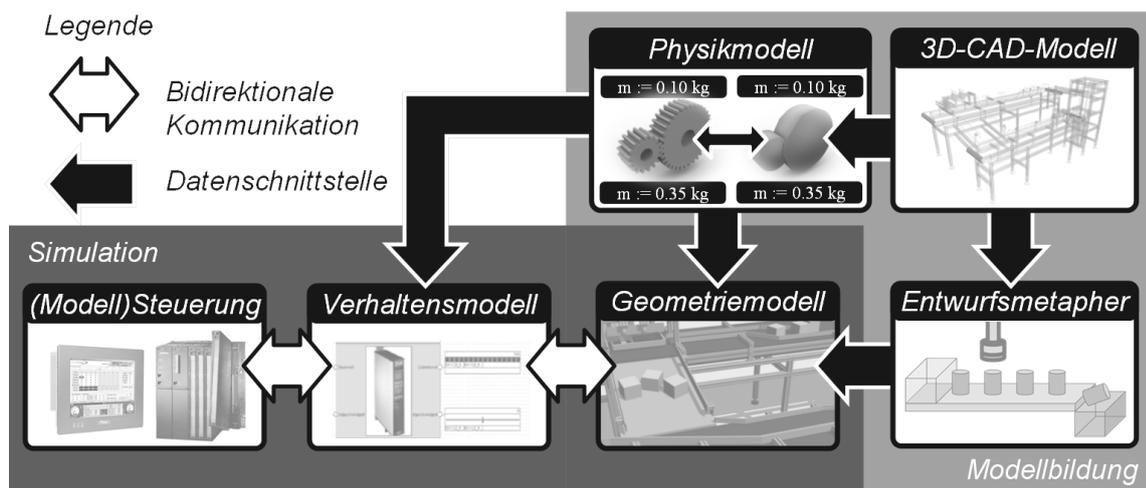


Abbildung 3.9: Systemstruktur der physikbasierten Virtuellen Inbetriebnahme (in Anlehnung an LACOUR 2012, S. 64).

Die Elemente eines physikbasierten Modells ersetzen, wie in Abbildung 3.9 dargestellt, Bestandteile des Verhaltensmodells, indem Sensoren und Aktoren auf der

Basis der Objektrepräsentation und der physikalischen Wirkprinzipien abgebildet werden. Somit ist keine explizite Verhaltensdefinition erforderlich. Darüber hinaus werden das Kollisions-, das Kinematik- und das Materialflussmodell der Geometriesimulation komplett durch das physikbasierte Modell abgebildet. Dieses wird wie Entwurfsmetaphern auf Basis der geometrischen Repräsentation abgeleitet. Da lediglich Teilmodelle der Simulation durch das physikbasierte Modell substituiert bzw. zusammengefasst werden, kann der grundsätzliche Aufbau einer Virtuellen Inbetriebnahme bzw. einer mechatronischen Simulation (vgl. Abschnitt 3.3.2) bestehen bleiben. Die Erstellung des physikbasierten Modells, ausgehend von den 3D-CAD-Daten, wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Bei der physikbasierten Simulation ist jedoch bisher nur die Abbildung von Starrkörpern möglich. Zudem können durch die Verwendung von vordefinierten Objekttypen aus den zugrundeliegenden Physik-Engines Verarbeitungsgüter nur eingeschränkt abgebildet werden. Dies gilt ebenso für diesbezügliche Wirkpaarungen, die nur mit erheblichem Aufwand oder Ersatzmodellen, wie einer Entwurfsmetapher, abstrahiert simuliert werden können.

3.4.3 Modellbildungsprozess und technische Schnittstellen

Eine wichtige Grundlage für die physikbasierte mechatronische Simulation ist die Methode zur Erstellung von Physikmodellen von Maschinen und Anlagen im Rahmen eines integrierten Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses (SPITZWEG 2009). LACOUR (2012) erweitert diese Methode zu einem fünfstufigen Verfahren (vgl. Abbildung 3.10). Das aus den Konstruktionsdaten triangulierte Geometriemodell wird in ein Kollisionsmodell überführt, welches durch die Anreicherung mit physikalischen Parametern in ein Physikmodell übergeht. Um eine ablauffähige Simulation zu erhalten, werden kinematische Randbedingungen definiert und das Physikmodell in die Simulationsumgebung integriert. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden in Anlehnung an SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012) detailliert. Ergänzende Beschreibungen finden sich auch in STETTER (1993), REINHART & STICH (2011), REINHART ET AL. (2011c), WÜNSCH (2012) oder STRAHILOV (2015).

Ausgehend von den 3D-CAD-Modellen erfolgt eine Vorverarbeitung der Bauteilgeometrie. Der erste Schritt besteht in einer Tesselierung, wobei parametrisch beschriebene Geometrieinformationen in einen Verbund aus planaren Flächenelementen, meist Dreiecken, überführt werden. Da hierbei die Oberflächentopologie der Objekte verloren geht, wird die Bauteilgeometrie rekonstruiert. Dies beinhaltet eine Bereinigung der Datenbasis durch die Zusammenfassung redundanter Eck-

punkte und Kanten der einzelnen Dreiecksnetze. Der Szenengraph²⁷ der CAD-Systeme kann nicht für die physikbasierte Simulation eingesetzt werden. Daher wird dieser aufbereitet und Skalierungsanteile der Pose eines Bauteils entfernt. Als letzten Schritt der Datenaufbereitung wird eine Oberflächenreduktion vorgenommen. Hierbei wird die Anzahl der Dreieckselemente, welche die Oberflächen repräsentieren, über geeignete Verfahren reduziert. Daraus ergibt sich eine erhebliche Verbesserung für die Berechnung der Kollisionserkennung und -reaktion. Jedoch kann dieser Schritt zu einer Verfälschung der exakten Oberflächendarstellung führen. Die Granularität der Oberflächenreduktion muss daher anhand der Art des Objektes bestimmt werden. So können beispielsweise Stütz- und Hüllsysteme stärker abstrahiert werden als dynamische Funktionselemente, wie z. B. Greiferbacken.

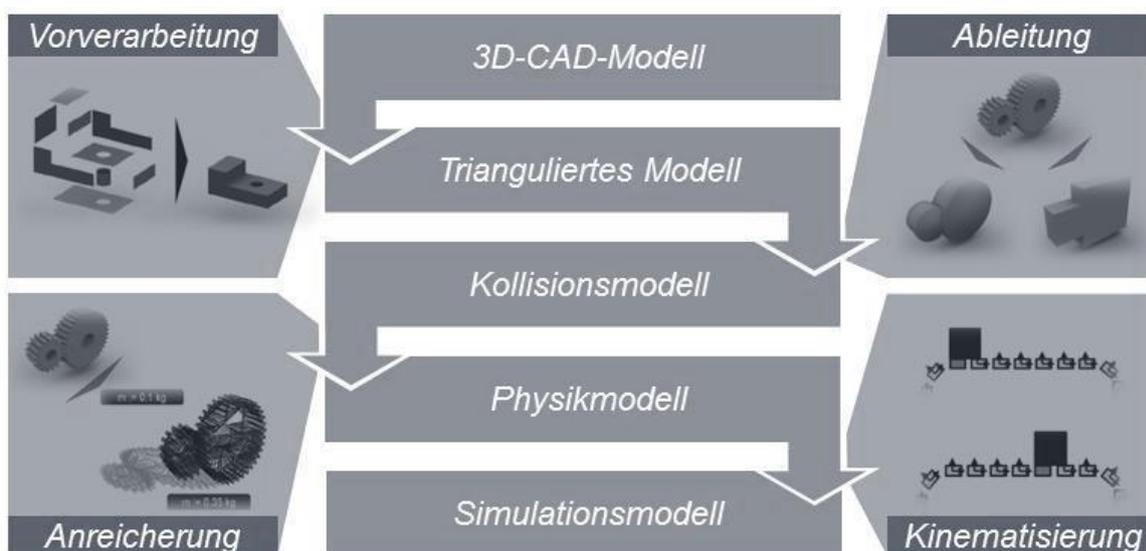


Abbildung 3.10: Phasen der Modellbildung für die physikbasierte Simulation (in Anlehnung an LACOUR 2012, S. 37; vgl. auch SPITZWEG 2009).

Aus den aufbereiteten Geometriedaten wird das Kollisionsmodell abgeleitet. Hierfür erfolgt zunächst eine Klassifikation. Diese unterscheidet in visuelle Komponenten, die nur zur Einordnung der Simulationsergebnisse in das Umfeld des Produktionsprozesses notwendig sind, sowie Komponenten, die im Zuge der Simulation mit anderen Objekten interagieren. Letztere können weitergehend in statische und dynamische Komponenten sowie Sensorik und Aktorik sowie Kinematik gegliedert werden. In diesem Zuge wird ebenfalls festgelegt, ob bestimmte Teilbereiche des

²⁷ „Ein Szenengraph ist eine objektorientierte Datenstruktur zur Darstellung der logischen und räumlichen Anordnung von dreidimensionalen Körpern“ (LACOUR 2012, S. 23).

betrachteten Szenarios über Entwurfsmetaphern abstrahiert werden sollen. In einem nächsten Schritt wird den Objekten ein Kollisionskörper zugewiesen. Komplexe konkave Bauteile werden hierfür vorab in konvexe Teilgeometrien zerlegt, um den Aufwand für die Kollisionsberechnung zu minimieren.

Nach der Anreicherung des bestehenden Modells um physikalische Parameter liegt ein physikbasiertes Modell vor. Hierbei werden die physikalischen Parameter, wie Schwerpunkt, Gewicht, Gewichtsverteilung etc. anhand der Daten des Ursprungsmodells aus einem CAD- bzw. PDM-System exportiert. Dies ist notwendig, um trotz der Modifikation der originalen Geometrieinformation keine Verfälschung der physikalischen Parameter zuzulassen.

In einem letzten Schritt der Modellbildung werden die kinematischen Strukturen in das Modell integriert. Neben Gelenken, Motoren und planaren Förderstrecken werden Zustandsveränderungen über eine externe Posensteuerung oder eine Vorgabe von Bewegungsbahnen definiert. Des Weiteren werden Aspekte des Materialhandlings modelliert sowie die Entwurfsmetaphern parametrisiert, bevor eine Anbindung an das Verhaltensmodell und die Steuerungstechnik erfolgen kann. „Das Ziel besteht hierbei in der Implementierung von Transformationsvorschriften, die die Kommunikation von Werten zwischen der Steuerungstechnik und der Simulationsumgebung, realisiert im Verhaltensmodell, ermöglicht. Darüber hinaus werden mathematische Modelle hinterlegt, die nicht simulierte Komponenten abbilden, wie beispielsweise Anfahrkurven von Motoren“ (LACOUR 2012, S. 100).

3.4.4 Entwicklungsumgebungen zur physikbasierten Simulation

Für die industrielle Anwendung der Physiksimulation umfasst die Systemlandschaft eine Reihe geschlossener Softwarelösungen, in welche die vorab dargestellten Konzepte der physikbasierten Simulation integriert sind. Die Systeme TrySim der Fa. Cephalos und WinMOD-SimLine der Fa. Mewes & Partner bilden das Objektverhalten über physikalische Effekte ab, beschränken sich aber auf eingeschränkte Kollisionsgeometrien. Eine Erstellung von physikbasierten Modellen ist auch mit dem Mechatronik Concept Designer der Fa. Siemens, dem Tool industrialPhysics der Fa. Machineering, dem System AgX Dynamics der Fa. Algoryx, den Forschungsumgebungen V-Rep und VeroSim oder der Produktfamilie der Fa. Visual Components möglich. Letzteres stammt aus dem Bereich der Visualisierung und Vertriebssimulation und ist daher nicht primär für eine mechatronische Simulation geeignet. Ähnliche Ansätze werden auch in den Systemen Experior der

iSILOG GmbH oder Demo3D der SimPlan AG verfolgt, die Logistik- und Materialflussszenarien fokussieren.

Alle verfügbaren Systeme stoßen jedoch bei komplexeren Modellen und vielen Materialflussobjekten an die Grenzen der Rechenleistung. Zusätzlich bieten die Softwaresysteme teils nur eingeschränkt Schnittstellen zu bestehenden CAD-Systemen und finden aufgrund einer mangelnden Einbettung in die bestehenden Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse der Anlagenbauer bisher nur sporadisch Anwendung. Neuere Ansätze der Datenintegration fokussieren eine direkte Anbindung an die Datenbestände der mechanischen Konstruktion. Die Bestandteile des physikbasierten Modells werden dabei als Feature der Geometrieobjekte gespeichert und können in PDM-Systemen mit verwaltet werden.

Als Grundlage für das Physikmodell kommt in den meisten Simulationsumgebungen die Engine PhysX® der Fa. NVIDIA® oder die Open-Source-Engine Bullet zum Einsatz. Daneben existieren weitere vielzählige Physik-Engines, wie z. B. die Open Dynamic Engine (ODE), Havok oder Newton Game Dynamics sowie für spezifische Anwendungsfälle spezifische entwickelte proprietäre Engines.

3.4.5 Fazit

Die Abbildung physikalischer Effekte im Zuge einer Kinematik- und Anlagensimulation existiert auf konzeptioneller Basis bereits seit langem. Doch erst durch eine gestiegene Rechenleistung konnten sich diese Ansätze etablieren. Gerade in Simulationsszenarien mit vielen (Materialfluss-) Objekten, z. B. bei der Abbildung von Abfüll- oder Verpackungssystemen, lassen sich Potenziale bei der Reduktion der Modellierungsaufwände und der Steigerung der Aussagekraft der Simulation realisieren. Jedoch ist eine Abbildung von Verarbeitungsgütern und deren Zustands- transformation nicht bzw. nur mit Ersatzmodellen realisierbar.

Zur Aufbereitung der Daten für die physikbasierte Simulation sind oftmals noch spezielle Tools notwendig. Dies sowie die geringe Datendurchgängigkeit und der geringe Automatisierungsgrad bei der Ableitung der Physikmodelle stellen teilweise noch ein Hindernis für den Transfer in die industrielle Anwendung dar. Darüber hinaus hindert die starke Fokussierung auf die mechanische Konstruktion und der diesbezüglichen Entwicklungswerkzeuge noch den Einbezug von Entwicklern aus anderen Fachbereichen.

Die bisherigen Ergebnisse zur physikbasierten Simulation im Maschinen- und Anlagenbau beschränken sich auf die Simulation formstabiler Objekte. In vielen

Verarbeitungssystemen resultiert die Komplexität des Prozesses unter anderem aus dem schwer zu prognostizierenden Verhalten formlabiler Objekte, wie z. B. einer Folie oder eines Schlauches. Weitere Simulationsansätze, mit denen die Abbildung diesbezüglicher Objekteigenschaften möglich ist, werden nachfolgend dargestellt.

3.5 Simulation formlabiler Objekte

3.5.1 Übersicht bestehender Ansätze

Aktuelle Ansätze zur Abbildung formlabiler Objekte können nach (HERGENRÖTHER 2003, S. 22–28) in zwei Klassen eingeteilt werden: geometrische und physikalisch basierte Modelle (HERGENRÖTHER 2003, S. 22–28). Letztere können in abstrahierte Modelle der Computergrafik sowie Modelle der Ingenieurwissenschaften untergliedert werden. NEUMANN (2009, S. 20) klassifiziert die physikalisch basierten Verfahren zur Deformationssimulation nach dem Betrachtungsraum in Euler-Methoden und Lagrange-Verfahren, die durch einen Satz von Punkten mit zeitlich variierenden Positionen repräsentiert und unterschiedlich berechnet werden.

Geometrische Modelle bilden Verformungen über mathematische Kurven ab, die z. B. über Bézierkurven oder B-Splines repräsentiert werden. Durch eine Verschiebung der Kontrollpunkte kann recheneffizient eine Darstellung formlabilen Objektverhaltens erreicht werden. Dies ist jedoch nur aufgrund der abstrahierten Beschreibung möglich, woraus eingeschränkt präzise Modelle resultieren (BARTELS ET AL. 2005). Diese rein geometrischen Ansätze eignen sich gut zur Visualisierung und Animation, lassen jedoch keine Aussage über das dynamische Verhalten zu.

Für die Abbildung des physikalischen Verhaltens sind in der Computergrafik unterschiedliche Ansätze entstanden. Eine Übersicht findet sich in den Arbeiten von GIBSON & MIRTICH (1997), NEALEN ET AL. (2006a) oder MOORE ET AL. (2007). Aufgrund der effizienten Berechnung sind Feder-Masse-Systeme (FMS) prägend. Diese wurden in mehreren spezialisierten Verfahren weiterentwickelt, die sich bezüglich des Modellaufbaus und der zugrundeliegenden Berechnung der Verformung unterscheiden. Beispiele sind Modelle zur Simulation chirurgischer Eingriffe (KUHN 1997; COTIN & METAXAS 2004) oder zur Anreicherung von Virtual Reality Anwendungen (KANG & CHO 2002).

Neue Ansätze einer effizienten Simulation formlabiler Objekte stellen aktuell den Schwerpunkt mehrerer Forschungsprojekte dar (GEORGII 2008; KAUFMANN ET AL.

2008; GEORGII ET AL. 2010; SERVIN ET AL. 2011). Die Verfahren der Computergrafik nähern sich dabei immer mehr den klassischen Simulationsverfahren der Ingenieurwissenschaften an. So stellen TERZOPOULOS ET AL. (1987) und BRO-NIELSEN & COTIN (1996) Simulationsverfahren vor, die auf Gesetzen der Kontinuumsmechanik bzw. einem linearen Finite-Elemente-Ansatz basieren. MÜLLER ET AL. (2002), HAUTH & STRASSER (2004) und NESME ET AL. (2005) beschäftigen sich mit einem korotierten Finite-Elemente-Ansatz zur Abbildung der Objektverformung. Darüber hinaus existieren weitere Verfahren, wie zum Beispiel Position Based Dynamics (MÜLLER ET AL. 2006), Primo (BOTSCH ET AL. 2006) oder Elastons (MARTIN ET AL. 2010), welche die Genauigkeit der physikbasierten Simulation verbessern und die Anzahl der abbildbaren Effekte, wie beispielsweise plastische Verformung, erhöhen sollen. Jedoch stehen diese Ansätze momentan nur eingeschränkt in den Physik-Engines wie Bullet oder PhysX® und somit für einen Transfer auf produktionstechnische Problemstellungen zur Verfügung.

In den Ingenieurwissenschaften sind die Mehrkörpersimulation (SCHWERTASSEK & WALLRAPP 2014) sowie die Finite-Elemente-Methode etablierte Verfahren, um das dynamische Verhalten und die Verformung von Objekten abzubilden (SCHWARZ 1991). Neuere Ansätze zielen darauf ab, die Echtzeitfähigkeit der FEM-Simulation zu verbessern (RÖCK 2007; RÖCK & PRITSCHOW 2007). Diese sind jedoch auf eine geringe Objektanzahl begrenzt und erfordern zusätzliche Berechnungsmodelle für die Kollisionsdetektion. Obwohl es sich auch bei diesem Verfahren um eine Näherung handelt, kann die Qualität der Lösung auf Kosten der Rechenzeit erhöht werden. VÖLLINGER (2011, S. 45–50) nennt die Finite-Elemente-Methode, die Randwertmethode sowie die Partikelsysteme als zielführende Ansätze für eine hinreichende Abbildung des Deformationsverhaltens. Weitere Verfahren sind die Finite-Differenzen-Methode, nodale Netze oder Deformationsfunktionen (KUHN 1997, S. 12). Im Allgemeinen ist aufgrund des hohen Berechnungsaufwand des Deformationsverhaltens trotz der aktuellen Computerleistungen nur eingeschränkt eine direkte Rückmeldungen der Systemdynamik an den Benutzer im Zuge einer interaktiven Simulationen möglich.

Während die vorangegangenen Verfahren meist mit einer Abstraktion der Physikmodelle eine Verbesserung der Recheneffizienz der Simulationsverfahren forcieren, beschreibt GEORGII (2008) einen Multigrid Solver, der die Bewegungsgleichung formlabiler Volumenelemente effizient berechnen kann. Darüber hinaus kommt

eine neue Art der Kollisionsdetektion auf Basis des Render-Meshes²⁸ zum Einsatz. Dieses ist hochauflösender als das Simulations-Mesh und wird auf der GPU²⁹ berechnet, weshalb die Randbedingungen für die Bewegungsgleichungen genauer und schneller ermittelt werden können. Die hohe Anzahl an Rechenkernen einer GPU bieten auch Potenziale für die Berechnung des Deformationsverhaltens. DICK ET AL. (2011) geben eine 27-fach höhere Rechengeschwindigkeit im Vergleich zu einer Finite-Elemente-Berechnung auf Single-Core CPUs³⁰ an. Dies wird durch eine effiziente, nicht rechenintensive numerische Beschreibung formlabiler Objekte durch matrixfreie Gleichungen erreicht, die parallel auf der GPU ausgeführt werden. Dazu wurde die Finite-Elemente-Methode bezüglich einer Hardwareoptimierung abgeändert. Vergleichbare Ansätze zur Steigerung der Berechnungseffizienz fokussiert auch VÖLLINGER (2011).

Die Modellierung des physikalischen Verhaltens bildet das Deformationsverhalten der Objekte und somit die Reaktion auf eine Zustandsänderung ab. Diese erfolgt aufgrund von internen und externen Kräften. Während die internen Reaktionskräfte aus dem Physikmodell abgeleitet werden, ist für die Ermittlung der externen Kräfte, vor allem aus der Kollisionsauflösung mit anderen Objekten, ein zusätzliches Kollisionsmodell notwendig. Die diesbezügliche Berechnung kann beispielsweise mit adaptierten Verfahren der klassischen physikbasierten Starrkörpersimulation realisiert werden, indem zu jedem Iterationsschritt ein Update der Veränderungen der Netztopologien erfolgt. Diese zusätzlichen Rechenschritte verlangsamen die Simulation formlabiler Objekte, weshalb viele Simulationsverfahren zugunsten der Berechnungseffizienz auf eine Abbildung der Fremd- und Eigenkollisionen verzichten. Durch eine Parallelisierung der Kollisionsberechnung und dem Einsatz von Grafik-Prozessoren kann diesem Umstand entgegen gewirkt werden (VÖLLINGER 2011, S. 74–78). Neben dem Simulationsverfahren an sich hat auch dessen Implementierung in einem Middleware-System oder einer Entwicklungsumgebung einen Einfluss auf die Modellbildung.

3.5.2 Detailbetrachtung ausgewählter Simulationsverfahren

Aus der Forderung nach einer interaktiven Simulation resultiert die Anforderung, dass die zugehörigen Modelle die Ergebnisse gemäß der vorliegenden Taktzeit der Steuerungssysteme bereitstellen können. Aus diesem Grund werden im Folgenden

²⁸ Ein Mesh bezeichnet in der Computergrafik ein Polygonnetz, das einen geometrischen Körper repräsentiert.

²⁹ Graphics Processing Unit.

³⁰ Central Processing Unit.

nur ausgewählte Ansätze dargestellt, mit denen sich eine echtzeitfähige Simulation realisieren lässt und somit den Prinzipien der Gleichzeitigkeit, Rechtzeitigkeit und Verfügbarkeit (WÖRN & BRINKSCHULTE 2005, S. 317–324) in Realzeit genügen. Diese exemplarischen Verfahren sind in Abbildung 3.11 zu sehen.

Ein etabliertes Verfahren für eine schnelle Deformationsberechnung bei ein-, zwei- und dreidimensionalen Objekten sind Feder-Masse-Systeme (FMS)³¹, die in Abbildung 3.11-A dargestellt sind. Die Verformung wird über die Verschiebung einzelner Massepunkte realisiert, die über Feder- und Dämpferelemente verknüpft sind. FMS stellen nach NEUMANN (2009, S. 20) ein Lagranges Verfahren dar, bei dem diskrete Systeme mit entkoppelten Bewegungsgleichungen dargestellt werden. Diese können parallelisiert berechnet werden, woraus eine echtzeitfähige Abbildung des Deformationsverhaltens resultiert (VAN GELDER 1998).

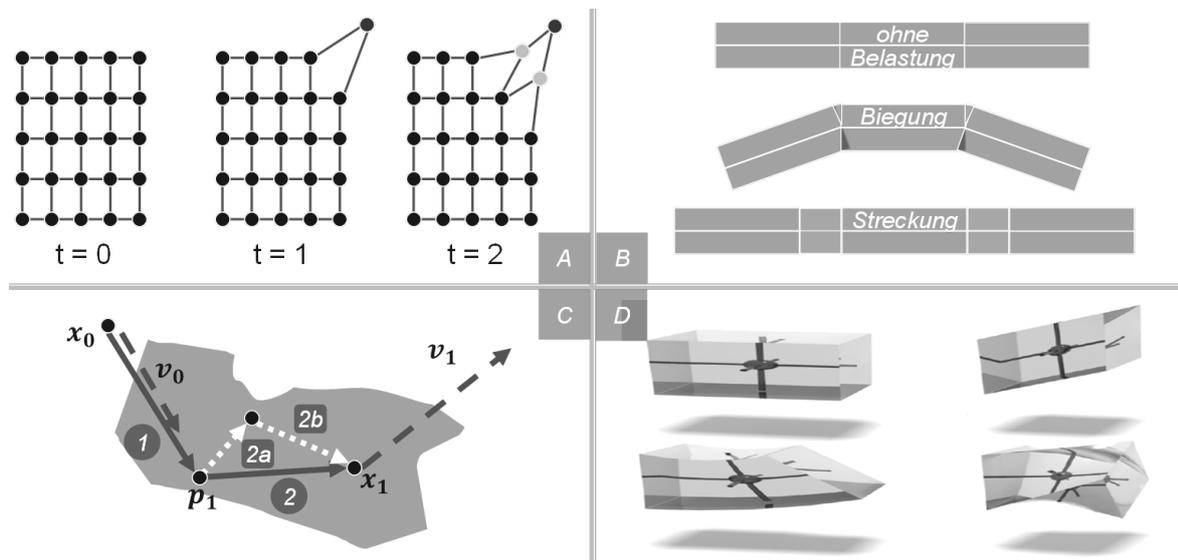


Abbildung 3.11: Feder-Masse-Systeme (A, NEUMANN 2009), Prisms Modeling (PriMo, B, BOTSCH ET AL. 2006), Position-Based-Dynamics (C, MÜLLER ET AL. 2006) und Elastons (D, MARTIN ET AL. 2010).

Bei FMS wird „(...) die Deformation durch die Verschiebung der einzelnen Massepunkte dargestellt. Greifen äußere Kräfte an einem FMS an, so lassen sich die resultierenden Punktgeschwindigkeiten und schließlich die Punktverschiebungen durch Integration berechnen“ (NEUMANN 2009, S. 28–29). Ausgehend von der Ruhelage des Objektes werden bei einer Krafteinwirkung durch Schwerkraft, äußere Kräfte oder Reaktionskräfte die zugehörigen Verschiebungen der Massepunkte berechnet. Aufgrund der verbindenden Federelemente hat eine Positions-

³¹ Oft auch als Feder-Masse-Modelle, Feder-Masse-Dämpfer-Systeme, Masse-Feder-Dämpfer-Systeme bezeichnet.

änderung eines Massepunktes eine oszillierende Verschiebung der benachbarten Knoten zur Folge, bis die potenzielle Energie über die Dämpferelemente minimiert und der Körper wieder in der Ruhelage angekommen ist. Sofern mit FMS plastisches Verhalten abgebildet werden soll, muss die relative Position der Ruhelage zwischen den Massepunkten im Simulationsverlauf verändert werden. Diesbezügliche Ansätze sind beispielsweise in JANSSON & VERGEEST (2003) oder NEUMANN (2009) beschrieben. Weitere Effekte und Möglichkeiten zur Veränderung der Objekttopologie, wie beispielsweise Trenn- oder Fügevorgänge, sowie generelle Modellbildungsstrategien für Feder-Masse-Systeme beschreiben z. B. JUNG (1995), BRO-NIELSEN & COTIN (1996), GANOVELLI ET AL. (2000) oder NEUMANN (2009).

Neben der Beschränkung auf ein Simulationsobjekt stellt das notwendige Ersatzmodell der Kollisionsrechnung ein weiteres Hemmnis dar. Generell sind FMS nicht dafür geeignet, Kollisionen zu detektieren und aufzulösen, weshalb Zusatzmodelle für die Kollisionserkennung nötig sind. Alternativ kann ein partikelbasierter Ansatz gewählt werden. Dabei sind die diskreten Elemente nicht nur auf Massenpunkte beschränkt, sondern besitzen auch eine Geometrie, die zur Detektion der Kollision mit anderen Objekten sowie der Eigenkollision verwendet werden können. Das Verfahren Prisms Modeling (BOTSCH ET AL. 2006) kann demzufolge als Weiterentwicklung der FMS gesehen werden. Steife Prismen, die über nichtlineare, elastische Kräfte verbunden sind, repräsentieren das geometrische Objekt (vgl. Abbildung 3.11-B). Dies ist mit einem echtzeitfähigen MKS-Ansatz vergleichbar, bei dem auch eine stabile und physikalisch plausible Simulation starker Deformationen ermöglicht wird. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch SERVIN ET AL. (2011). Durch eine Diskretisierung in Volumenelemente und eine Beschreibung der Verbindungselemente kann zwischen den einzelnen Volumenelementen Biegung, Dehnung oder Torsion abgebildet werden. Die Ansätze kommen maßgeblich für die Simulation von Kabeln und Schläuchen zum Einsatz.

Das Grundprinzip des Verfahrens Position Based Dynamics (Abbildung 3.11-C) ist eine zweistufige Berechnung aller Objektpositionen und -geschwindigkeiten (MÜLLER ET AL. 2006). Die geometrische Form des Körpers wird durch ein Tetraedernetz repräsentiert. Die Abbildung der Verformung sowie der Gesamtbewegung des Objektes ergibt sich, ähnlich wie bei Feder-Masse-Systemen, aus der Superposition der einzelnen Vertices³². Die Veränderung dieser Körperpunkte wird in der

³² Ein Vertex stellt einen Eckpunkt eines Polygons dar. Die Polygone bilden in diesem Fall die Begrenzungsflächen der Tetraeder, die in Summe ein geometrisches Objekt repräsentieren.

ersten Stufe ohne Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen berechnet. Aus der Summe der wirkenden Kräfte werden die vorläufigen Geschwindigkeiten und Positionen ermittelt. Erst in einem zweiten Schritt werden die Zwangsbedingungen integriert, die einerseits aus der Interaktion mit anderen Objekten und somit der Kollisionsauflösung resultieren³³. Andererseits beeinflussen die Elastizität des Körpers sowie die Volumenerhaltung die Korrektur der Geschwindigkeits- und Positionswerte der zweiten Berechnungsstufe. Die Elastizität und Volumenerhaltung definieren dabei den minimalen und maximalen Abstand benachbarter Vertices. Die Ermittlung der Zwangsbedingungen erfolgt auf Basis der vorläufigen Positionen der Vertices. Somit kann das prognostizierte Verhalten der formlabilen Objekte bei der Korrektur der Positions- und Geschwindigkeitswerte berücksichtigt werden. Bei anderen Verfahren ist dies erst im nächsten Iterationsschritt möglich, was zu einer Verfälschung der Verformungsberechnung führen kann.

Im Vergleich dazu beschreiben MARTIN ET AL. (2010) ein Verfahren, das sowohl Volumenkörper, als auch flächige Elemente und Stäbe recheneffizient mit einer hohen Genauigkeit darstellen kann. Über sogenannte Elastons (Abbildung 3.11-D) können die unterschiedlichen Körperformen gleichermaßen modelliert werden. Darüber hinaus kann neben elastischen und elasto-plastischen Bauteilverhalten auch eine Reihe weiterer Effekte, wie Verschmelzen, Knicken oder Zerschneiden, abgebildet werden. Ein Elaston ist ein punktförmiger Festkörper mit einer kleinen volumetrischen Ausdehnung in Form eines Quaders. Jedes Elaston kann, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, eine Deformation durch Dehnen, Biegen, Scheren oder Tordieren erfahren. Die Diskretisierung der Verformung erfolgt durch Generalized Moving Least Squares. Diese können in lineare und quadratische Ansätze für eine schnellere Berechnung bzw. eine höhere Qualität unterteilt werden, zwischen denen je nach Anwendung frei gewählt werden kann. Jedoch ist der initiale Implementierungsaufwand des Verfahrens größer als z. B. bei einer FEM-Simulation. Die Modellierung von Objekten kann aber beispielsweise über eine Objektdiskretisierung durch Massekugeln vereinfacht werden, aus denen die Ableitung der Elastons erfolgt.

3.5.3 Modellbildungsprozess zur Abbildung formlabiler Objekte

Die unter Abschnitt 3.4.3 dargestellten Schritte des Modellbildungsprozesses für Starrkörpersysteme gelten größtenteils auch für formlabile Objekte. Grundlage

³³ Für die Eigenkollision sind die aktuellen Ansätze nur eingeschränkt einsetzbar.

bildet ein trianguliertes Modell, das aus den CAD-Daten abgeleitet werden kann. Jedoch besteht bei der Abbildung des Kollisionsmodells und des Physikmodells ein abweichendes Vorgehen, das sich je nach Deformationssimulation unterscheidet. Allen Ansätzen ist jedoch gemein, dass als Basis eine Diskretisierung der Objektgeometrie vorgenommen wird (vgl. Abschnitt 2.4.3), wobei zwischen homogenen und inhomogenen Netzen unterschieden wird. Des Weiteren sind Randbedingungen, Materialübergänge und Lasten zu berücksichtigen (SCHWARZ 1991). Am Beispiel der FEM und der FMS werden nachfolgend die wesentlichen Unterschiede zur Modellierung von Starrkörpern und Ansätze zur Optimierung der Modelle dargestellt.

STEINKE (2010, S. 3–4) definiert für die FEM ausgehend von dem realen Bauteil die Idealisierung und Diskretisierung sowie die Definition der Randbedingungen als Bestandteile der Modellierung. Die Diskretisierung nennt auch SCHWARZ (1991) als ersten Schritt bei der Finiten-Elemente-Methode. Dabei wird das Bauteil in eine endliche Anzahl an geometrischen Strukturelementen unterteilt, den sogenannten finiten Elementen. Je nach Anwendungsfall können diese unterschiedlich ausgeprägt sein. SIEDL (2008; vgl. auch STEINKE 2010, S. 5–10) unterscheidet in drei Klassen von Elementen. Neben dreidimensionalen Volumenelementen wie Tetraeder, Pentaeder und Hexaeder können zweidimensionale Objekte mit Schalenelementen wie Platten oder Membranen abgedeckt werden. Die dritte Klasse umfasst eindimensionale Balkenelemente, mit denen Fachwerke, Träger und Rahmen oder Bögen sowie Seile modelliert werden.

Die Grundprinzipien der Diskretisierung für FEM-Modelle können auch zur Abbildung von Masse-Feder-Dämpfer-Systemen angewandt werden. Anhand der diskreten Elemente können die Massenbeiträge zu einzelnen Netzknoten sowie die Elastizitäts- und Dämpfungswerte der Kanten bestimmt werden (NEUMANN 2009, S. 30; VÖLLINGER 2011, S. 62–70). Die Vernetzung der Massepunkte kann auch abweichend zu den Kanten der Netztopologie über andere Muster erfolgen (ERLEBEN 2005; MILLINGTON 2010). Ein höherer Vernetzungsgrad der Massepunkte verbessert die Abbildungstreue des physikalischen Verhaltens, führt jedoch auch zu höheren Rechenaufwänden. FMS bieten die Möglichkeit, mit geringem Parametrierungsaufwand formlabile Objekte abzubilden. Allerdings muss hierfür eine der Problemstellung angepasste Modelldiskretisierung und -vernetzung vorgenommen werden (NEALEN ET AL. 2006b).

HERGENRÖTHER (2003, S. 28–32) nennt zur Optimierung der Simulationsberechnung für formlabile Objekte zwei Modellierungsansätze. Zum einen sind dies

adaptive Gitterstrukturen, zum anderen Mehrgitterverfahren. Bereiche mit komplizierter Geometrie erfordern zu genauen Berechnungen eine höhere Anzahl von Elementen. GRINSPUN ET AL. (2002) verfeinern den deformierbaren Körper lokal adaptiv, um Bereiche mit großen Verformungen genauer auflösen zu können als Bereiche mit kleinen Verformungen. Diesen Ansatz verfolgt auch VÖLLINGER (2011). Über multiresolutionale Deformationsmodelle wird dabei je nach Belastungsfall eine Verfeinerung oder Vergröberung des zugrundeliegenden Feder-Masse-Modells realisiert, wobei auch die Adaption des physikalischen Verhaltens, wie die Verteilung der Gesamtmasse oder die Eigenschaften der Koppelemente, berücksichtigt wird.

3.5.4 Entwicklungsumgebungen zur Simulation formlabiler Objekte

Aktuell verfügbare Physik-Engines bieten die Möglichkeit, formlabile Objekte für Animationen abzubilden. Dabei variiert der Umsetzungsgrad von Prototypen über Open-Source-Projekten (Bullet) bis hin zu kommerziell verfügbaren Middleware-Systemen wie PhysX® oder Algroyx. Auch im Forschungsumfeld sind Physik-Engines entstanden, die frei verfügbar sind. Beispiele hierfür sind OpenTissue, SOFA oder Cinderella. Darüber hinaus sind für Animationsprogramme proprietäre Engines, wie z. B. die Engine Digital Molecular Matter (Pixelux), entstanden. Grundlage ist hierbei ein adaptierter FEM-Ansatz, bei dem die Berechnungsvorschriften zur Laufzeit geändert werden können. Damit kann neben der Abbildung des Deformationsverhaltens beispielsweise auch das Schmelzen von Kerzenwachs animiert werden. Jedoch sind diese Ansätze je nach vorliegendem Szenario nur begrenzt echtzeitfähig und noch nicht für einen Einsatz in der Produktionstechnik qualifiziert. Die im letzten Abschnitt beschriebenen Verfahren halten zunehmend auch in den verfügbaren Engines Einzug, wobei der Reifegrad der Umsetzung für viele Anwendungsfälle aus der Produktionstechnik noch zu gering ist. Eine Entwicklungsumgebung sowie die verwendete Middleware stellen die softwaretechnische Umsetzung des zugrunde liegenden Simulationsverfahrens dar. Daher spiegeln sich die genannten Problemstellungen der Verfahren in den Softwaresystemen wider.

Eine aufwandsarme Simulation formlabiler Objekte ist auch mit spezialisierten Softwaresystemen möglich. Beispielsweise können eindimensionale Problemstellungen, wie Kabel oder Schläuche, mit den Systemen IPS Cable Simulation (fleXstructures GmbH, Fraunhofer ITWM), TEA Pipe (Samtech) oder IDO.Flexible (ESI Group) abgebildet werden. Während die Lösungen von IPS die Produkt-

entwicklung und somit die Bauteilauslegung fokussieren, sind die Ansätze der ESI Group vor dem Hintergrund einer immersiven Simulation zur Absicherung von Montagevorgängen entstanden. Demnach unterscheidet sich auch die Qualität und Rechenintensität der zugrundeliegenden Modelle. Nach Experten der Automobilindustrie ist jedoch bei beiden Ansätzen die Abbildung von Kollisionen (speziell Eigenkollisionen) sowie Reibung immer noch eine Herausforderung, die erst in den nächsten Softwareversionen verbessert wird. Aufgrund der eingeschränkten Einsatzbereiche können diese Tools nur für ausgewählte Szenarien der Verarbeitungstechnik zum Einsatz kommen. Ein breiteres Einsatzfeld ist mit dem System RecurDyn der Firma FunktionBay möglich. Neben einer Schlauchsimulation in unterschiedlichen Abstraktionsstufen (HÜTTNER 2011) können hiermit auch zwei- und dreidimensionale Objekte simuliert werden. Dabei ist ein Multi-Solver hinterlegt, der eine Kopplung einer FEM-Simulation zur Verformungsberechnung mit einer Kinematik-/MKS-Simulation ermöglicht. Jedoch ist damit nur bei einfachen Simulationsszenarien und wenigen Kontaktstellen eine Einhaltung der Echtzeitfähigkeit möglich. Die Abbildung von formlablen Objekten ist generell auch mit etablierten FEM-Systemen wie ANSYS oder COMSOL Multiphysics möglich. Auch CAD-Tools wie CATIA oder Siemens NX bieten FEM-Module an. Jedoch sind diese Systeme neben den hohen Anschaffungskosten und den Modellierungsaufwänden dadurch limitiert, dass große Verformungen, wie sie z. B. bei der Handhabung von Folien auftreten können, nicht oder nur eingeschränkt abgebildet werden können bzw. lange Rechenzeiten benötigen.

3.5.5 Fazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden unterschiedliche Verfahren zur Abbildung formlabiler Objekte dargestellt. Im Kontext dieser Arbeit sind vor allem Ansätze von Bedeutung, die eine interaktive Simulation produktionstechnischer Systeme ermöglichen. Je nach eingesetzten Verfahren differenzieren sich die erreichbare Genauigkeit der Simulation sowie der dafür notwendige Rechenaufwand. Für die Abbildung produktionstechnischer Szenarien liegen noch keine allgemeingültigen Erkenntnisse für notwendige Modellparameter vor. Darüber hinaus sind kleine Bauteilabmessungen und hohe Steifigkeiten im Modell nur schlecht abbildbar, da eine numerische Stabilität, vor allem bei FMS, nur bedingt gegeben ist. Die jeweiligen Simulationsverfahren und zugehörigen Softwaretools sind nicht vor dem Hintergrund entstanden, produktionstechnische Systeme im Zuge einer Kinematik- und Materialflusssimulation auf Anlagenebene abzusichern. Vielmehr steht entweder die realitätsnahe Visualisierung von animierten Szenen

oder die detaillierte Simulation einzelner Bauteile im Vordergrund. Daher ist ein direkter Transfer auf Problemstellungen der Produktions- und im speziellen der Verarbeitungstechnik nur eingeschränkt möglich.

3.6 Zusammenfassung des Standes der Erkenntnisse

Die aktuellen Erkenntnisse aus Forschung und Industrie im Umfeld der Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme zeigen einen bevorstehenden Paradigmenwechsel auf. Einzeldisziplinen werden sukzessive durch integrierte und funktionsorientierte Ansätze abgelöst. Dies gilt sowohl für Vorgehensmodelle und Methoden zur Vereinfachung des Entwicklungsprozesses als auch für unterstützende Software- und vor allem Simulationssysteme. Eine große Bedeutung hat hierbei die Reduktion der Modellierungsaufwände durch eine Modularisierung der zugrundeliegenden Modelle und weiteren substituierenden Ansätzen wie der physikbasierten Simulation. Durch die Qualifizierung von Physik-Engines aus dem Bereich der Computergrafik für das Anwendungsgebiet der Produktionstechnik können Teilmodelle zusammengefasst und ersetzt werden. Auch bezüglich der abbildbaren physikalischen Effekte konnten, vor allem im Bereich der Computergrafik, in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt werden. Die dargestellten Ansätze bieten ein großes Potenzial, die physikbasierte Simulation auf weitere Anwendungsfelder bei der Absicherung produktionstechnischer Systeme auszuweiten. Die diesbezüglichen offenen Handlungsfelder für einen Einsatz der physikbasierten Simulation im Zuge eines interaktiven Systementwurfs in frühen Entwicklungsphasen sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen werden im nächsten Kapitel dargestellt.

4 Resultierende Anforderungen an den Systementwurf

4.1 Kapitelüberblick und Handlungsschwerpunkte

Aufbauend auf dem aktuellen Stand der Erkenntnisse werden in diesem Kapitel Anforderungen an einen interaktiven simulationsgestützten Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme identifiziert und systematisiert. Hierbei werden zunächst in Abschnitt 4.2 die Voraussetzungen eines effizienten Systementwurfs analysiert. Die Erweiterung der physikbasierten Simulation und der zugehörigen Modellbildung werden in Abschnitt 4.3 detailliert. Nach der Vorstellung der Rahmenbedingungen für eine technische und methodische Integration in bestehende Entwicklungsumgebungen bzw. -prozesse (Abschnitt 4.4 und 4.5) rundet eine Zusammenfassung der gegebenen Anforderungen (Abschnitt 4.6) das Kapitel ab.

4.2 Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme

4.2.1 Identifikation benötigter Verarbeitungsfunktionen

Zustandsanalyse des Verarbeitungsgutes

Am Anfang eines Entwicklungsprozesses stehen die Detaillierung der gegebenen Problemstellung sowie die Ableitung von Anforderungen an das Verarbeitungssystem im Fokus. Den Ausgangspunkt stellt der abzubildende Verarbeitungsprozess dar, aus dem die einzelnen Objektzustände ermittelt werden. Im Zuge einer Neugestaltung von Systemelementen bedingt das forcierte Konstruktionsprinzip der Einfachheit (EPPL 2011) eine feingranulare Zerlegung komplexer Verarbeitungsprozesse. In der Montagetechnik werden z. B. über Verfahren wie „Assembly by Disassembly“ produktzentriert die Zustandstransformationen sowie die Struktur des Produktionssystems ermittelt. Eine diesbezügliche Adaption für Verarbeitungssysteme erfordert neben der Kombination von Einzelobjekten auch die Betrachtung von Zustandsänderungen eines Objektes, z. B. das Falten eines Kartons.

Ableitung der Systemstruktur

Durch eine geeignete Zerlegung der Verarbeitungsaufgabe soll der Komplexitätsgrad soweit reduziert werden, dass die Zustandstransformation zwischen dem vorliegenden Input und dem benötigten Output in einer mechatronischen Prinzipskizze spezifiziert werden kann. Die einzelnen Lösungsbausteine sollen nach dem Systementwurf als validierte Entwicklungssinkremente vorliegen, die zu einem

Gesamtsystem verknüpft werden können. Dazu ist eine Systemstruktur zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen notwendig. Ausgehend von Kundenanforderungen an Liefer- und Leistungsumfang müssen darüber hinaus Schnittstellen zu anderen Systemen festgesetzt werden (STETTER 2012).

Identifikation der Verarbeitungsfunktionen

Aus den Zustandsübergängen des Verarbeitungsgutes können die Verarbeitungsfunktionen sowie vorhandene Wechselwirkungen, z. B. der anlageninterne Materialfluss, abgeleitet werden. Diese müssen lösungsneutral erfasst werden, so dass keine disziplinspezifische Umsetzung impliziert wird. Zudem soll dieser Analyseschritt die Identifikation elementarer Verarbeitungsfunktionen fokussieren, welche die Kernanforderungen des Kunden und somit auch dessen Nutzen repräsentieren. Elemente des Stütz- und Hüllsystems werden in der frühen Entwurfsphase nur betrachtet, sofern Wechselwirkungen mit den Verarbeitungsfunktionen bestehen.

4.2.2 Interaktive Definition problemspezifischer Lösungsalternativen

Disziplinübergreifender Entwurf

„Ergebnis des Systementwurfs ist ein domänenübergreifendes Lösungskonzept, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts und die Art und Anordnung seiner Komponenten beschreibt“ (VDI 2206, S. 35). Eine detaillierte Betrachtung einzelner disziplinspezifischer Aspekte soll in der frühen Phase nicht erfolgen. Vielmehr liegt der Fokus auf einer Spezifikation elementarer Verarbeitungsfunktionen sowie einer disziplinübergreifenden Klärung und Festlegung der gewählten Lösung auf System- und Subsystemebene (STETTER 2012, S. 24).

Alternativ kann die Systemstruktur mit Elementen eines mechatronischen Baukastens detailliert werden. Dies wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet und auf die aktuellen Lösungsmöglichkeiten verwiesen, die ausschnitthaft in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurden.

Inkrementeller Entwurf

„Bei der Entwicklung komplexer multidisziplinärer Systeme bzw. Produkte sind häufige und kleine Verifikations- und Validierungsintervalle anzuraten, um zeit- und kostenintensive Iterationsschleifen zu vermeiden“ (LANGERMANN 2009, S. 9). Als Ergebnis des Systementwurfs sollen abgesicherte Entwicklungsartefakte vorliegen, die direkt in den weiteren Phasen detailliert werden können. Neben der Definition dieser Inkremente umfasst dies auch deren Funktionsprüfung sowie eine

Optimierung entscheidender Systembestandteile. Die Ergebnisvisualisierung muss dazu Diagnosemöglichkeiten, z. B. für Fehlfunktionen des logischen Ablaufs, bereitstellen (DIERBEN 2002, S. 12–14).

Intuitive Gestaltungselemente

Eine intuitive Definition mittels einer digitalen Hand- bzw. Prinzipskizze soll dazu dienen, die Komplexität der Modellbildung vor dem Anwender zu „verstecken“ und die Akzeptanz der neuen Methoden zu verbessern. Oftmals sind im Entwurf Einzelmodelle vorhanden. Dies erschwert die intuitive Erstellung bzw. Modifikation verknüpfter Systemelemente. Zudem erfordern aktuelle Modellierungsansätze ein umfangreiches Expertenwissen. Dem Anwender muss es somit möglich sein, „(...) möglichst ohne detaillierte Vorkenntnisse die Software bedienen und das Simulationsmodell aufstellen [zu] können“ (DIERBEN 2002, S. 65). Die Gestaltung und Modifikation der Systembestandteile durch alle Beteiligten soll die Gestaltungsfreiräume unter Einbezug unterschiedlicher Experten erweitern.

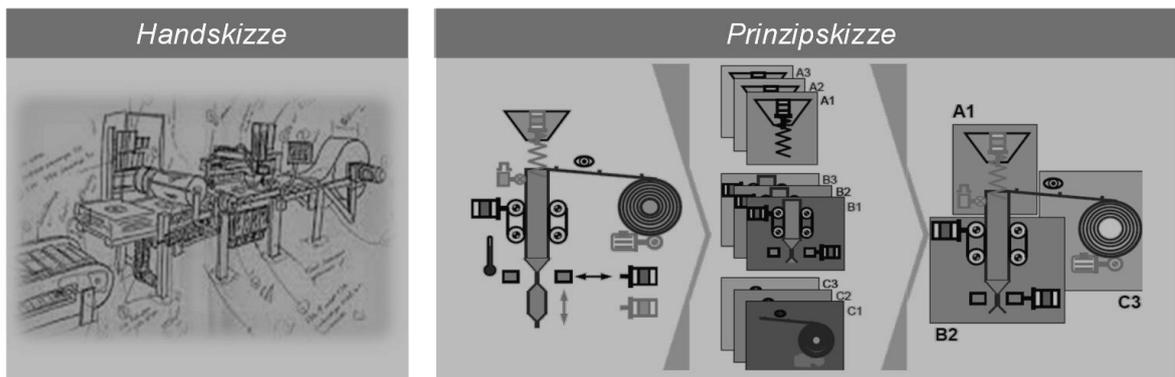


Abbildung 4.1: Exemplarische Handskizze (WETTER 2015) und Prinzipskizze (HEUCHEMER 2012).

Skalierbare Gestaltungselemente

In frühen Phasen sollen sich die notwendigen Eingaben für die Definition der Lösungsalternativen auf ein Minimum beschränken. Dazu sollen die intuitiven Gestaltungsfreiräume einer Handskizze mit dem systematischen Aufbau einer Prinzipskizze (siehe Abbildung 4.1) sowie der dynamischen Analysemöglichkeit einer Simulation kombiniert werden. Eine zugrundeliegende Syntax und Semantik muss aufgrund der Verschiedenartigkeit von Hand- und Prinzipskizzen auf die abbildbaren Elemente skaliert werden können. Dies umfasst eine Anpassung an die anwenderspezifische Ausprägung der Gestaltungselemente sowie deren Erweiterbarkeit.

Interaktion und Rückkopplung des dynamischen Systemverhaltens

Die Diskrepanz zwischen Entwicklungsfortschritt und Simulation resultiert in frühen Entwicklungsphasen aus einer hohen Änderungsdynamik. Eine parallele Ergebnisdarstellung soll bei der Gestaltung der Lösungsalternativen eine direkte Rückkopplung des dynamischen Systemverhaltens ermöglichen. Dem Anwender soll die Auswirkung der getätigten Änderungen direkt visualisiert werden. Im Zuge einer mechatronischen Entwicklung impliziert dies eine disziplinübergreifende Absicherung der Systemelemente.

Automatische Modelltransformation

Eine Rückkopplung des dynamischen Systemverhaltens wird dadurch erschwert, „(...) dass sich der Einsatz von Modellen bzw. Simulation in der frühen Entwicklungsphase, bedingt durch die geringe Systemkenntnis und entsprechend wenigen Daten, als kompliziert erweist“ (LANGERMANN 2009, S. 9). Daher muss eine einfache bzw. automatische Übertragung der skizzierten Modelle in ein ausführbares Simulationsmodell erfolgen, das zur Laufzeit des Entwurfsprozesses ausgewertet werden kann.

Dokumentation und Reproduzierbarkeit des Systementwurfs

„Bei [der] Dokumentation des Systementwurfs sollte darauf geachtet werden, Darstellungen zu verwenden, die sowohl von mechanisch orientierten Entwicklern als auch von Softwareentwicklern nachvollziehbar sind“ (VDMA 2006, S. 21). Die Systemelemente und das simulierte Systemverhalten sollen daher während des Systementwurfs für die beteiligten Entwickler in einem gemeinsamen Modell visualisiert werden. Dazu muss die Integration unterschiedlicher, disziplinspezifischer Sichten möglich sein, wobei die Erfüllung der vom Kunden geforderten Funktionalität im Vordergrund steht.

4.3 Erweiterung der physikbasierten Simulation

4.3.1 Modelle zur Abbildung von Verarbeitungsprozessen

Modelle zur Abbildung von Verarbeitungsgütern

Innerhalb der Simulation sollen unterschiedliche Gutgruppen wie Strang-, Faden-, Flachform-, Stück-, Schüttgut und pastöses Gut sowie Flüssigkeiten³⁴ abgebildet

³⁴ Die Simulation von Fluiden wird in dieser Arbeit nicht vertieft. Dennoch soll die Methodik so gestaltet sein, dass die diesbezüglichen Simulationsverfahren aufwandsarm integriert werden können.

werden. Die Vielzahl an Objekten und Anlagenbestandteilen bedingen Schemata, welche die Objektabhängigkeiten definieren (DIERßEN 2002, S. 37–38). Verarbeitungssysteme sind durch ihr dynamisches kinematisches Verhalten geprägt. Zugehörige Simulationsmodelle müssen neben dem Objektverhalten, das aus den Materialeigenschaften resultiert, auch die Wechselwirkungen wie Fremd- und Eigenkollision, Kontaktberechnung mit Reibung und Stoß abdecken, die dynamisch oder statisch vorliegen können.

Modelle zur Abbildung von formlabilen Bauteilverhalten

Im Bereich der Verarbeitungstechnik, vor allem in der Verpackungstechnik, ist das Verhalten formlabiler Objekte innerhalb der Anlage oftmals schwer prognostizierbar. Neben Starrkörpern soll eine Simulation von Verarbeitungsmaschinen somit auch formlabiles Verhalten sowie Effekte wie Bruch, Reißen oder Trennvorgänge hinreichend genau abbilden können. Dies ist für Geometrien im ein-, zwei- und dreidimensionalen Fall erforderlich. Darüber hinaus stellen die in Abschnitt 2.5 dargestellten Merkmalsklassen Anforderungen an die abbildbaren Effekte bei der Simulation formlabiler Objekte. Um die Deformationen echtzeitfähig zu berechnen, muss bei struktureller und numerischer Stabilität die notwendige Zeit der Berechnung kleiner als die dynamischen Zeitkonstanten der Simulation sein (KUHN 1997, S. 11). Zusätzlich muss bei Bedarf die Abbildungsgenauigkeit des Objektverhaltens erhöht werden können.

Modelle zur Abbildung von Verarbeitungsfunktionen

Die dem simulationsgestützten Entwurf zugrundeliegenden Modelle müssen die vorliegenden Verarbeitungsprozesse und somit die Wirkpaarungen Trennen, Fügen, Formen, Speichern, Dosieren, Fördern sowie Ordnen (vgl. Abschnitt 2.2.2) durch spezifische Modellelemente oder deren Kombination realisieren können. Dabei sollen Modelle „(...) so einfach wie möglich und nur so detailliert wie nötig sein“ (KÜHN 2006, S. 45), um die Interaktivität bei einer hohen Aussagekraft der Simulation zu gewährleisten. Dadurch soll das Wissen über die Anlagentechnik sowie deren Wechselwirkung mit dem Prozessgut maximiert werden.

Qualität der Simulationsergebnisse

In der frühen Phase hat das zeitliche Verhalten der Simulation eine höhere Gewichtung, um im Zuge des Systementwurfs eine schnelle Einschränkung des Lösungsraumes auf kundenoptimale Lösungen vorzunehmen. Die Simulation des Anlagenmodells mit den funktionalen und zeitlichen Beziehungen aller Aktoren und Sensoren (DIERßEN 2002, S. 8) sowie der Verarbeitungsgüter ist sehr berechnungsintensiv. Um Ergebnisse in Echtzeit zurückzugeben, ist es daher notwendig, eine

möglichst effiziente Berechnung mit hoher Zeitschritt toleranz unter stabilen Bedingungen zu gewährleisten. Die Genauigkeit der Berechnung muss dabei hinreichend exakt bleiben (DIERBEN 2002, S. 68), um eine Aussage über das Systemverhalten auf Anlagen- und Steuerungsebene ableiten zu können. Darüber hinaus müssen die unter Abschnitt 2.3.4 dargestellten Qualitätskriterien für die Simulation von Produktionssystemen eingehalten werden. Die Simulation soll qualitativ plausible Ergebnisse liefern (KUHN 1997, S. 11), die eine Einschätzung der Funktionserfüllung ermöglichen. Bezüglich der Genauigkeit sind vor allem die Materialparameter sowie zugehörige Ersatz- oder Näherungsmodelle entscheidend. Diese sind so zu gestalten, dass auch formlabile Objekte mit höheren Steifigkeiten (z. B. Bleche) abgebildet werden können. Die echtzeitfähige Darstellung im Rahmen einer interaktiven Simulation limitiert die Anzahl der Simulationsobjekte, die bei einer Bildfrequenz von 60Hz³⁵ noch hinreichend genau dargestellt werden können.

Phasenübergreifender Einsatz der Modelle

Um einen phasenübergreifenden Einsatz der Modelle zu ermöglichen, müssen die Modelle auf den Anwendungsfall skaliert werden können. Dafür ist eine Abwägung hinsichtlich der abbildbaren physikalischen Genauigkeit und dem Zeitverhalten notwendig, aus der sich die Größe des abbildbaren Szenarios ergibt. Daher sind Modellierungsansätze nötig, die auch für eine Abbildung detailliert ausgestalteter Verarbeitungsszenarien, z. B. im Zuge einer späteren VIBN, transferierbar sind.

4.3.2 Adaption und Erweiterung von Modellbildungsprozessen

Erstellung der physikbasierten Modelle

Zur Abbildung der im vorangegangenen Absatz spezifizierten physikbasierten Modelle müssen bestehende Modellbildungsprozesse erweitert bzw. angepasst werden. Mit den resultierenden Modellbildungsprozessen müssen alle möglichen Bestandteile einer physikbasierten Simulation erstellt werden können.

Verknüpfung von Systementwurf und Simulationsmodell

Die Verknüpfung von Systementwurf und Simulationsmodell erfordert Verfahren, um die Elemente einer Prinzipskizze aufwandsarm in ein physikbasiertes Modell zu transferieren. Gemäß dem Ansatz „Easy-to-Use“ soll der Anwender nicht mit der Modellbildung beschäftigt sein, sondern sich auf die Definition der Systemelemente

³⁵ Dies entspricht der Bildwiederhol frequenz von gängigen Visualisierungssystemen und erfüllt bei einem Großteil der Anwendungsfelder die Anforderungen an eine rechtzeitige Aktualisierung des Systemeingangsbildes der Steuerung.

in einer digitalen Skizze fokussieren. Eine einfache Modellanwendung, eine Anpassung des Konkretisierungsgrades und des Beschreibungsumfangs stellen weitere Grundvoraussetzungen dar (NEUHAUSEN 2001, S. 54). Im Zuge des mechatronischen Systementwurfs müssen die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Elementen automatisch erkannt und ein entsprechendes Verhalten in der Simulation hinterlegt werden. Beispielsweise ergibt ein Antrieb in Kombination mit einem Geometrieelement einen Aktor, der von einer Logik angesteuert werden kann. Dabei werden jedoch Details, wie Getriebestufen nicht abgebildet, da die Modellkomplexität bei Einhaltung der Echtzeitdarstellung die Berechnungsmöglichkeiten der Simulation nicht übersteigen darf (DIERBEN 2002, S. 37–38).

Automatische Modellbildung

Eine intuitive Eingabe der Modelldaten erfordert parallel zum Entwurfsprozess eine kontinuierliche Analyse der Prinzipskizze. Die darauf aufbauende Modellbildung muss mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad erfolgen, so dass der kreativ-synthetische Entwurfsprozess nicht gehindert wird. Die Erstellung der Physikmodelle darf daher nicht mehr am Ende der Modellbildung erfolgen, sondern muss während der Eingabe der Systemdaten kontinuierlich aktualisiert werden. Um den Modellierungsaufwand für den Anwender zu minimieren, muss die notwendige Modellreduktion sowie die Vernetzung in Abhängigkeit der Geometriekomplexität oder der Aufbau eines Ersatzmodells möglichst automatisch erfolgen. Die Parametrierung der Modelle soll anhand vordefinierter Werte erfolgen, die im Entwurfsprozess durch den Anwender angepasst werden können, um gezielt auf die Toleranz-, Kollisions- und Bewegungsanalyse des Verarbeitungssystems Einfluss nehmen zu können. Da die initiale Transformation der Modelldaten in ausführbare Simulationsmodelle nicht mit einer Verzögerung behaftet ist, kann die Interaktivität verbessert werden. Dennoch soll es dem Anwender möglich sein, zu einem späteren Zeitpunkt gezielt Parameter oder Geometrien des Modells sowie dessen Ausprägungen im Detail modifizieren bzw. optimieren zu können.

Skalierbarkeit der Modelle

Die Modellbildung muss eine Skalierung und Modularisierung der physikbasierten Modelle unterstützen, so dass die Simulation aufwandsarm an geänderte Rahmenbedingungen angepasst werden kann. Dafür sind Verfahren nötig, die trotz der Restriktionen bezüglich der Größe von Simulationsszenarien die Verknüpfung von Einzelmodellen in einer Systemsimulation ermöglichen.

4.4 Technische Integration in Entwicklungsumgebungen

Schnittstellen zu nachgelagerten Entwicklungsumgebungen

Um eine erfolgreiche Integration in Entwicklungsumgebungen zu vereinfachen, sollte soweit als möglich auf bestehenden Verfahren aufgebaut werden. Dies gilt maßgeblich für die im vorangegangenen Abschnitt spezifizierten Modelle und deren Modellbildung. Um der industriellen Diversität der Entwicklungswerkzeuge gerecht zu werden, müssen die Entwicklungsartefakte in bestehende Werkzeugketten transferiert werden können, die je nach mechatronischem Reifegrad der Firmen unterschiedlich ausgeprägt sind. Eine Schnittstelle muss daher von einer manuellen Datenverwaltung bis hin zu einer vollautomatischen Integration in mechatronische PDM-Systeme skalierbar sein, wie es die (VDI 2249, S. 19–20) am Beispiel der mechanischen Modellierung beschreibt.

Datenkonsistenz im Entwicklungsprozess

Die im Systementwurf definierten Entwicklungsartefakte müssen konsistent über den Entwicklungsprozess an den notwendigen Prozessschritten verfügbar sein und weiterentwickelt werden können. „Deshalb muss im Sinne eines schlanken Modell-aufbaus beim mechatronischen Entwicklungsprozess durch organisatorische oder informationstechnische Maßnahmen eine hohe Datenkonsistenz sichergestellt werden“ (WÜNSCH 2008, S. 70; vgl. auch LANGERMANN 2009, S. 9).

Technische Voraussetzungen

Der Implementierungsaufwand der informationstechnischen Schnittstellen soll gering sein sowie eine aufwandsarme Anpassung und Erweiterung ermöglichen. Da bei KMU meist nur eingeschränkte Ressourcen zur Verfügung stehen, muss die technische Integration mit geringen zusätzlichen Investitionskosten realisierbar sein. Somit müssen die Hard- und Softwareanforderungen für ein unterstützendes Softwaresystem (CPU-Leistung, Speichergröße, etc.) derart beschränkt sein, dass eine interaktive digitale Prinzipskizze mit verfügbaren Mitteln oder mit geringen Anschaffungskosten realisierbar ist.

4.5 Methodische Integration in Entwicklungsprozesse

Prozessmodell zum simulationsgestützten Systementwurf

„Erfolg besteht darin, dass man genau die Fähigkeiten hat, die im Moment gefragt sind“³⁶. Dies spiegelt sich auch in der Gestaltung des Projektteams wider. Die starre

³⁶ Henry Ford, zitiert nach Wirtschaftszitate (2016).

Sequenz der Disziplinen ist durch einen übergreifenden mechatronischen Ansatz zu ersetzen (WEYRICH & STEDEN 2011). Demzufolge sollte der Systementwurf so gestaltet sein, dass alle relevanten Disziplinen an der Konzeptdefinition beteiligt sind. Darüber hinaus sind Mitarbeiter des Vertriebs und der Projektierung zu berücksichtigen, die in den frühen Phasen das Bindeglied zum Kunden bilden und bei der Definition der Anforderungen an die Verarbeitungsfunktionen eine wesentliche Rolle spielen. Die Methodik muss für alle Prozessbeteiligten ein klares Rollenbild beinhalten, das neben den Voraussetzungen bezüglich des Fähigkeitsprofils deren Beitrag im Rahmen des Systementwurfs definiert. Der inkrementelle Entwurf muss durch ein Prozessmodell unterstützt werden, so dass Produktinkremente abgesichert an den nächsten Entwicklungsschritt übergeben werden. Mechatronische Entwurfsrichtlinien sollen dabei sicherstellen, dass eine Lösung unter Einbezug aller Disziplinen erstellt wird. Dies soll jedoch nicht den Ausschluss einer rein disziplinspezifischen Lösung zur Folge haben, sofern diese ein Gesamtoptimum darstellt.

Schnittstellen zu bestehenden Vorgehensmodellen

Die Anforderungen zur methodischen Integration beinhalten neben der Aufbauorganisation auch Aspekte der Ablauforganisation (WÜNSCH 2008, S. 69–78). Diese sind im industriellen Umfeld durch Vorgehensmodelle oder Projekthandbücher definiert, die ein Rahmenwerk für spezifische Arbeitsschritte darstellen. Da die Methodik dieser Arbeit vor allem den Systementwurf fokussiert, muss eine Integration in die überlagerten Vorgehensmodelle erfolgen und eine klare Schnittstelle zu weiteren Prozessschritten gestaltet werden.

Skalierbarer Einsatz der Entwurfsmethodik

Unter Betrachtung der in Abschnitt 3.3.4 referenzierten Reifegradmodelle für eine mechatronische Entwicklung müssen neue Ansätze bezüglich der aktuell vorliegenden sowie auch der strategisch geplanten Organisationsform skalierbar gestaltet sein. Die Aufbau- und Ablauforganisation eines interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs muss daher unabhängig von der aktuellen Unternehmenssituation einsetzbar sein bzw. Ausbaustufen bei der Umsetzung mit berücksichtigen.

4.6 Zusammenfassung der Handlungsschwerpunkte

Zu Beginn der Entwicklung steht die Identifikation der benötigten Verarbeitungsfunktionen im Vordergrund. Aus dem Verarbeitungsprozess sowie den daraus resultierenden Zuständen der Güter kann unter Berücksichtigung weiterer nicht-

funktionaler Anforderungen die Systemstruktur abgeleitet werden. Diese stellt die Relation einzelner Objektzustände dar und bildet die Basis zur Identifikation der Verarbeitungsfunktionen, die diese Zustandstransformation ermöglichen. Darauf aufbauend bildet die interaktive Definition problemspezifischer Lösungsalternativen einen weiteren Handlungsschwerpunkt. Zur Reduktion der Komplexität ist ein Entwurf in Inkrementen anzustreben. Diese in sich abgeschlossenen und funktionsfähigen Einheiten vereinen Bestandteile aller Disziplinen. Intuitive Gestaltungselemente, die sich auf die Bedürfnisse der Anwender skalieren und anpassen lassen, sollen dabei den kreativ-synthetischen Entwurfsprozess unterstützen. Die Gestaltungselemente dienen nicht nur der Dokumentation des Systementwurfs, sondern sind auch die Grundlage einer Systemsimulation, die parallel zum Entwurfsprozess automatisch erstellt wird und durch eine direkte Rückkopplung des dynamischen Systemverhaltens einen interaktiven Entwurfsprozess ermöglicht.

Zur Abbildung der fokussierten Verarbeitungsprozesse sind Erweiterungen der physikbasierten Simulation notwendig. Zusätzliche Modellelemente sollen die Abbildung der benötigten Verarbeitungsfunktionen erleichtern. Neben spezifischen Charakteristika von Verarbeitungsgütern ist auch das formlabile Objektverhalten entscheidend für den Einsatz der Simulation. Die Modelle müssen dabei ein für den Anwendungsfall hinreichend genaues Objektverhalten bereitstellen. Aufgrund der geforderten Datenkonsistenz und der über den Verlauf einer Entwicklung variierenden Qualitätskriterien müssen die verwendeten Modelle für einen phasenübergreifenden Einsatz skaliert werden können. Diese Skalierung spiegelt sich auch in den zugehörigen Modellbildungsprozessen wider. Neben einer automatischen Modellbildung, die maßgeblich die Verknüpfung der Entwurfsdokumente und der Simulationsmodelle realisiert, ist vor allem die Erstellung der erweiterten physikbasierten Modelle prägend.

Der Erfolg einer neuen Methode zeichnet sich dadurch aus, dass der Transfer in die industrielle Anwendung gelingt. Dies ist einerseits von der technischen Integration in Entwicklungsumgebungen abhängig. Neben allgemeinen technischen Voraussetzungen sind die Schnittstellen zu nachgelagerten Entwicklungsumgebungen und somit auch die Sicherung der Datenkonsistenz im Entwicklungsprozess entscheidend. Andererseits soll über ein Prozessmodell zum simulationsgestützten Systementwurf und dessen Eingliederung in bestehende Vorgehensmodelle die methodische Integration erfolgen. Dabei sind zusätzlich die gegebenen sowie die zukünftigen organisatorischen Rahmenbedingungen der Unternehmen zu beachten.

5 Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Systementwurf

5.1 Kapitelüberblick und Darstellung des Gesamtkonzepts

Um den im letzten Kapitel dargestellten Herausforderungen zu begegnen, wird im Folgenden eine Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Systementwurf dargestellt, deren Bestandteile jeweils einen maßgeblichen Handlungsschwerpunkt fokussieren. Die Methodik substituiert dabei Phasen bestehender Vorgehensmodelle, wie es am Beispiel des Quality-Gate-Modells der Mechatronik in Abbildung 5.1 dargestellt ist.

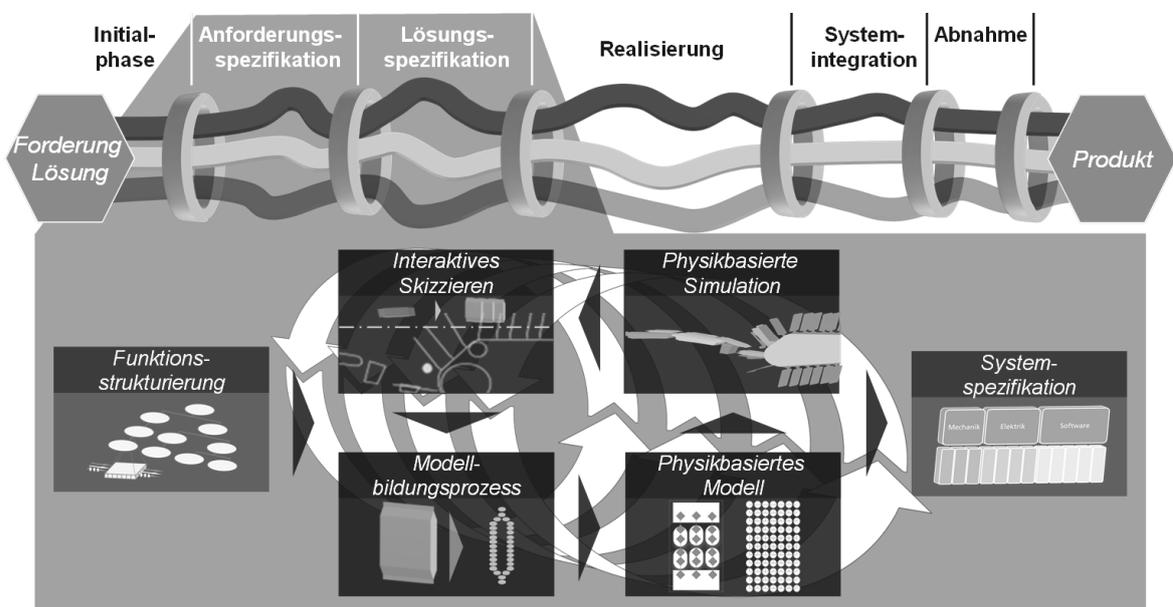


Abbildung 5.1: Überblick der Methodik zum interaktiven und simulationsgestützten Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme³⁷.

Die erarbeitete Methodik hat das Ziel, das Verarbeitungssystem ausgehend von bestehenden Anforderungen zu entwerfen. Das Ergebnis ist eine Spezifikation des Systems, in der alle zur Realisierung der identifizierten Verarbeitungsfunktionen benötigten Systembestandteile zusammengefasst sind. Der forcierte inkrementelle Entwurf anhand einer digitalen mechatronischen Skizze vereint Vorteile eines modell- und simulationsgestützten Entwicklungsprozesses mit den intuitiven Gestaltungsmöglichkeiten einer Handskizze, die zusätzlich die Wechselwirkungen

³⁷ Darstellung des Quality-Gate-Modells in Anlehnung an GEISBERGER & SCHMIDT (2004) und VDMA (2006).

eines Verarbeitungssystems mit berücksichtigt. Ausgehend von einer Strukturierung der benötigten Verarbeitungsfunktionen werden Funktionen oder Funktionsgruppen entworfen, die ein Inkrement repräsentieren. Der Entwurf erfolgt dabei in einer digitalen mechatronikorientierten Skizzierumgebung. Die Interaktivität resultiert im Entwurfsprozess daraus, dass dem Entwickler online im Skizzierprozess ein physikbasiertes Simulationsmodell bereitgestellt wird, mit dessen Hilfe die skizzierten Systemelemente und deren Wechselwirkungen mit den Verarbeitungsgütern ohne weitere Aufwände zur Modellbildung direkt im Entwurfsprozess simulativ analysiert werden können. Der Kreislauf des Skizzierens, der automatischen Transformation in physikbasierte Modelle sowie der darauf aufbauenden Simulationsstudie wird zyklisch durchlaufen, bis alle Elemente der Funktionsstruktur als abgesicherte Entwurfsinkremente vorliegen und in einer Systemspezifikation zusammengefasst werden können.

Während in den vorangegangenen Kapiteln die unterschiedlichen Aspekte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme Top-down betrachtet wurden, erfolgt die Darstellung der Teilbereiche der entwickelten Methodik Bottom-up. Die physikbasierten Modelle (Abschnitt 5.2) und die zugehörige Modellbildung (Abschnitt 5.3) stellen die Voraussetzung für die Realisierung eines interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs dar. Die Abbildung formlabilen Bauteilverhaltens sowie unterschiedlicher Gutgruppen und Verarbeitungsfunktionen ist neben der diesbezüglichen Adaption des Modellbildungsprozesses im Fokus dieser Teilkonzepte, um den Entwurf eines Verarbeitungssystems effizient zu unterstützen. In den beiden Abschnitten werden auch Aspekte beschrieben, die nicht zwingend im Verlauf des Systementwurfs notwendig sind, aber einen Ergebnistransfer auf spätere Phasen ermöglichen.

Zum aufwandsarmen Entwurf wurde eine Skizziertechnik definiert, deren Semantik und Syntax in Abschnitt 5.4 erläutert werden. Diese kann in einer digitalen mechatronikorientierten Skizzierumgebung zur Gestaltung verarbeitungstechnischer Funktionen eingesetzt werden, die in frühen Entwicklungsphasen den kreativ-synthetischen Entwurfsprozess mittels Handskizzen ersetzt und gleichzeitig eine Möglichkeit zur online-Eigenschaftsabsicherung durch Verwendung der vorab beschriebenen Physikmodelle bietet. In diesem Zuge werden auch der Ablauf der Skizzeninterpretation sowie Schnittstellen zu Entwicklungsumgebungen dargestellt.

Neben der Detaillierung eines Prozessmodells werden in Abschnitt 5.5 die notwendigen Voraussetzungen für eine effiziente Anwendung der entwickelten Entwurfsmethodik beschrieben. Die entwickelten Methoden werden hinsichtlich der

methodischen Integration in bestehende Entwicklungsprozesse detailliert und in das Gesamtkonzept sowie dessen Systemstruktur integriert.

5.2 Physikbasierte Modelle verarbeitungstechnischer Systeme

5.2.1 Übersicht des Teilkonzeptes

Als Grundlage des simulationsgestützten Entwurfsprozesses ist eine Erweiterung der physikbasierten Simulation notwendig. Abbildung 5.2. zeigt einen Überblick der entwickelten Ansätze. Die Erweiterung zur Simulation formlabiler Objekte erfolgt einerseits durch bestehende Objekttypen in Physik-Engines, die für einen Einsatz zur Simulation produktionstechnischer Szenarien analysiert, adaptiert und qualifiziert wurden. Andererseits kommen neu entwickelte Ansätze auf der Basis diskreter Volumenelemente zum Einsatz, die aus einer Kombination bestehender Objekt- und Gelenktypen resultieren. Die Notwendigkeit dieser diskreten Volumenelemente ist darin begründet, dass mit Physik-Engines nur ein homogenes Objektverhalten abbildbar ist. Somit sind neue Ansätze notwendig, mit denen eine lokale Adaption der Materialeigenschaften möglich ist.

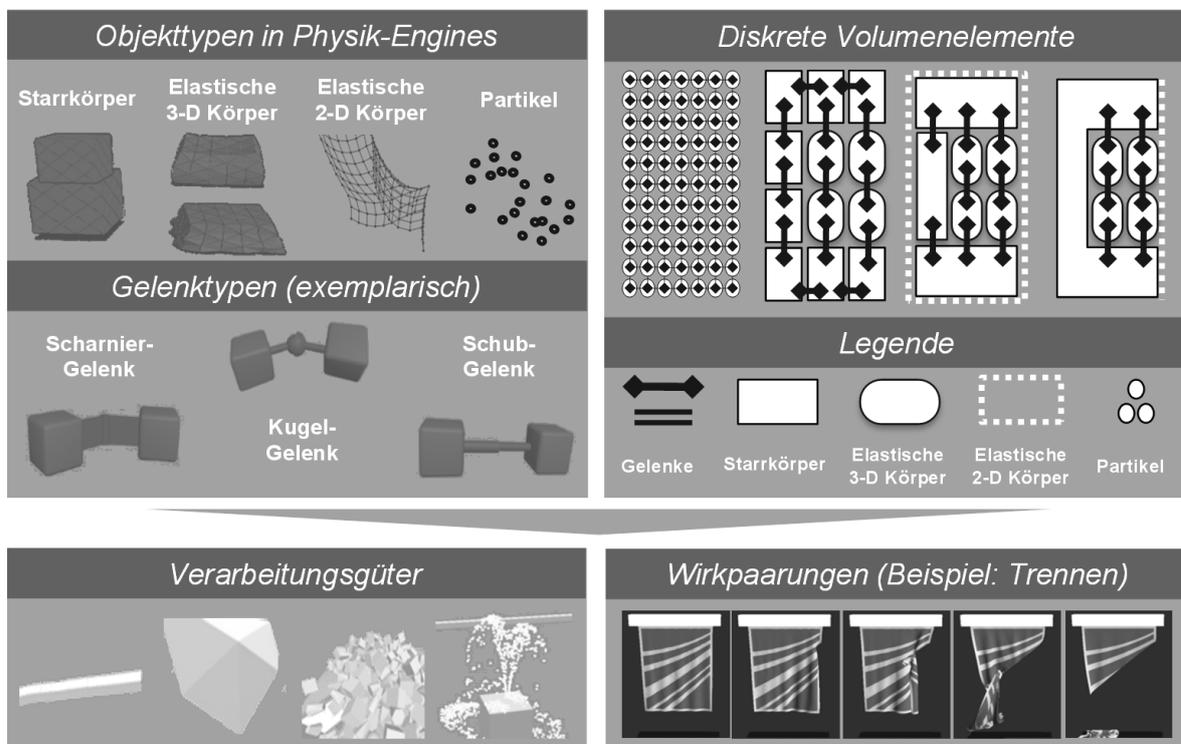


Abbildung 5.2: Erweiterung physikbasierter Modelle zur Simulation formlabiler Objekte und Abbildung verarbeitungstechnischer Güter sowie Wirkpaarungen.

Neben den Gutgruppen Strang-, Stück- und Schüttgut, die formstabil und formlabiles Verhalten aufweisen können, ist auch die Abbildung von Fluiden relevant. Diese werden jedoch nur ausschnitthaft betrachtet und über Partikelsysteme abstrahiert. Darüber hinaus werden Methoden zur Simulation der verarbeitungstechnischen Wirkpaarungen, wie z. B. Trennen, definiert, die zu einer vollständigen Abbildung von Verarbeitungssystemen notwendig sind.

Ziel der nachfolgenden Abschnitte ist nicht die Vorgabe spezifischer Modellcharakteristika und -parameter. Vielmehr werden die Einsatzpotenziale der physikbasierten Simulation von Verarbeitungssystemen ermittelt und ein Vorgehen für eine problemspezifische Detailbestimmung der Simulationsparameter dargestellt, das auch auf andere Physik-Engines und Problemstellungen übertragbar ist. Für die Abbildung von Starrkörperobjekten, die ebenfalls dafür notwendig sind, wurden die Arbeiten von SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012) adaptiert.

5.2.2 Formlabiles Objektverhalten mit bestehenden Physik-Engines

Physik-Engines bieten prinzipiell zwei Möglichkeiten, um formlabile Objekte abzubilden: sogenannte Cloth- und Softbodies. Erstere werden hauptsächlich für die Simulation zweidimensionaler Objekte wie Textilien verwendet. Innerhalb der Physik-Engines können eine Vielzahl von Parametern eingestellt werden. Beispiele sind die Dicke des Kollisionsmodells oder Steifigkeiten. Darüber hinaus haben die Objektgeometrie und zugehörige Einstellungen, wie die Vernetzung der Modelle, einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Gleiches gilt auch für Softbodies zur Abbildung von dreidimensionalen formlabilen Objekten. Für die Definition der Objekteigenschaften sind weitere Parameter, wie die Volumensteifigkeit oder Dämpfungswerte, anzugeben. Darüber hinaus existieren Enginespezifische Parameter, sogenannte Flags, mit denen zusätzlich Einfluss auf das Verhalten der Modelle genommen werden kann.

Aufgrund des Einsatzgebietes der Physik-Engines in der Spielebranche und Animationstechnik fokussieren die Ansätze aus der Computergrafik eine schnelle Berechnung und Visualisierung der Objektverformung. Um dies zu erreichen, sind die Berechnungsalgorithmen bezüglich ihrer physikalischen Exaktheit abstrahiert. Die abgebildeten Szenarien erscheinen realitätsnah, jedoch werden keine Materialeigenschaften wie bei einer FEM-Simulation angegeben, sondern Parameter eines abstrahierten Modells. Die Integration von Physik-Engines in Entwicklungs- und Simulationsumgebungen bedarf einer Analyse der einstellbaren Parameter sowie

deren Auswirkung auf das Systemverhalten. Abbildung 5.3 zeigt ein Vorgehen zur Analyse und Qualifikation von Physik-Engines.

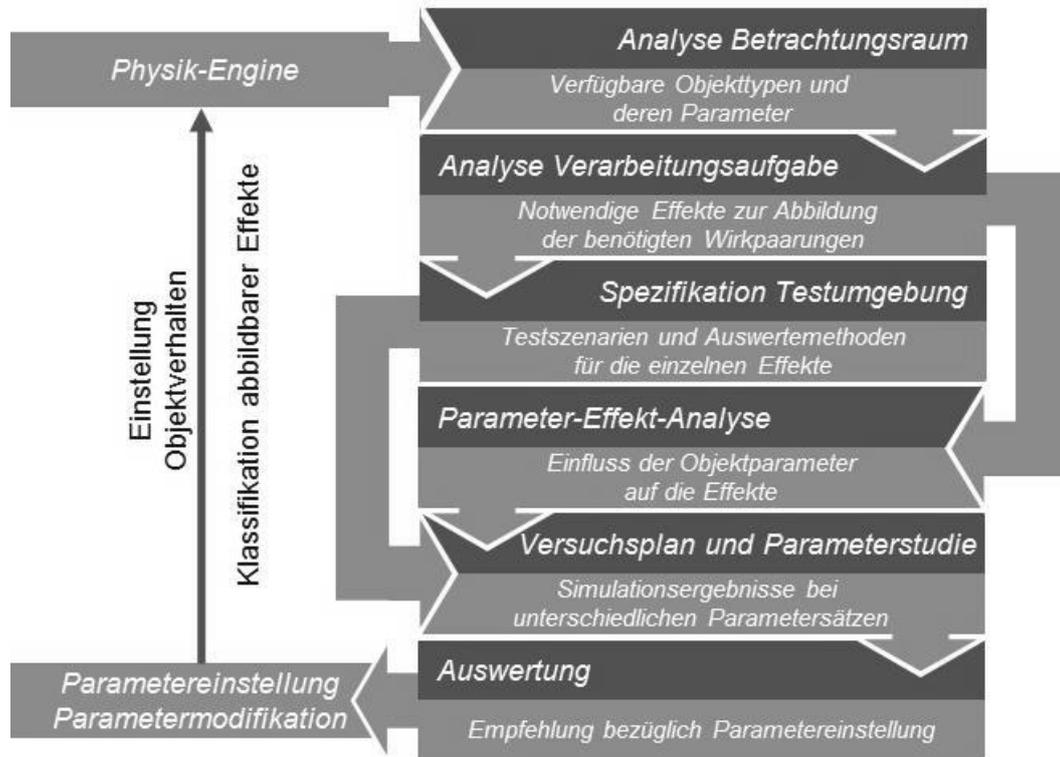


Abbildung 5.3: Vorgehen zur Analyse und Qualifikation von Physik-Engines zur Abbildung formlabiler Objekte in Verarbeitungssystemen.

Die einzelnen Schritte werden im Nachfolgenden detailliert und am Beispiel eines Softbodys der Engine PhysX® erläutert, mit dem exemplarisch ein Verpackungsgut abgebildet wird. Das Vorgehen kann gleichermaßen auch auf Clothbodies, Starrkörper oder andere vorhandene Objekt- bzw. Gelenktypen einer Physik-Engine angewandt werden und ist auf andere Engines wie z. B. Havok®, Bullet oder ODE übertragbar.

Das Vorgehen zur Analyse und Qualifikation von Physik-Engines wird nicht im Zuge des Systementwurfs durchlaufen. Die diesbezüglichen Prozessschritte sind lediglich notwendig, wenn neue Materialien bzw. Materialpaarungen, spezifische Eigenschaften von Verarbeitungsgütern bzw. Wirkpaarungen oder neue Physik-Engines qualifiziert werden müssen. Im Zuge des Systementwurfs wird auf ermittelte Werte zurückgegriffen, die entweder durch den Anwender ausgewählt oder als Standard für die Modellparametrierung hinterlegt sind.

Analyse Betrachtungsraum: Im ersten Schritt wird der fokussierte Objekttyp der definierten Physik-Engine analysiert. Ziel ist es hierbei, die beeinflussbaren Größen

des Modells zu identifizieren, die in der späteren Analyse untersucht werden. Eine beispielhafte Übersicht einer Modellbeschreibung ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Neben dem Tetraeder-Netz der Objektgeometrie und den Softbody-Parametern können hierbei auch sogenannte Flags definiert werden, die spezifisches Objektverhalten als binäre Größen aktivieren bzw. deaktivieren. Als Datenbasis für die Analyse des Betrachtungsraums kann die Dokumentation der Engine bzw. des zugehörigen Software Developer Kits (SDK, z. B. PhysX® SDK 2.8.1) herangezogen werden.

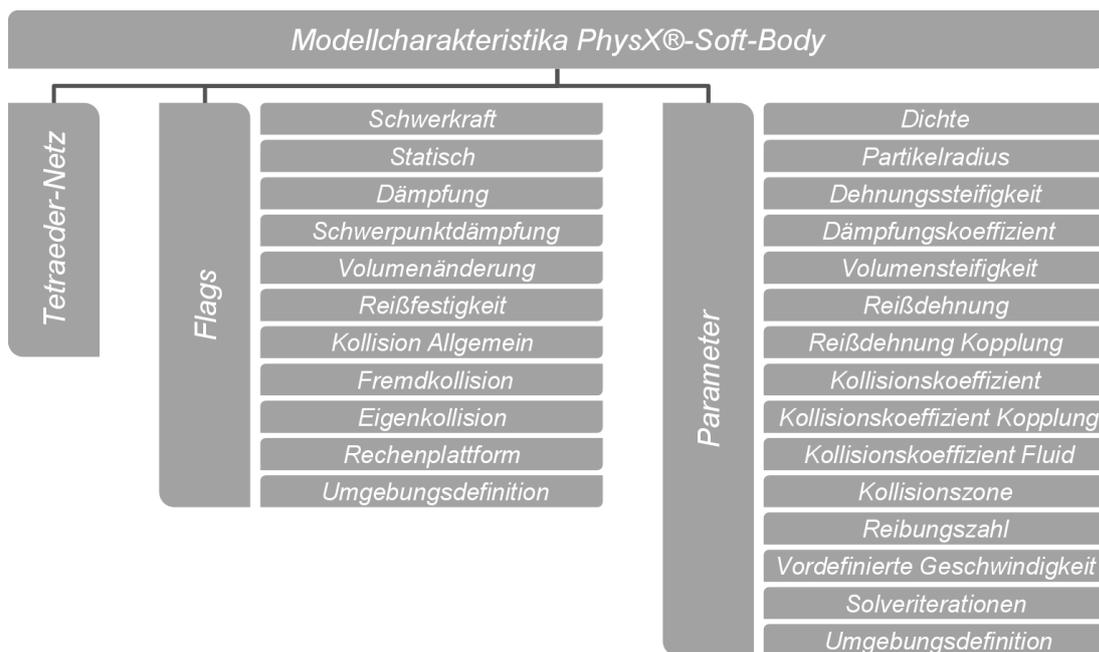


Abbildung 5.4: Charakteristika eines Softbodys am Beispiel NVIDIA PhysX®.

Analyse Verarbeitungsaufgabe: In einem zweiten Schritt werden die Effekte identifiziert, die zur Abbildung der Verarbeitungsaufgabe notwendig sind. Im gewählten Beispiel ist dies das Verformungsverhalten im Verlauf der Handhabung. Darunter fallen das Verhalten bei Biege-, Torsions-, Zug- und Druckbeanspruchung sowie der Einfluss der Dämpfung. Darüber hinaus müssen statische und dynamische Reibung sowie Eigen- und Fremdkollision mit unterschiedlichen Objekttypen abgebildet werden.

Spezifikation Testumgebung: Weiterführend wird definiert, wie die Analyse der einzelnen Effekte im Rahmen der Parameterstudie erfolgt. Dies wird im Vorfeld der Parameter-Effekt-Analyse festgelegt, um eine ergebnisneutrale Definition der Testumgebung sicherzustellen. Neben der Spezifikation des Versuchsaufbaus wird bereits die Art der Auswertung festgelegt. Prinzipiell kommen eine analytische

Berechnung, ein Vergleich mit anderen validierten Simulationsergebnissen bzw. Normversuchen oder ein Abgleich mit realen Versuchen in Frage. Letzteres wird vornehmlich eingesetzt, wenn die Materialeigenschaften des abzubildenden Objektes nur eingeschränkt bekannt sind, wie z. B. bei einem Materialmix.

Parameter-Effekt-Analyse: Vor der Parameterstudie werden zunächst die zu variierenden Parameter der einzelnen Testszenarien charakterisiert. Dabei sind die im ersten Schritt identifizierten Elemente der Modellbeschreibung hinsichtlich ihrer genauen Bedeutung, des Wertebereichs sowie definierter Initialwerte zu analysieren und der Einfluss auf die abzubildenden Effekte zu schätzen. Nachfolgend werden exemplarisch die Einstellmöglichkeiten eines Softbodies in PhysX® analysiert, die einen Einfluss auf die fokussierten Effekte haben.

Die Geometrie eines Softbodies wird über ein Tetraeder-Netz repräsentiert, das aus der ursprünglichen Objektgeometrie abgeleitet ist. Ziel sollte eine detailgetreue Abbildung und somit eine möglichst hohe Auflösung sein. Dies führt zu höheren Berechnungsaufwänden und kann die Echtzeitdarstellung der Simulationsergebnisse einschränken. Eine *Polygonreduktion*³⁸, bei der eine entsprechende Anzahl an Vertices gelöscht und das Objekt bei Bedarf neu vernetzt wird, kann zu einer Verbesserung der Berechnungseffizienz, jedoch auch zu einer Inhomogenität des Modells, führen. Je nach geometrischer Form resultieren daraus Fehler in der äußeren Kontur, die sich auf die Kollision mit anderen Simulationsobjekten auswirkt. Darüber hinaus stützt sich die Abbildung des Materialverhaltens auf das Polygonnetz. Eine diesbezügliche Inhomogenität kann somit zu lokalen Unterschieden der Objekteigenschaften führen.

Da die Simulation des dynamischen Verhaltens bei formlabilen Objekten sehr rechenintensiv ist, wurden Parameter definiert, die es ermöglichen, Eigenschaften in der Simulation gezielt zu- oder abzuschalten. Diese sogenannten *Softbody-Flags* müssen daher je nach Anwendungsfall eingestellt werden. Erst dann haben die weiterführenden Softbody-Parameter eine Auswirkung auf das Objektverhalten. Bezugnehmend auf den Effekt *Fremdkollision mit Starrkörper* müssen beispielsweise der Flag *statisch* deaktiviert sowie die Flags *Schwerkraft*, *Kollision Allgemein* und *Fremdkollision* aktiviert sein.

Neben dem Polygonnetz haben die Parameter des Softbodies den größten Einfluss auf dessen Simulationsverhalten. Die *Dichte*³⁹ beschreibt indirekt die Masse des

³⁸ Initialwert Geometriemodellierung: 100%; Wertebereich:]0; 100%].

³⁹ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 1,0 | Wertebereich:]0; ∞[.

Softbodies, die auf Basis des Volumens des Tetraedernetzes errechnet und dann gleichmäßig auf alle Vertices verteilt wird. Dies verstärkt die Problemstellung einer Inhomogenität des Polygonnetzes, da dem folgend auch eine inhomogene Masseverteilung vorliegt. Die *Dehnungssteifigkeit*⁴⁰ gibt vor, inwieweit die Kanten der Tetraeder gestaucht bzw. gedehnt werden können. Bei einer Verformung kann über den Parameter *Volumensteifigkeit*⁴¹ festgelegt werden, inwieweit das Volumen erhalten bleibt. Der *Dämpfungskoeffizient*⁴² gibt vor, wie die Vertex-Geschwindigkeiten des Softbodies über den Zeitverlauf gedämpft werden. Dieser Effekt ist unabhängig von der gewählten *Solveriteration*⁴³, welche die Anzahl der Berechnungsschritte je Zeiteinheit vorgibt und die Simulationsgenauigkeit beeinflusst. Jedoch erfolgt dies bei vielen Simulationsobjekten zu Lasten der Simulationsgeschwindigkeit. Für die Abbildung von Kollisionen wird bei einem PhysX®-Softbody ein partikelbasiertes Ersatzmodell gebildet. Hierfür werden um die einzelnen Vertices Kugeln definiert. Über den Parameter *Partikelradius*⁴⁴ kann die Kollision zweier Objekte beeinflusst werden. Dies ist zudem über den *Kollisionskoeffizienten*⁴⁵ möglich, der einen Faktor darstellt, mit dem der Impuls eines Softbodies auf einem RigidBody im Kollisionsfall skaliert wird.

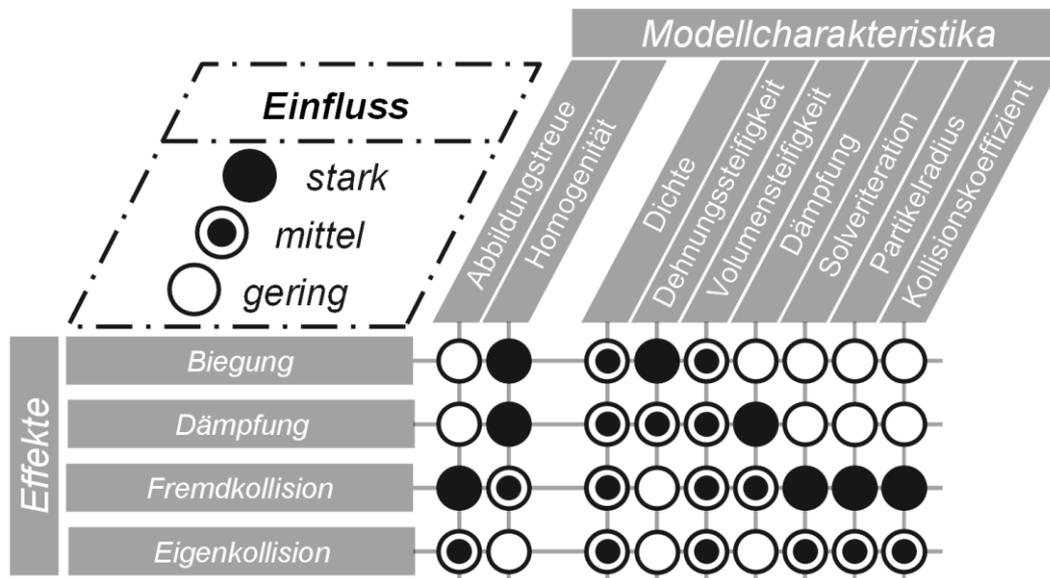


Abbildung 5.5: Prognostizierter Einfluss der Modellcharakteristika auf ausgewählte Effekte zur Abbildung formlabiler Objekte.

⁴⁰ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 1,0 | Wertebereich:]0; 1].

⁴¹ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 1,0 | Wertebereich:]0; 1].

⁴² Initialwert Physik-Engine PhysX®: 0,5 | Wertebereich:]0; 1].

⁴³ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 5,0 | Wertebereich:]0; ∞[.

⁴⁴ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 0,2 | Wertebereich:]0; ∞[.

⁴⁵ Initialwert Physik-Engine PhysX®: 0,2 | Wertebereich:]0; ∞[.

Im Vorfeld der Parameterstudie wird der Einfluss der einzelnen Modellelemente auf die spezifizierten Effekte abgeschätzt, wie es in Abbildung 5.5 exemplarisch dargestellt ist. Da *Softbody-Flags* binäre Größen darstellen und der Einfluss auf die Effekte trivial ist, wurden sie nicht mit aufgelistet.

Versuchsplanung und Parameterstudie: Anhand der Parameter-Effekt-Analyse werden in diesem Schritt die Parameterstudien geplant und durchgeführt. Diese sollen zum einen dazu dienen, sinnvolle Einstellungskorridore für die einzelnen Modellelemente und -parameter zu identifizieren. Zum anderen soll anhand eines beispielhaften Materials ein spezifischer Parametersatz definiert werden. Dieser kann als Referenz für die Parameteridentifikation von weiteren Materialien dienen. Die Versuche werden in drei aufeinander aufbauende Stufen eingeteilt: Zunächst werden anhand von statischen Versuchen einzelne Parameterwerte ermittelt. In einem zweiten Schritt werden dynamische Effekte untersucht, die anschließend um die Interaktion mit anderen Simulationsobjekten erweitert werden. Durch die Isolation bestimmter Effekte, z. B. einer reinen Biegebeanspruchung wie in Abbildung 5.6 (A), und die stufenweise Erweiterung der untersuchten Effekte kann die Anzahl der möglichen Einflussgrößen reduziert und somit iterativ auf einen gültigen Parametersatz sowie diesbezügliche Wirkbereiche geschlossen werden. Für Testszenarien, bei denen mehrere Parameter untersucht werden, die teilweise in Wechselwirkung stehen, kann eine faktorielle Versuchsplanung zur Strukturierung der Parameterstudien angewandt werden.

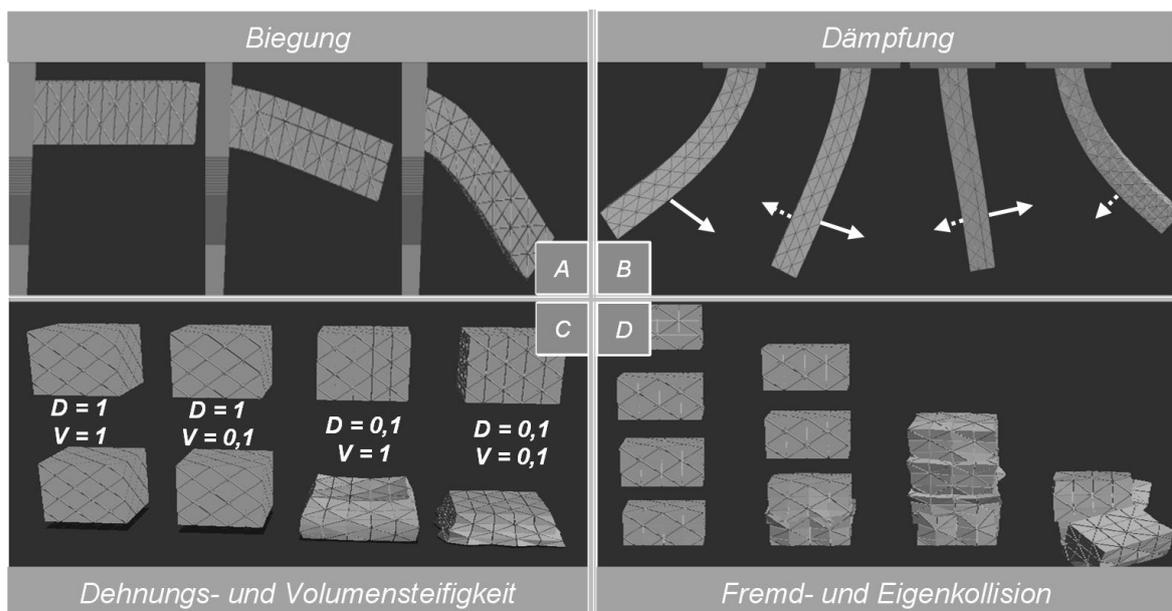


Abbildung 5.6: Abbildung der Biege- (A) und Dämpfungseigenschaften (B), der Dehnungs- und Volumensteifigkeit (C) sowie der Fremd- und Eigenkollision (D) von Softbodies.

Im gegebenen Beispiel wurde diesem Vorgehen folgend zunächst ein Biegeversuch durchgeführt. Anschließend wurden Szenarien zur Untersuchung der Dämpfungseigenschaften sowie Fremd- und Eigenkollision simuliert. Abbildung 5.6 zeigt die einzelnen Versuche mit unterschiedlichen Parametersätzen. Als beispielhaftes Referenzmaterial wurde Polyethylen (PE⁴⁶) gewählt. Neben der Einflussanalyse auf das Objektverhalten ist auch die notwendige Rechenzeit zur Abbildung des spezifischen Effektes bei der Parameterstudie zu berücksichtigen.

Auswertung: Auf Basis der Parameterstudien können die wichtigsten Parameterinflüsse sowie realisierbare Wirkbereiche der einzelnen Parameter identifiziert und die Prognose bezüglich der Parameter-Effekt-Wechselwirkung überprüft werden. Eine abgeleitete Empfehlung für Einstellungsbereiche elementarer Parameter des Referenzmaterials PE ist in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Haupteinflussfaktoren und empfohlene Parametereinstellung für ein Objekt aus PE am Beispiel NVIDIA® PhysX® Softbody.

Wert	Kollisionskoeffizient		Volumensteifigkeit	
Empfehlung	$C_c = 10 \times \frac{\text{Masse Softbody}}{\text{Masse Kollisionskörper}}$		0,8 - 0,9	
Wert	Dämpfungs-koeffizient	Partikel-radius	Deckungsgrad Original-Mesh	Dehnungs-steifigkeit
Empfehlung	0,7 - 0,8	0,06 - 0,07	min. 20%	0,90 - 0,95

Die Abweichung der relativen Vertexpositionen vom originalen Tetraedernetz wird maßgeblich durch die Dehnungssteifigkeit und Volumensteifigkeit beeinflusst. Werden beide Parameter groß gewählt, können auch steifere Materialien abgebildet werden. Im entgegengesetzten Fall sind die Abweichungen der Vertexpositionen so groß, dass numerische Instabilitäten auftreten. Steife Materialien erfordern aufgrund der numerischen Stabilität eine höhere Solveriteration. Dies gilt auch bei der Abbildung von Kollisionspaarungen. Bei Verwendung der PhysX®-Engine sind Kollisionen zwischen Softbodies nur beschränkt abbildbar. In der Regel wird den Simulationsobjekten ein zusätzlicher Starrkörper als Kollisionsgeometrie zugewiesen, mit dem die Kollision berechnet wird. Dies stellt jedoch nur eine sehr rudimentäre Näherung dar, vor allem bei filigranen Bauteilstrukturen. Zudem

⁴⁶ Auszug Materialkennwerte Polyethylen (ABTS 2014):
Dichte: 0,95 g/cm³; Zugfestigkeit: 24 N/mm²; Bruchdehnung: >200%; E-Modul: 1000N/mm².

verändert sich die Kollisionsgeometrie nicht anhand des dynamischen Verhaltens, was zu einer weiteren Verfälschung führt.

Die interaktive Simulation stellt große Anforderungen an das Zeitverhalten der Simulation. Diese werden von vorhandenen Physik-Engines erfüllt. Je nach hinterlegtem Berechnungsmodell eignen sich diese jedoch nur eingeschränkt zur Abbildung produktionstechnischer Szenarien. Vor allem bei formlabilen Objekten mit höherer Steifigkeit wurden die Nachteile der abstrahierten Physikmodelle ersichtlich. Zudem können die dem physikalischen Verhalten entsprechenden Simulationsparameter aufgrund der Black-Box-Charakteristik der Physik-Engines nicht eindeutig identifiziert werden. Im Speziellen können konkrete Beziehungen von physikalischen Materialparametern zu Modellcharakteristika, z. B. Relation zwischen E-Modul und Dehnungssteifigkeit, nur eingeschränkt abgeleitet werden.

Die einzelnen Schritte müssen je nach betrachtetem Material und Einsatzszenario spezifisch durchlaufen werden, um eine konkrete Festlegung der Parametersätze zu erreichen. Als Ausgangsbasis für die Parameterstudien können die in Tabelle 5.1 dargestellten Wertebereiche herangezogen werden. Konkret ermittelte Modellcharakteristika können in einer Datenbank abgelegt und so für weitere Simulationsstudien wiederverwendet werden. Die zugrundeliegenden Simulationsverfahren (vgl. Abschnitt 3.5) sind je nach vorliegender Physik-Engine unterschiedlich implementiert. Die ermittelten Werte einer Engine können daher nur begrenzt auf andere Middlewaresysteme übertragen werden. Jedoch können diese als Referenzpunkt für eine spezifische Detailanalyse dienen.

5.2.3 Formlabiles Objektverhalten mit diskreten Volumenelementen

Die dargestellten Ansätze zur Abbildung formlabiler Bauteile mittels Modellen der Computergrafik bieten bereits einen guten Näherungsansatz für das reale Objektverhalten. Allerdings reichen der mögliche Detaillierungsgrad und die Parametrierbarkeit nicht für alle produktionstechnischen Szenarien aus. Um weiterhin die Vorteile der effizienten Berechnungsalgorithmen der Physik-Engines zu nutzen und die Qualität der Simulationsergebnisse zu steigern, wurde ein Konzept zur Hybridisierung der vorhandenen Objekttypen entwickelt⁴⁷. Eine Abbildung von Objekten mittels einer Vielzahl an Quadern oder Partikeln findet aktuell bei der Abbildung von Starrkörpermodellen Einsatz⁴⁸. Dieser Grundgedanke wurde um die

⁴⁷ Vergleichbare Ansätze mit anderem Einsatzzweck sind beispielsweise auch in SERVIN ET AL. (2011) dargestellt.

⁴⁸ Siehe dazu BELL ET AL. (2005).

Simulation formlabiler Objekte erweitert und für die Produktionstechnik qualifiziert. Die hybriden Modelle sind mit einem echtzeitfähigen Ansatz vergleichbar, der zwischen der Mehrkörper- und der Finite-Elemente-Simulation einzuordnen ist. Das Geometrieobjekt wird, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, durch Volumenelemente von gleichem (mono) oder unterschiedlichem (multi) Typ repräsentiert.

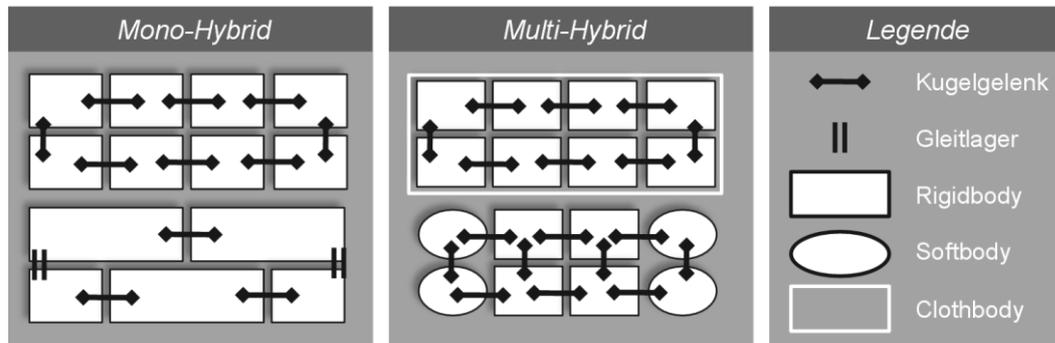


Abbildung 5.7: Vereinfachte Beispiele für mono- und multi-hybride Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Diskretisierung.

Das physikalische Verhalten der Objekte wird über die Art der Diskretisierung sowie die Parameter der Verbindungselemente, sogenannte Joints, definiert. Im Vergleich zu konventionellen Modellen der Physik-Engines hat dies den Vorteil, dass die Simulationsparameter für unterschiedliche Bauteilregionen spezifisch eingestellt werden können. Dadurch lässt sich die Simulation kontextspezifisch parametrieren, um ein für den gewählten Abstraktionsgrad hinreichendes Modell zu erhalten. Die einzelnen Volumenelemente werden vornehmlich durch einfach berechenbare Geometrieobjekte einer Physik-Engine repräsentiert.

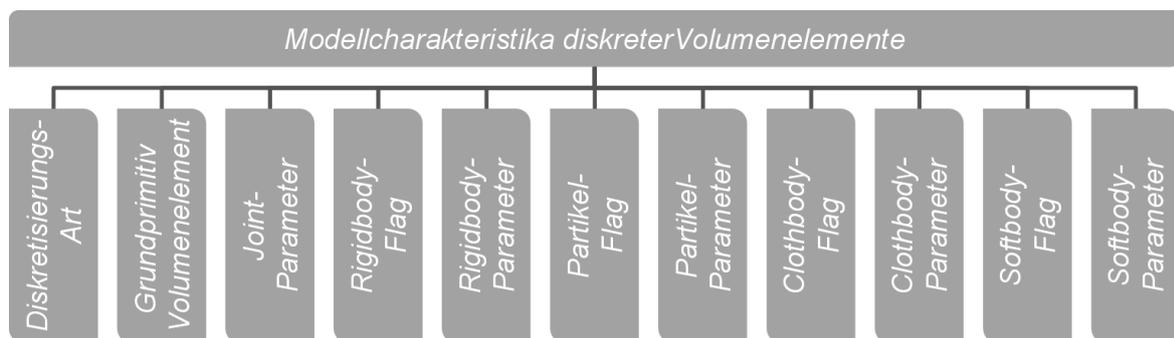


Abbildung 5.8: Charakteristika eines diskreten Volumenelements am Beispiel der Engine NVIDIA® PhysX®.

Das in Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Vorgehen kann auch für diskrete Volumenelemente umgesetzt werden. Die diesbezüglichen Charakteristika sind in Abbildung

5.8 dargestellt. Die Modellierung formlabiler Objekte über diskrete Volumenelemente bietet vielfältigere Möglichkeiten auf das Objektverhalten Einfluss zu nehmen. Im Regelfall müssen aber nicht alle Charakteristika bei der Bestimmung der Simulationsparameter vollfaktoriell beachtet werden. Einerseits sind meistens Einstellungen der Modellbestandteile aus anderen Simulationsszenarien bekannt. Andererseits werden selten alle zur Verfügung stehenden Objekt- und Gelenktypen in Kombination verwendet.

Teilbereiche der dargestellten Ansätze lassen sich auch auf Starrkörpermodelle übertragen. In diesem Fall werden die einzelnen Volumenelemente, die das Simulationsobjekt repräsentieren, über Fixgelenke verbunden. Dies kann in bestimmten Fällen die in LACOUR (2012) vorgestellte konvexe Zerlegung konkaver Geometrieobjekte ersetzen. Bei einer geeigneten Wahl der zugrundeliegenden Geometrieprimitiva für die diskreten Elemente kann eine Verbesserung der Rechenleistung erreicht werden. Durch die Diskretisierung der Objekte über geometrische Grundkörper reduziert sich zudem der Tunneling-Effekt (STETTER 1993). Die Objekte in der Simulation sind nicht durch die begrenzenden Objektoberflächen abgebildet, sondern resultieren aus einer Vielzahl an Volumenelementen mit einer Kollisionsgeometrie, die aufwandsarm berechnet werden können. Allerdings wird dabei die Oberfläche der Simulationsobjekte nur angenähert. Der Genauigkeitsgrad ist von der Granularität der Diskretisierung abhängig, die in Korrelation mit dem Zeitverhalten der Simulation steht. Um die Recheneffizienz der Simulation zu steigern, wurde die Diskretisierung auf geometrische Grundkörper bzw. Volumenelemente eingeschränkt: Quader, Kugeln, Zylinder, Pyramiden oder einfache Prismen. Diese zeichnen sich durch eine einfache mathematische Beschreibung und eine aufwandsarme Berechnung der Kollisionsabbildung aus.

Neben der elastischen Verformung müssen teils auch (elasto-)plastische Verformungen oder Brüche abgebildet werden. Klassische Physik-Engines können nur letzteren Effekt abbilden. Aus diesem Grund können spezielle Gelenktypen definiert werden, die in Belastungsfällen entsprechendes Materialverhalten ermöglichen. In Abbildung 5.9 sind hierzu drei unterschiedliche Arten der Objektverknüpfung und deren Einordnung in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm eingezeichnet.

Der erste Fall (Abbildung 5.9-1) entspricht einer rein elastischen Verformung. Dies kann für diskrete Volumenelemente über vorliegende Gelenktypen der Physik-Engines modelliert werden. Hierbei werden die Feder- und Dämpferwerte der Verbindungselemente mit einer reversiblen Dehnung vorgegeben. Zur Abbildung von

Brüchen (Abbildung 5.9-3) können Maximalwerte der Verbindungselemente angegeben werden. Werden diese überschritten, wird die Verbindung zwischen den diskreten Volumenelementen aufgehoben. Dies könnte bei Einstellung einer Reißfestigkeit ebenfalls mit Soft- oder Clothbodies realisiert werden.

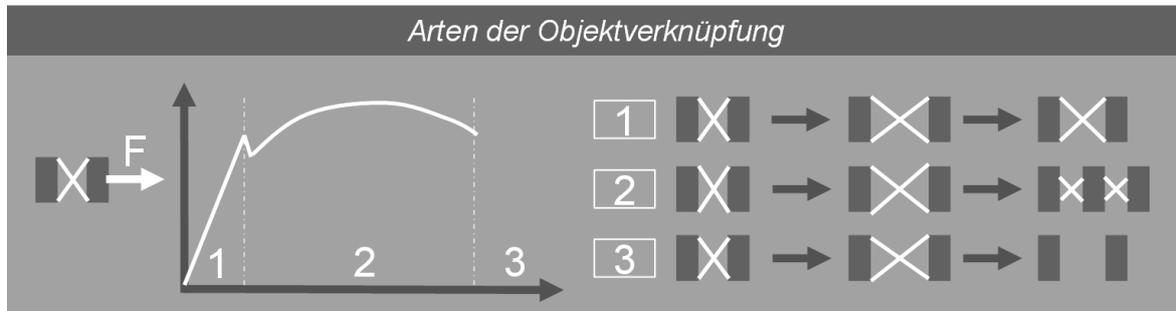


Abbildung 5.9: *Elastisch-Plastisches Verhalten bei diskreten Volumenelementen.*

Im Zwischenbereich liegt eine plastische Verformung vor (Abbildung 5.9-2). Dies kann bei diskreten Volumenelementen über spezielle Verbindungselemente realisiert werden, deren Parameter sich nach Überschreiten eines Grenzwertes anpassen. Dazu werden die Ruhepunkte der Feder- und Dämpferelemente des hinterlagerten Physikmodells verschoben. Nachteilig ist jedoch, dass durch die lokale Verschiebung der Relativpositionen der diskreten Volumenelemente Lücken im zugehörigen Kollisionsmodell entstehen. Dies kann entweder durch eine lokale Netzverfeinerung, wie in Abschnitt 3.5.3 dargestellt, oder eine Clothbody-Hülle behoben werden. Der Clothbody muss dabei so parametrisiert sein, dass die Grenzwerte der elastischen Verformbarkeit mit der Reißfestigkeit des Objektes übereinstimmen.

Die Simulation mittels diskreter Volumenelemente stellt einen Ansatz dar, der die Vorteile von Simulationsverfahren der Computergrafik und der Ingenieurwissenschaften synchronisiert. Dabei können ein-, zwei- und dreidimensionale formlabile Objekte gleichermaßen abgebildet werden. Jedoch ist auch hier die Größe und Komplexität der abbildbaren Modelle eingeschränkt. Dies hängt vor allem von der Art der Diskretisierung sowie den gewählten Grundprimitiven ab. Der dargestellte Ansatz kann mit allen Engines umgesetzt werden, die sich lediglich bezüglich des jeweiligen Umfangs und der Parametrierbarkeit der Einzelemente unterscheiden.

Physik-Engines sind auf die Berechnung definierter geometrischer Körper optimiert. Aus diesem Grund sollte bei der Abbildung komplexerer Szenarien, die eine Vielzahl an diskreten Volumenelementen erfordern, eine Partikel-Engine, beispielsweise die Flex-Engine von NVIDIA®, eingesetzt werden. Diese vereint den

Einsatz der Position-Based-Dynamics mit dem partikelbasierten Ansatz⁴⁹. Partikel-Engines im Allgemeinen bieten Potenziale bezüglich der Berechnung vielzähliger Objekte, da sich die Berechnung der Objektinteraktion auf einen Abgleich des Abstandes zweier Partikel mit der Summe der Radien reduziert. Das Objektverhalten resultiert aus dem Verhalten der einzelnen Partikel, die, wie vorab dargestellt, über geometrische Zwangsbedingungen gekoppelt sind.

Die Ansätze auf der Basis von diskretisierten Volumenelementen kommen nur in Sonderfällen im Zuge des Systementwurfs zum Einsatz. In diesem Fall sollte zudem die Erstellung des physikbasierten Modells zur Abbildung formlabiler Objektverhaltens außerhalb der Entwurfsumgebung erfolgen. So kann eine Parallelisierung der dafür notwendigen Arbeitsschritte (siehe dazu Abschnitt 5.3), die teils noch manuellen Aufwand bedingen, erfolgen.

5.2.4 Abbildung von Verarbeitungsgütern

Eine Wirkpaarung charakterisiert in Verarbeitungsprozessen den definierten Übergang zwischen unterschiedlichen Gutgruppen. Innerhalb der physikbasierten Simulation können die in Abbildung 5.10 dargestellten Gutgruppen realisiert werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Geometriekomplexität und Objektgröße von Strang- bzw. Fadengut bis hin zu Fluiden.

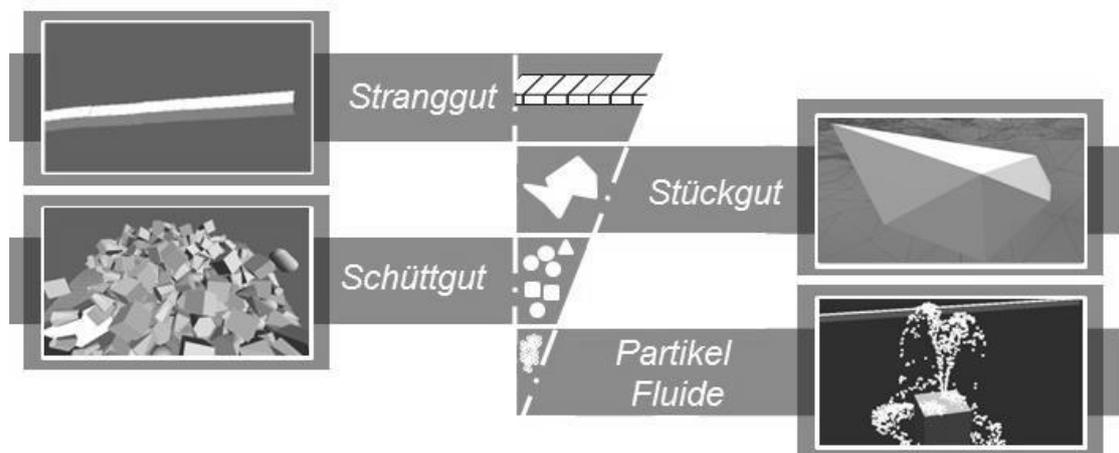


Abbildung 5.10: Art und Größe von abbildbaren Verarbeitungsgütern⁵⁰.

Die Abbildung von Stranggut und somit kontinuierlichem Material bzw. Objekten ist in der physikbasierten Simulation noch nicht möglich. Diese Gutart kommt

⁴⁹ Siehe dazu auch MACKLIN ET AL. (2014).

⁵⁰ Aufteilung der Gutgruppen in Anlehnung an BLEISCH ET AL. (2011).

jedoch häufig in Verarbeitungsmaschinen vor. Beispielweise werden Folien oder Papier dem Verarbeitungsprozess als Rollenware bereitgestellt. Eine detaillierte Simulation bietet in diesem Fall nur einen begrenzten Mehrwert für die Anlagensimulation und würde aufgrund der kontinuierlichen Kollisionsbeziehung zwischen den einzelnen Materialschichten einen Großteil der Rechenkapazitäten binden.

Um Stranggut aufwandsarm in der Simulation nachzubilden, wurde die Entwurfsmetapher *Kontinuierliche Quelle* entwickelt, die eine Erweiterung bestehender *Quellen* nach (LACOUR 2012) darstellt. Diese erzeugt in der physikbasierten Simulation nach vorgegebener Taktzeit ein vordefiniertes, diskretes geometrisches Objekt. Stranggut zeichnet sich dadurch aus, dass das gesamte Objekt in wiederkehrende Abschnitte unterteilt werden kann, die hinsichtlich Materialeigenschaften sowie der geometrischen Repräsentation identisch sind. Zur Erzeugung von Stranggutobjekten wurde daher eine Entwurfsmetapher definiert, die zu gegebener Laufzeit einen neuen Abschnitt des Stranggutobjektes erzeugt und diesen mit dem bestehenden Simulationsobjekt verknüpft. Die kontinuierliche Quelle, deren Funktionsprinzip in Abbildung 5.11 dargestellt ist, wird durch die Ausbringungsmenge und die diesbezügliche Fördergeschwindigkeit charakterisiert. Das neue Objekt wird nicht zu einer vordefinierten Zeit erzeugt, sondern sobald das zuletzt generierte Objekt den Definitionsraum der Quelle verlassen hat. Gleichzeitig wird eine festgelegte Zwangsbedingung (z. B. ein oder mehrere Fix-Gelenke) erzeugt, durch die das Geometrieelement mit dem vorangegangenen Stranggut verbunden wird. Solange der erzeugte Körper noch in der Quelle ist, wird dieser mit einer initialen Kraft beaufschlagt, die in Relation zur Ausbringungsmenge steht. Kontinuierliche Quellen beschränken sich aktuell auf geometrische Primitive. Dies ist jedoch für eine Modellierung von Strang- bzw. Fadengütern ausreichend.

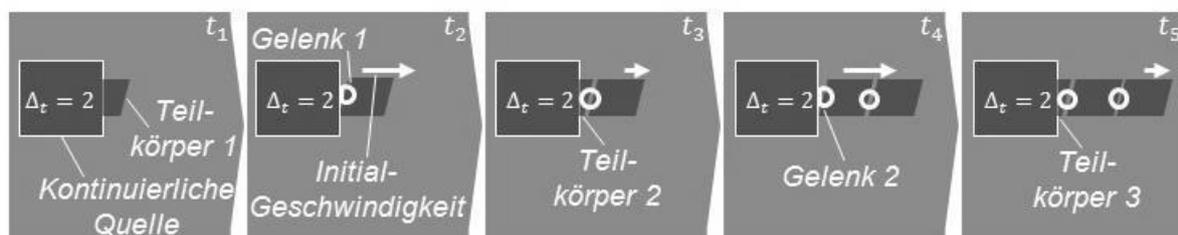


Abbildung 5.11: Entwurfsmetapher *Kontinuierliche Quelle* zur Erzeugung von Stranggutobjekten.

Schüttgut oder Stückgut sowie auch Flachgüter können über diskrete Objekte mit beliebiger Kontur abgebildet werden, wobei kleinere Objekte über vereinfachte Geometriemodelle oder Volumenprimitive abstrahiert werden. Diese Objekttypen

können mit bestehenden Quellen in der Simulation erzeugt werden. Die Abbildung von Fluiden und pastösen Gütern wird im Kontext dieser Arbeit nur eingeschränkt betrachtet und im Einsatzfall über Partikel⁵¹ mit kleinem Radius angenähert. Mit diesem Ansatz können fluiddynamische Effekte rudimentär abgebildet werden, was für den Anwendungsfall des Systementwurfs ausreichend ist⁵².

5.2.5 Abbildung verarbeitungstechnischer Wirkpaarungen

Die Wirkpaarungen eines Verarbeitungssystems umfassen neben den Gutgruppen die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Vorgangsoperationen *Trennen*, *Fügen*, *Formen*, *Speichern*, *Dosieren*, *Fördern* und *Ordnen*. Diese können über Black-Box-Modelle in sogenannten abstrakten Verarbeitungsmaschinen abgebildet werden⁵³. Für eine Detailsimulation wurde die physikbasierte Simulation um zusätzliche Entwurfsmetaphern erweitert, die im Nachfolgenden dargestellt werden. Diese setzen teilweise voraus, dass die einzelnen Verarbeitungsgüter durch diskrete Volumenelemente repräsentiert sind.

Trennvorgänge sind in Verarbeitungsprozessen notwendig, um ausgehend von Halbzeugen definierte Stückgüter zu erzeugen. Am Beispiel eines PhysX® Clothbods ist in Abbildung 5.12 ein Trennvorgang eines Textils zu sehen. Hierbei wird über den Clothbody-Flag *Reißfestigkeit* die Eigenschaft aktiviert, so dass die Kantenelemente zwischen den Vertices bei Überschreitung einer definierten Reißdehnung aufgebrochen werden. Im Anschluss werden die Vertices der Einzelkörper im entstandenen Randbereich neu vernetzt.

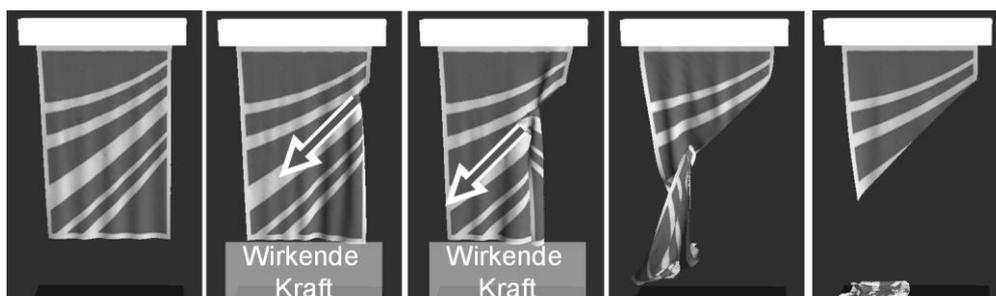


Abbildung 5.12: Exemplarische Abbildung der Vorgangsoperation *Trennen* am Beispiel eines PhysX® Clothbody.

⁵¹ Die in Abschnitt 5.2.2 dargestellte Engine PhysX® stellt in der Version 2.8.1 ebenfalls Emitter für Partikel bereit, worüber Fluide ansatzweise nachgebildet werden können.

⁵² Für weitere Ansätze der physikbasierten Simulation von Fluiden sei an dieser Stelle auf KROTIL ET AL. (2014) oder vergleichbare Arbeiten verwiesen.

⁵³ Eine Beschreibung der Entwurfsmetapher *Abstrakte Verarbeitungsmaschine* findet sich in LACOUR (2012, S. 69–71).

Der in Abbildung 5.12 veranschaulichte Ansatz stellt ein einfaches Mittel zur Abbildung von Trennvorgängen dar, die unter Kräfteinfluss auftreten. Dies ist auch bei diskreten Volumenelementen möglich. Dabei werden den Verbindungselementen Grenzen für die maximale Dehnung vorgegeben. Jedoch können über die dargestellten Ansätze nur eingeschränkt Vorgänge mit prozessspezifischer Trennkante, wie Laserstrahlschneiden, abgebildet werden. Deshalb wurde für diskrete Volumenelemente eine weitere Möglichkeit zur Abbildung eines Trennvorgangs geschaffen, die in Abbildung 5.13 skizziert ist. In einem ersten Schritt wird ein Simulationsobjekt (z. B. ein Zylinder) als Trennwerkzeug definiert. Innerhalb des physikbasierten Modells wird dem Objekt ein Sensor entsprechend der geometrischen Repräsentation zugeordnet. Sofern anschließend im Simulationsverlauf eine Kollision zwischen dem Trennwerkzeug und weiteren Objekten auftritt, wird dies detektiert. Daraufhin werden alle Verbindungselemente der Volumenelemente, die sich im Kollisionsraum des Trennwerkzeugs befinden, aus der Simulation entfernt, was eine (teilweise) Trennung des Objektes zur Folge hat. Das Trennwerkzeug kann alternativ so eingestellt werden, dass dieses auch auf das entsprechende Volumenelement wirkt (Abbildung 5.13, $t_{n,2}$).

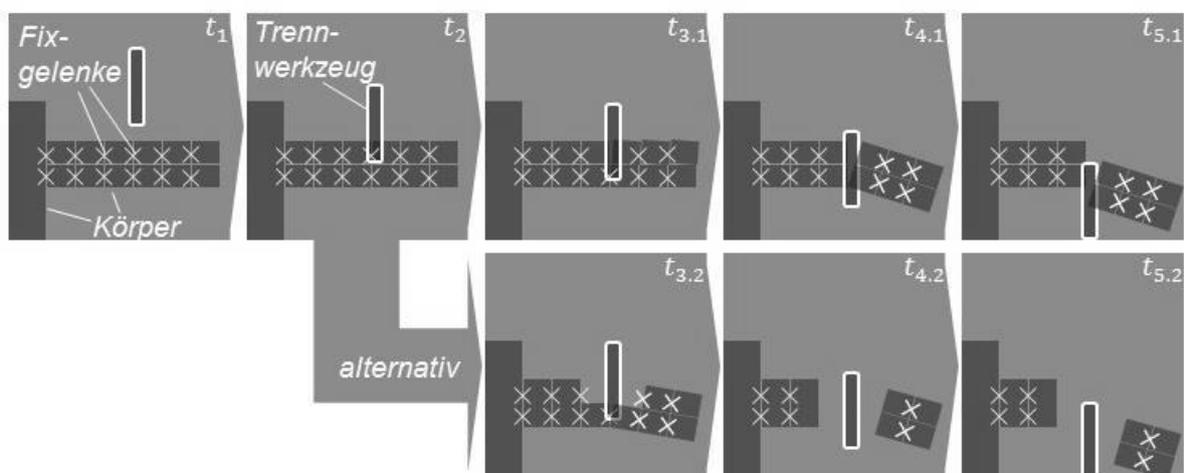


Abbildung 5.13: Entwurfsmetapher Trennwerkzeug mit unterschiedlichen Ausprägungen ($t_{n,1}$ und $t_{n,2}$)⁵⁴.

Darüber hinaus müssen in der Verarbeitungstechnik einzelne Bestandteile eines Verarbeitungsgutes gefügt werden. Dazu kommen unter anderem stoffschlüssige Verfahren mit oder ohne Fügemitte zum Einsatz. Das umgesetzte Prinzip kann als eine Invertierung der Entwurfsmetapher *Trennwerkzeug* aufgefasst werden. Wie in Abbildung 5.14 dargestellt, wird einem Geometrieobjekt die Eigenschaft *Füge-*

⁵⁴ Die Kinematik zur Bewegung des Trennwerkzeuges ist nicht mit dargestellt.

werkzeug aufgeprägt. Im physikbasierten Modell wird anhand der Objektgeometrie ein Sensor erzeugt. Dieser detektiert, mit welchen Objekten das *Fügewerkzeug* in Berührung kommt. Sofern sich zwei Objekte im Sensorbereich befinden, wird die Fügeoperation aktiviert und an der gegebenen Stelle eine geometrische Zwangsbedingung gesetzt. Die Entwurfsmetapher *Fügewerkzeug* kann dahingehend erweitert werden, dass die Anzahl der Fügepunkte, die über die Fläche gleichmäßig verteilt werden, mit angegeben wird. Damit sind flächige Fügeoperationen realisierbar, wie beispielsweise bei Siegelvorgängen in der Verpackungstechnik.

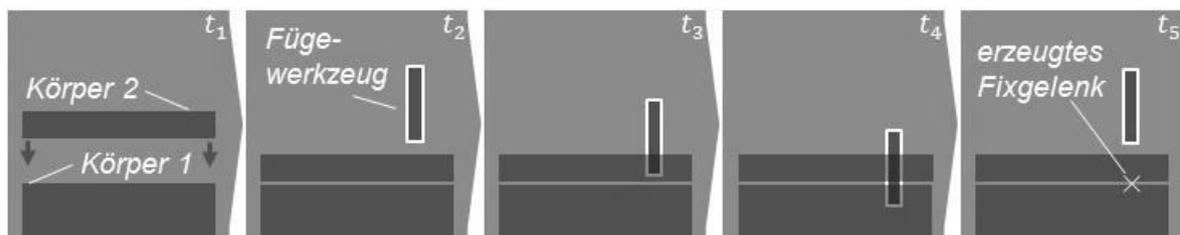


Abbildung 5.14: Entwurfsmetapher *Fügewerkzeug*⁵⁵.

Die Vorgangsoperation *Formen* kann bei elastischen Verformungen über die Materialparameter der formlabilen Objekte eingestellt werden. Plastische Verformungen lassen sich damit jedoch nicht abbilden. Eine diesbezügliche Möglichkeit bieten jedoch diskrete Volumenelemente. Dabei wird für die Verbindungselemente ein Wertebereich vorgegeben, in dem sie sich elastisch oder plastisch verhalten bzw. brechen. Sollten keine flächen- und volumenbezogenen Formvorgänge notwendig sein, wie z. B. bei Faltvorgängen von Kartons, kann der linienförmige Formprozess auch über einfachere Ersatzmodelle abstrahiert werden. Hierzu wird das Geometriemodell aus dem CAD-System ausgeleitet. Anhand der hinterlegten Biegekanten des Modells werden Teilmodelle erstellt, die z. B. über *Hinge-Joints* verbunden sind und nur eine relative Rotation um die Faltachse zulassen. Das physikalische Formverhalten wird über die Gelenkparameter eingestellt. Sollten die objektbezogenen Ansätze nicht ausreichen, um den gewünschten Formprozess abzubilden, kann dieser auch über die Entwurfsmetapher *Abstrakte Verarbeitungsmaschine* modelliert werden.

Die Vorgangsoperationen *Speichern*, *Dosieren*, *Fördern* und *Ordnen* werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die diesbezüglichen Funktionen ergeben sich aus dem Zusammenspiel einzelner Bestandteile eines mechatronischen Systems und können über bestehende Modellelemente oder *Abstrakte Verarbeitungsmaschinen*

⁵⁵ Die Kinematik zur Bewegung des Fügewerkzeug ist nicht mit dargestellt.

abgebildet werden. Beispielsweise können die Funktionselemente einer Speicher- und Dosiereinheit, wie in Abbildung 5.15 exemplarisch dargestellt, über einfache Starrkörper und einen Schlauch, bestehend aus einem Clothbody, abgebildet werden. Aus einem Speicher werden Verarbeitungsgüter, hier als Kugeln abstrahiert, gezielt an einem bestimmten Ort dosiert, wobei der Materialfluss über ein kinematisiertes Element gesteuert wird.

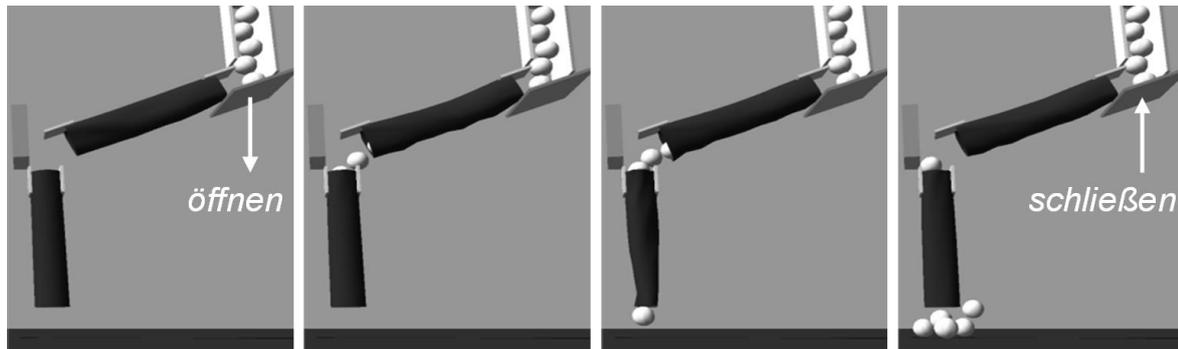


Abbildung 5.15: Exemplarische Abbildung der Vorgangsoperationen Speichern und Dosieren am Beispiel einer PhysX® Clothbody-Rigidbody-Kombination.

5.3 Adaption und Erweiterung des Modellbildungsprozesses

5.3.1 Übersicht des Teilkonzeptes

Innerhalb des interaktiven simulationsgestützten Entwurfs soll die Definition von Systembestandteilen mit Hilfe einer digitalen Skizze erfolgen, bei der die in Abbildung 5.16 dargestellten Modellbildungsschritte hinterlegt sind. Die Modellbildung erfolgt automatisch im Hintergrund des kreativ-synthetischen Skizzierprozesses, der in Abschnitt 5.4 detailliert wird.

Der Fokus der nachfolgenden Ausführungen liegt vor allem auf der Modellierung verarbeitungstechnischer Güter und Wirkpaarungen. Letztere können über Bestandteile des physikbasierten Modells oder spezifische Verhaltensmodelle auf Sensor-Aktor-Ebene definiert werden. Die Abbildung von Starrkörpersystemen erfolgt anhand des fünfstufigen Vorgehens nach LACOUR (2012). Teilbereiche gelten ebenso für die Abbildung formlabiler Objekte. Die nächsten Abschnitte beschreiben die Erweiterungen bestehender Modellierungsmethoden und stellen damit das Vorgehen dar, wie die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Modelle erstellt werden.

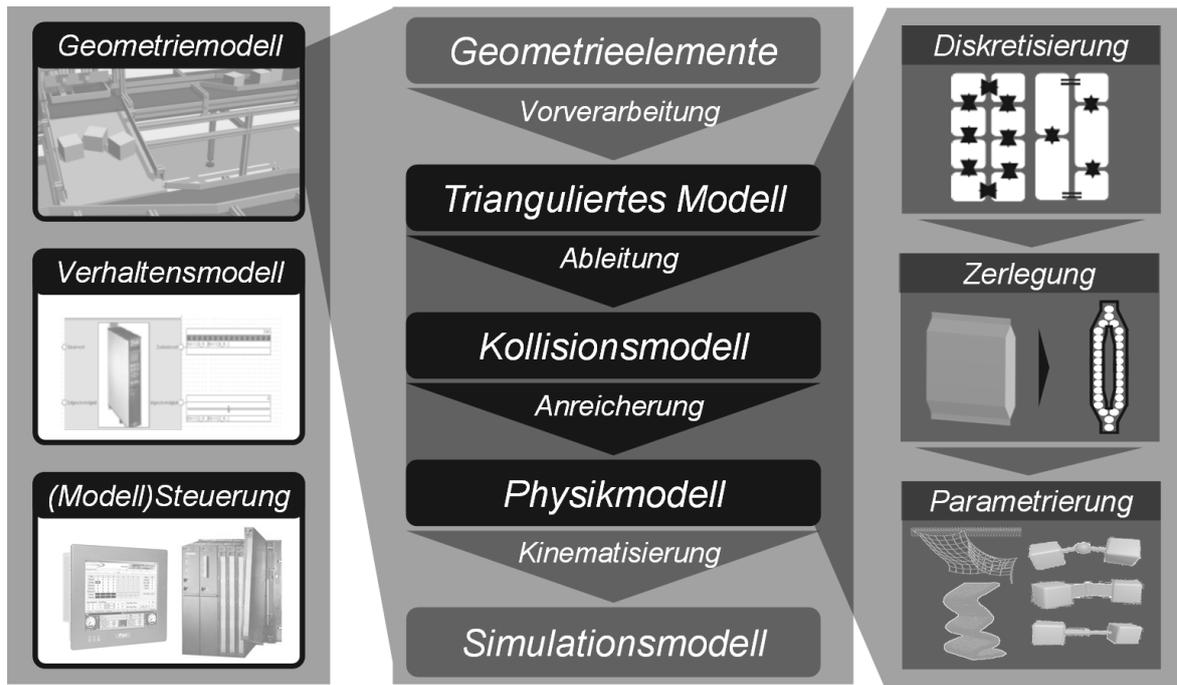


Abbildung 5.16: Erweiterte Modellbildung zur physikbasierten Simulation⁵⁶.

Die physikbasierte Simulation kann auch in andere Entwicklungsumgebungen, z. B. im Rahmen einer VIBN, eingebunden werden. Aus diesem Grund werden innerhalb dieses Abschnittes Teilbereiche detailliert, die nicht zwangsweise für den Systementwurf notwendig sind, jedoch die simulationsgestützte Entwicklung in späteren Phasen unterstützen und somit einen Transfer auf weitere Anwendungsbereiche ermöglichen. Diese zusätzlichen Arbeitsschritte dienen einer detaillierteren Abbildung der Systembestandteile und bedingen teils manuelle Arbeitsschritte.

5.3.2 Vorverarbeitung von bestehenden Geometrieelementen

Eine Vorverarbeitung ist notwendig, wenn vorhandene Geometrieelemente aufbereitet und bezüglich des Detaillierungsgrades modifiziert werden müssen. Dies ist bei einer Datenübernahme aus CAD- oder anderen Konstruktionssystemen nötig, bevor die Modelle in eine Entwicklungsumgebung geladen werden. Bei einer Neudefinition im Zuge des Systementwurfs werden die Geometriedaten aus den Skizzenelementen abgeleitet, sodass die nachfolgend gezeigten Abläufe entfallen.

Wie in Abbildung 5.17 dargestellt, wird zur Vorverarbeitung von bestehenden Geometrieelementen zunächst eine Trennung der Geometrie und Bauteilhierarchie,

⁵⁶ Gestaltung des Modellbildungsprozesses in Anlehnung an das fünfstufige Vorgehen nach LACOUR (2012).

bestehend aus der Struktur des Objektes und den Bauteilinformationen, vorgenommen. Dadurch lassen sich die einzelnen Bauteile separat modifizieren, ohne die physikalische Repräsentation zu verfälschen. Die simulative Absicherung verarbeitungstechnischer Systeme fokussiert die Abbildung entscheidender Systemelemente und deren Wechselwirkung. Für die physikbasierte Simulation werden zunächst nur kollisionsrelevante Simulationsobjekte benötigt. Rein visuelle Objekte dienen teilweise einem besseren Verständnis der Simulation. Der Detaillierungsgrad dieser Objektklasse muss ausreichend sein, so dass für Anwender die Simulationsergebnisse im Kontext der Gesamtanlage ersichtlich sind. Deshalb ist es möglich, die Bauteile, die dafür nicht notwendig sind, aus dem Simulationsmodell zu entfernen bzw. bezüglich ihrer geometrischen Repräsentation zu abstrahieren. Zur Klassifizierung von Bauteilen wurden die Systematik von LACOUR (2012) weiterentwickelt und fünf Kategorien definiert, die abstuft mit einem höheren Abstraktionsgrad abgebildet werden können.

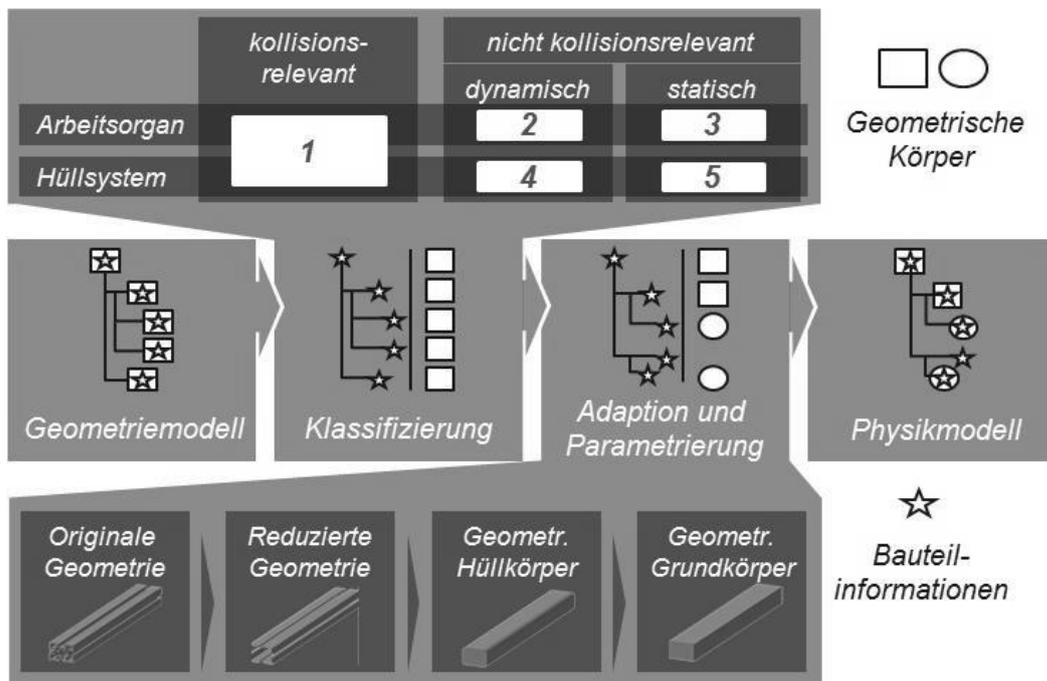


Abbildung 5.17: Vorverarbeitung CAD-Daten für die physikbasierte Simulation.

Kategorie eins umfasst alle Objekte, die mit anderen Simulationsbestandteilen in Wechselwirkung stehen und somit relevant für die Kollisionsdetektion sind, z. B. Verarbeitungsgüter. Weitere Simulationsobjekte, die nicht in die Kollisionsrechnung einfließen, können als statisch oder dynamisch klassifiziert werden. Dynamische und statische Elemente zur Repräsentation des Arbeitsorgans einer Wirkpaarung (Kategorie zwei und drei) müssen detaillierter abgebildet werden als entsprechende Bestandteile der Stütz- und Hüllkonstruktion, da sie eine Relevanz

für die Ergebnisdarstellung aufweisen. Elemente aus Kategorie vier und fünf können sehr stark abstrahiert bzw. komplett aus dem Modell entfernt werden.

Die Berechnung der Masseverteilung, der Kollision etc. erfolgt im physikbasierten Modell auf Basis der geometrischen Repräsentation. Hierfür kommt jedoch nur teilweise die Originalgeometrie zum Einsatz, da beispielsweise ein Aluminium-Profil mit allen Details wie Nutprofilen, Kanten, Rundungen etc. (vgl. Abbildung 5.17) nur eingeschränkt simulierbar wäre. Daher werden diese Objekte, abhängig von der definierten Klassifizierung, bezüglich der geometrischen Repräsentation reduziert oder mit Ersatzmodellen abgebildet. Innerhalb der ersten Abstraktionsstufe werden alle Geometriemerkmale innerhalb des Objektes entfernt, sodass nur noch die Außenkontur des Objektes vorliegt. Dies gilt sowohl für einzelne Bauteile als auch für Baugruppen. Es reicht beispielsweise aus, eine Antriebseinheit in der Simulation durch das Gehäuse zu repräsentieren. In den beiden weiteren Abstraktionsstufen wird die originale Geometrie auf einen Hüllkörper bzw. einen geometrischen Grundkörper reduziert. Für die Simulation hat die Abstraktion der geometrischen Repräsentation keinen Einfluss auf die Parameter der Objekte, da diese separat verwaltet werden. Die Wahl der Abstraktionsstufe ist abhängig von der Art des betrachteten Objektes und dessen Interaktionsbeziehung.

Liegen die aufbereiteten Geometriedaten vor, können die weiteren Schritte zur Erstellung des physikbasierten Modells erfolgen. Starrkörperobjekte werden anhand der in Abschnitt 3.4.3 dargestellten Vorgehensweise abgebildet. Sofern formlabile Objekte erstellt werden, sind abweichende Schritte notwendig, die nachfolgend dargestellt werden.

5.3.3 Ableitung und Anreicherung des Physikmodells

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich maßgeblich auf die Parametrierung formlabiler Elemente, die über diskrete Volumenelemente abgebildet werden. Für Cloth- und Softbodies können die in Abschnitt 3.4.3 dargestellten Prozessschritte nach LACOUR (2012) unter Einbeziehung der in Abschnitt 5.2.2 dargestellten Modellcharakteristika verwendet werden. Diese sind bei der Anreicherung des Kollisionsmodells zu einem Physikmodell nötig und werden nach einer Benutzereingabe oder einem Import der Parameter aus einer Datenbank im physikbasierten Modell hinterlegt. Die zugehörigen Schritte der Modellbildung können bei einer Verwendung von bestehenden Physik-Engines automatisiert werden.

Zur Abbildung von formlabilen Objekten über diskrete Volumenelemente sind die in Abbildung 5.16 dargestellten Zusatzschritte zur Zerlegung der Originalgeometrie in diskrete Volumenelemente sowie der spezifischen Parametrierung notwendig, die teilweise manuelle Aufwände bedingen. Für den ersten Schritt der Modelldiskretisierung sind unterschiedliche Rahmenbedingungen zu beachten, aus denen sich einzelne Faktoren und Gewichtungen für die Ermittlung eines Diskretisierungsgrades ableiten lassen. Hierzu wurden Richtlinien für die Dimensionierung der Volumenprimitive erstellt, die sich an die Klassifizierungsmerkmale aus Abschnitt 2.5 anlehnen und nachfolgend erläutert werden.

Grundklassifizierung: Die Steifigkeit sowie der Grad der Volumenänderung eines formlabilen Objektes kann über die Anzahl der Volumenprimitive eingestellt werden. Steifere Materialien sollten dabei mit weniger und somit großflächigeren Elementen abgebildet werden. Neben der Anzahl hat auch die Art der Grundprimitive eine Auswirkung auf das Verhalten. Für steifere Materialien bieten sich quaderförmige Elemente an, da hierbei über die Kontaktflächen der verbundenen Volumenelemente wirkende Kräfte besser abgestützt werden und somit ein steiferes Verhalten realisierbar ist. Alternativ kann dies über die Art der Gelenktypen beeinflusst werden, indem bestimmte Vorzugsrichtungen der Verformung über die Einschränkung der Freiheitsgrade der Verbindungselemente unterbunden werden. Zudem ist die Vernetzung entscheidend für das Objektverhalten. Hierbei können z. B. kreuz- oder kreisförmige Vernetzungen der einzelnen Elemente oder andere Strategien gewählt werden. Höhere Steifigkeiten erfordern zudem eine höhere Anzahl an Verbindungselementen.

Geometrische Merkmale: Die Kantenlänge der diskretisierten Volumenelemente sollte mindestens ein $2+n$ -faches der minimalen Kantenlänge des Objektes sein. Sofern Durchbrüche, zentrierende Elemente oder unregelmäßige Profile vorliegen, resultiert die minimale Kantenlänge aus den geringsten Abmaßen dieser Elemente. Dies gilt für drei- bzw. teilweise auch für zweidimensionale⁵⁷ Objekte. Bei flächenförmigen und langgestreckten Objekten sind die Längenverhältnisse der längsten zur geringsten vorliegenden Seite entscheidend für den Diskretisierungsgrad. Eindimensionale Objekte wie Kabel oder Schläuche werden entsprechend durch Scheiben- oder Stabelemente bzw. alternativ durch Partikel abgebildet, deren Dicke bzw. Radius anhand der gegebenen Längenverhältnisse zu definieren ist.

⁵⁷ Bei zweidimensionalen Objekten sind die Faktoren auf die Flächenelemente zu begrenzen, die den Körper aufspannen. Auf dieser Basis erfolgt die Definition der Schalenelemente. Alternativ wird ein Netz aus Partikeln erstellt, deren Radius an Hand der Objektdicke abgeleitet wird.

Materialeigenschaften: Die Oberflächenbeschaffenheit, wie haftend oder glatt, wird durch die verwendeten Objekttypen eines diskreten Volumenmodells, z. B. Quader oder Kugel, beeinflusst. Zur Glättung einer Oberfläche kann bei Bedarf an lokalen Stellen eine Clothbody-Hülle um die Elemente gelegt werden, die eine Glättung der diskretisierten Oberfläche bewirken.

Bauteilverhalten: Darüber hinaus wird die mögliche Diskretisierung durch die Notwendigkeit zur Abbildung filigraner Strukturen beeinflusst. Hierfür wird die Anzahl der Flächenelemente und die Anzahl der Winkel zwischen den Kanten der Vertices ermittelt, die zwischen vordefinierten Grenzen liegen. Diese sind durch die gewünschte Flächen- bzw. die Winkeltreue vorgegeben. Letzteres ist wichtig, um Geometriemerkmale zu berücksichtigen, die die Neigung der Objekte zu Verhaken, Verklemmen etc. erhöhen. Darüber hinaus beeinflusst die Gewichtsverteilung und die Lage des Massenschwerpunkts das Bauteilverhalten. Dies wird über die spezifische Parametrierung der einzelnen diskreten Volumenelemente beeinflusst.

Basierend auf diesen Daten und der Festlegung der Art der Volumenprimitive, wie Quader oder Partikel, erfolgt die Ableitung des Kollisionsmodells. Dazu wird das Geometriemodell durch eine dem Detaillierungsgrad entsprechende Menge an Grundkörpern approximiert. Um den diesbezüglichen Aufwand, vor allem bei der Zerlegung der Modelle in geometrische Primitive, zu reduzieren, wurde ein vierstufiges Vorgehen definiert, welches in Abbildung 5.18 dargestellt ist.

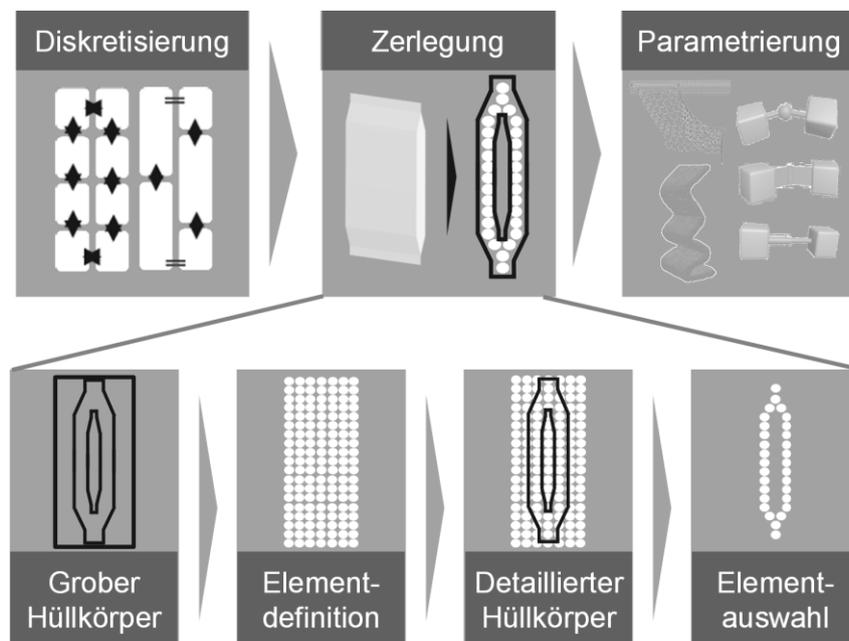


Abbildung 5.18: Ableiten des Kollisionsmodells.

Zunächst wird ein grober Hüllkörper um die abzubildende Geometrie gelegt, z. B. eine Bounding Box. In diesem werden die geometrischen Primitive oder Partikel gemäß der definierten Diskretisierung erzeugt. Für die nachfolgende Auswahl der Elemente, die das abzubildende Objekt repräsentieren, wird ein exakter Hüllkörper definiert und ein dementsprechendes Kollisionsmodell erzeugt. Letzteres erfolgt auch für geometrische Primitive. Über die Kollisionsdetektion, die über die Physik-Engine realisiert wird, können die Volumenelemente identifiziert und ausgewählt werden, die einen Deckungsgrad mit dem detaillierten Hüllkörper aufweisen.

Bei einer homogenen Größe der diskreten Volumenelemente kann die Oberfläche nur angenähert werden, weshalb die erzielbare Genauigkeit mit der gewählten Granularität der Volumenelemente korreliert. Bei einer homogenen Verteilung der diskreten Volumenelemente können die dargestellten Schritte nach Festlegung der Rahmenbedingungen automatisch erfolgen.

Sofern die Granularität der diskreten Volumenelemente im abzubildenden Objekt nicht homogen sein muss, kann das Verfahren in einer abgewandelten Art zum Einsatz kommen, um durch eine manuelle Optimierung eine detailliertere Oberflächenabbildung zu erzielen. Dazu werden zunächst wenige grobgranulare Grundprimitive erzeugt, welche die vorab definierten Schritte durchlaufen. Zusätzlich wird geprüft, ob sich die detektierten Volumenelemente vollständig innerhalb des detaillierten Hüllkörpers befinden. Ist dies nicht der Fall, so wird das Volumenelement durch eine definierbare Anzahl entsprechend kleinerer Grundprimitive des gleichen Typs ersetzt. Dies wird rekursiv solange durchlaufen, bis eine definierte Mindestgröße der Volumenelemente unterschritten wurde oder alle innerhalb des detaillierten Hüllkörpers angeordnet sind. Das Verfahren ist vergleichbar mit einer stufenweisen Voxelierung. Nach der Diskretisierung wird anhand der relativen Volumenverteilung die Masse des Simulationsobjektes, die auf Basis der Originalgeometrie ermittelt wurde, auf die Volumenelemente verteilt. Die dargestellte Optimierung erfordert jedoch manuelle Aufwände durch den Anwender.

Darüber hinaus kann eine gezielte manuelle Einstellung der Objekteigenschaften erfolgen, die den Belastungsfall des Objektes berücksichtigt. Bei der Reduktion wird innerhalb einer Simulationsstudie, optimaler Weise ausgehend von einer Maximalkonfiguration und somit einer sehr hoch auflösenden Diskretisierung, eine problemspezifische Diskretisierung abgeleitet. Durch die Anpassung der Diskretisierung an den vorliegenden Belastungsfall kann bei gleichbleibender Genauigkeit die Simulationsgeschwindigkeit verbessert und damit die Anzahl der abbildbaren Simulationsobjekte erhöht werden, ohne rechenintensive Algorithmen

zur Netzadaption zu integrieren. Abbildung 5.19 zeigt unterschiedliche Abstufungen, die auf den Anwendungsfall bezogen analoge Ergebnisse erzielen.

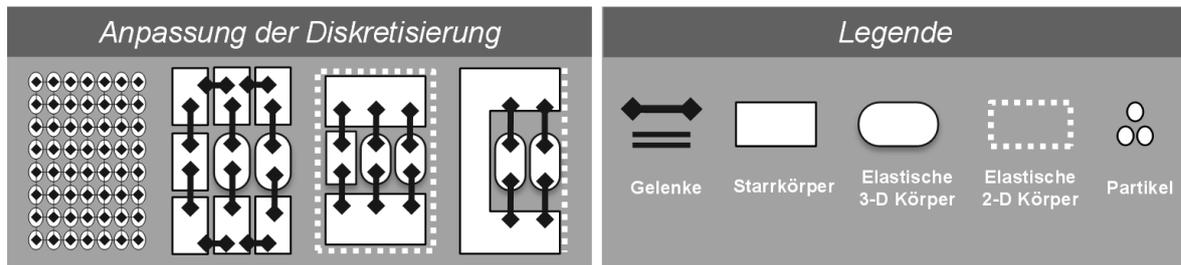


Abbildung 5.19: Optimierung der Diskretisierung.

Der exemplarische Körper wird im Belastungsfall nur auf der rechten mittleren Objektseite verformt. Deshalb kann für Teilbereiche des Objektes eine Anpassung der Diskretisierung erfolgen. Sofern sich jedoch der Belastungsfall ändert, muss die Anpassung der Diskretisierung geprüft werden, um deren Zulässigkeit sicherzustellen. Die Festlegung der einzelnen Objekt- wie auch Gelenktypen ist eine anwendungsspezifische Problemstellung und abhängig von den gewünschten Objekteigenschaften. Beispiele sind die Versteifung bestimmter Bereiche durch eine lokal angepasste Diskretisierung, die Homogenisierung von kontaktintensiven Oberflächen über Clothbodies sowie die Abbildung von Mischverbindungen mit unterschiedlichen Materialien. Letzteres kann ebenfalls bei einer homogenen Granularität der Volumenelemente realisiert werden, sofern die Verbindungselemente unterschiedlich parametrisiert sind.

Die dargestellte Parametrierung kann für das formlabile Verhalten der Verarbeitungsgüter als auch der Betriebsmittel vorgenommen werden. Zur Überführung des physikbasierten Modells in ein Simulationsmodell ist einerseits eine Kinematisierung nötig. Diese kann analog zur physikbasierten Starrkörpersimulation erfolgen (vgl. Abschnitt 3.4). Andererseits erfordert die Abbildung der Verarbeitungsfunktionen weitere Modellbestandteile, deren Integration nachfolgend beschrieben wird.

5.3.4 Integration von Verhaltens- und Steuerungsmodellen

Verhaltensmodelle bilden innerhalb einer mechatronischen Simulation weitere Bestandteile ab, die den Übergang zwischen dem Informations- und dem Stofffluss repräsentieren und somit der Sensorik und Aktorik zugewiesen werden können. Die in Abschnitt 5.2.5 dargestellten Entwurfsmetaphern sind Elemente der Aktorik und werden durch Bestandteile des Verhaltens- sowie des Geometriemodells abgebildet.

Die Effekte sind im physikbasierten Modell hinterlegt und werden auf Basis der referenzierten Geometrie berechnet. Das zugehörige Verhaltensmodell umfasst die Charakteristika der Zustandsübergänge im Verarbeitungsprozess und deren Parametrierung, die im Entwurfsprozess direkt in der Skizzierumgebung definiert werden. Auf Basis der angegebenen Daten werden Templates für die Verhaltensmodelle in das Modell geladen und entsprechend parametriert sowie mit den weiteren Modellbestandteilen verknüpft.

Die Entwurfsmetaphern *Füge-* oder *Trennwerkzeug* werden lediglich anhand des Geometriemodells referenziert und im Verhaltensmodell deklariert. Für eine *kontinuierliche Quelle* wird neben der Geometriereferenz die Ausbringgeschwindigkeit vorgegeben. Darüber hinaus ist für alle Entwurfsmetaphern die Anbindung an ein Steuerungsmodell notwendig, da die hinterlegten Funktionen über binäre Wertevorgaben aktiviert bzw. deaktiviert oder über analoge Kenngrößen direkt beeinflusst werden.

Ferner sind weitere Verhaltensmodelle notwendig, um die verarbeitungstechnischen Wirkpaarungen *Speichern*, *Dosieren*, *Fördern* und *Ordnen* zu modellieren. Wie in Abschnitt 5.2.5 dargestellt, können diese durch die Kombination bestehender Elemente der physikbasierten Simulation realisiert werden. Hierfür kann auf die in Abschnitt 3.4.2 dargestellten Entwurfsmetaphern *Quellen*, *Senken*, *Puffer* und *Abstrakte Verarbeitungsmaschinen* sowie auf weitere Physik- bzw. Verhaltensmodelle zurückgegriffen werden. Diese sind Gelenke und Motoren zur Abbildung der Kinematik, planare Förderstrecken, externe Posensteuerungen sowie vordefinierte Bewegungsbahnen, die sich ebenfalls auf ein Geometrieobjekt in der Simulation beziehen. Das spezifische Verhalten wird in zusätzlichen Modellen parametriert und über ein Steuerungsmodell beeinflusst. Die Berechnung der Simulationsergebnisse erfolgt maßgeblich in der zugrunde liegenden Physik-Engine auf Basis abstrahierter oder vordefinierter Ein-Ausgangsbeziehungen, wobei die Modellcharakteristika der Verhaltensmodelle verwendet werden.

In späteren Entwicklungsphasen kann darüber hinaus durch eine Anbindung von externen Verhaltensmodellen das Simulationsergebnis quantitativ verbessert werden. Dadurch können vorliegende Detailmodelle, z. B. aus dem Bereich der Elektrotechnik, genutzt werden, um Antriebssysteme oder andere Aktoren abzubilden. Die beschriebenen Bestandteile des Verhaltensmodells beziehen sich vornehmlich auf die Aktorik. Darüber hinaus ist zur Abbildung eines mechatronischen Systems auch die Modellierung der Sensorik elementar. Die physikbasierten Modelle können hierfür auf Basis der Kollisionsauswertung der

Physik-Engine Objekte im Sensorbereich detektieren und zusätzlich die Identifikations- und Positionsdaten des entsprechenden Objektes ausgeben⁵⁸. Einfache Lichtschranken oder Sensoren, die lediglich die Anwesenheit eines Objektes überprüfen, lassen sich hiermit direkt umsetzen. Für weitere Sensorarten, wie beispielsweise Näherungssensoren, müssen die Daten aus dem physikbasierten Modell in zusätzlichen Verhaltensmodellen aufbereitet werden. Ein Bestandteil der physikbasierten Simulation ist immer die geometrische Repräsentation, in der die Simulationsergebnisse visualisiert werden.

Jedes Element des Verhaltensmodells steht nicht nur mit dem Geometriemodell, sondern auch mit der Logik des modellierten Systems in einer definierten Wechselwirkung. Für den Systementwurf wurde ein Steuerungsmodell entwickelt, das die Abbildung von einfachen logischen Befehlen und State-Charts ermöglicht und direkt in die Entwurfsumgebung integriert werden kann. Dadurch können Steuerbefehle schnell geändert werden, was neben dem Wegfall von weiteren Tools im Simulationsprozess eine Reduktion von Iterationen im Entwicklungszyklus bedeutet. Zum Start der Simulation werden die definierten Logikelemente übersetzt und mit dem Verhaltensmodell sowie dem physikbasierten Modell verknüpft. In späteren Entwicklungsphasen kann die Logik in externen Systemen, wie MATLAB/Simulink®-Stateflow, oder auf einer realen Steuerungshardware abgebildet werden.

Die Integration von Verhaltens- und Steuerungsmodellen ist von der jeweiligen Phase im Entwicklungsprozess abhängig. In frühen Phasen liegen nur eingeschränkt detaillierte Modelle vor, weshalb vornehmlich auf die integrierten Verhaltens- und Steuerungsmodelle der physikbasierten Simulation zurückgegriffen wird. Spätere Phasen erfordern die Einbindung weiterer Simulations- bzw. Steuerungssysteme, um die detaillierten Entwicklungsartefakte der Einzeldisziplinen zu synchronisieren.

5.3.5 Skalierbare und modulare Gestaltung physikbasierter Modelle

Die nachfolgend dargestellte Skalierung physikbasierter Modelle kommt im Verlauf eines Entwicklungsprojektes erst nach dem Entwurf einzelner Systemmodule zum Einsatz. Die physikbasierte Simulation von Verarbeitungsmaschinen bietet die Möglichkeit, online-fähige Modelle bereitzustellen, um in frühen Entwicklungsphasen eine Menge an Lösungsalternativen in kurzer Zeit zu bewerten oder im fortgeschrittenen Reifegrad der Entwicklungsartefakte, beispielsweise im Zuge einer Virtuellen Inbetriebnahme, die Funktionsfähigkeit anhand eines Anlagen-

⁵⁸ Siehe dazu SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012).

modells sicherzustellen. Jedoch kann bei einer Vielzahl von abzubildenden Verarbeitungsfunktionen oder Verarbeitungsgütern, vor allem bei der Abbildung von formlabilen Objekten oder Fluiden, nicht immer die online-fähige Berechnung des Simulationsszenarios gewährleistet werden. Darüber hinaus existieren unterschiedliche Physik-Engines, die spezifische Schwerpunkte bei der Abbildung des physikalischen Verhaltens aufweisen. Die bisherigen physikbasierten Modelle setzen jedoch je Simulationsszenario immer nur auf eine spezifische Engine auf.

Daher wurden für die Gestaltung physikbasierter Modelle die Funktionsprinzipien der Kapselung und Hierarchisierung angewandt. Dadurch können zwei wesentliche Einsatzziele erreicht werden: Erstens können die Modelle über den zeitlichen Verlauf eines Entwicklungsprozesses skaliert werden, während sich der Erkenntnisstand und somit auch der Detaillierungsgrad der Modelle kontinuierlich erhöht. Zweitens ist aufgrund modularer und verteilt berechenbarer Physikmodelle die Abbildung komplexer Anlagensysteme bei gegebenen Anforderungen, wie Simulationszeit und Simulationsgüte, möglich.

Die Modellierung der einzelnen Teilmodule der Simulation erfolgt anhand der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Methoden. Die eingesetzten Simulations- und Physikmodelle müssen je nach Fortschritt der Entwicklung sowie des gewählten Betrachtungsraumes unterschiedlichen Anforderungen genügen. Die skalierbare Gestaltung der Modelle, durch die ein für den Abstraktionsgrad hinreichend genaues Abbild des realen Systems erstellt werden kann, gliedert sich dabei in eine vertikale und horizontale Verkettung über die Anlagenhierarchie, die in Abbildung 5.20 skizziert ist.

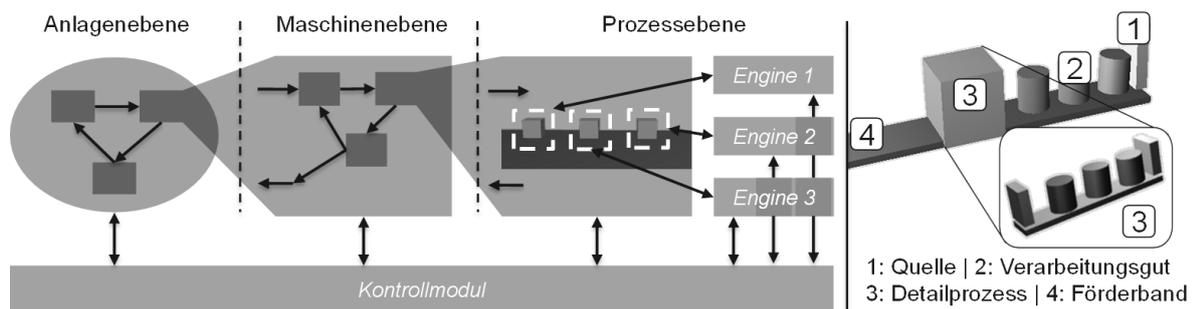


Abbildung 5.20: Konzept und Beispiel der Verkettung physikbasierter Modelle.

Die vertikale Kopplung von modularen Physikmodellen entlang der Anlagenhierarchie bietet die Möglichkeit, große Modelle unter Berücksichtigung der physikalischen Parameter echtzeitfähig darzustellen. Bei vergleichbaren Ansätzen wird das Verhalten der Teilmodule innerhalb der Physiksimulation durch abstrakte

Verarbeitungsmaschinen (LACOUR 2012) abgebildet, wobei die diesbezüglichen Ein- und Ausgangsbeziehungen über vordefinierte Skripte festgelegt sind. Dadurch lassen sich große Modelle aufwandsarm simulieren. Jedoch nur, falls das Verhalten der Anlagenmodule bekannt sowie stationär ist und somit in einfachen Skripten hinterlegt werden kann. Dieser Ansatz wurde erweitert, so dass das spezifische Anlagenverhalten über unterlagerte Maschinen- und Prozessmodelle ermittelt wird. Dabei werden Quellen und Senken benutzt, um zwischen den Betrachtungsebenen der Simulation die Systemzustände der Simulationsobjekte zu übergeben. Diese Detaillierung muss jedoch nicht für alle Elemente auf der Anlagenebene erfolgen. Vielmehr werden nur neu erstellte oder modifizierte Anlagenkomponenten detailliert, deren bestehende Ein-Ausgangsbeziehung nicht bekannt ist oder verändert wurde.

Darüber hinaus können auf Prozessebene unterschiedliche Simulationsmodelle horizontal vernetzt werden. Dazu wird die Anlage ebenfalls in Teilmodule untergliedert, die durch ein eigenes Physikmodell abgebildet werden. Dies ermöglicht den Einsatz unterschiedlicher Physik-Engines, die spezifisch für die abzubildende Wirkpaarung geeignet sind. So können beispielsweise planare Förderstrecken in der Engine Havok sehr gut abgebildet werden, jedoch nicht formlabile Objekte. Hierfür kann unter anderem die Engine NVIDIA® PhysX® oder die Engine Bullet eingesetzt werden. Die Ausgabe der entsprechenden Simulationsergebnisse wird über die Visualisierung synchronisiert.

Die einzelnen Teilmodelle können auf unterschiedlichen Computern berechnet werden, wodurch sich die diesbezüglichen Hardwareanforderungen reduzieren. Die Ein- und Ausgänge der Teilsimulationen sind über eine TCP/IP- bzw. UDP-Datenübertragung gekoppelt. Je nach Anwendungsfall erfolgt die Synchronisierung der Gesamtsimulation und der verschiedenen Teilsimulationen über ein zentrales Kontrollmodul oder dezentral zwischen den Simulationsmodulen. Dabei wird lediglich die Spezifikation der vorliegenden Ein- und Ausgangsgrößen der Anlagenmodule ausgetauscht, so dass eine deterministische Datenübertragung sichergestellt werden kann.

Die Schnittstellen der Teilmodelle können des Weiteren genutzt werden, um die physikbasierten Modelle, die hauptsächlich der Absicherung des dynamischen Verhaltens eines mechatronischen Systems dienen, in andere Simulations- und Entwicklungssysteme zu integrieren. So kann zum Beispiel das Pufferverhalten in einer Ablaufsimulation durch ein Physikmodell detailliert werden. Für die genaue Berechnung der Verformung oder anderen Objektverhaltens der Materialfluss-

objekte auf Prozessebene könnten zudem Ergebnisse einer numerischen Simulation integriert werden. Die physikbasierte mechatronische Simulation kann somit mit Simulationssystemen der über- und unterlagerten Ebenen der Automatisierungspyramide verknüpft werden.

5.4 Interaktive Skizziertechnik für mechatronische Systeme

5.4.1 Übersicht des Teilkonzeptes

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten physikbasierten Modelle und zugehörigen Modellbildungsprozesse bilden die Grundlage für die Analyse des dynamischen Verhaltens von Verarbeitungssystemen, die in frühen Projektphasen entworfen werden. Ein wesentlicher Bestandteil dieser ersten Entwurfsphase ist die Definition unterschiedlicher Lösungsalternativen. In der industriellen Praxis erfolgt dies zumeist in Form von einfachen Hand- und Prinzipskizzen, auf deren Basis eine Bewertung und Verdichtung des Lösungsraumes vorgenommen wird. Um den kreativ-synthetischen Prozess durch ein Simulationsmodell zu unterstützen, wurde eine digitale und mechatronikorientierte Skizzierumgebung (*mechatronic sketcher*) konzeptioniert. Deren grundlegende Verknüpfungshierarchie zur Interpretation von Skizzenelementen ist in Abbildung 5.21 zu sehen.

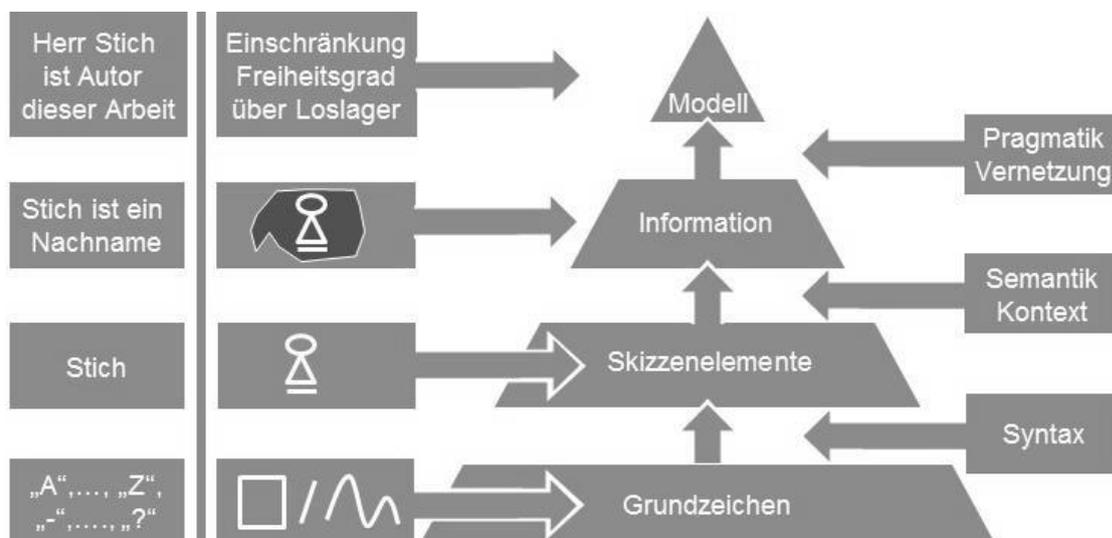


Abbildung 5.21: Verknüpfungshierarchie zur Interpretation von digitalen Skizzen und Vergleich mit dem Aufbau einer Sprache⁵⁹.

⁵⁹ Die Hierarchie orientiert sich an der Data-Information-Knowledge-Wisdom-Pyramide nach BODENDORF (2006).

Die Skizzierumgebung verfolgt den Grundgedanken, dieselbe gestalterische Freiheit und intuitive Definition von Funktionselementen zu ermöglichen, wie es aktuell bei Handskizzen auf Flip-Charts oder White-Boards der Fall ist. Die einzelnen Schritte dienen der Interpretation von skizzierten Inhalten, um diese parallel zum Entwurfsprozess in ein Simulationsmodell zu transformieren, was eine direkte Rückkopplung des resultierenden Systemverhaltens ermöglicht. Dazu wurde ein dreistufiger Interpreter entwickelt, der in einem ersten Schritt die Syntax von Skizzenelementen analysiert und somit die einzelnen Grundzeichen sowie deren Relationen ermittelt. Daran anschließend wird die Analyse auf das Umfeld des identifizierten Skizzenelements erweitert und hinsichtlich der Abhängigkeiten zu bestehenden Elementen der Skizze detailliert. Die Ergebnisse dieser Semantik-Interpretation fließen in die nachgelagerte Modellvernetzung ein, in der das Skizzenelement automatisch mit Daten angereichert und in das hinterlagerte physikbasierte Modell integriert wird. Dieses steht aufgrund der entwurfsparallelen Aktualisierung direkt für die Analyse des Systemausschnittes zur Verfügung und ermöglicht eine Interaktion mit dem entworfenen System.

„Probleme kann man niemals mit derselben Denkweise lösen, durch die sie entstanden sind.“⁶⁰ Um eine disziplinspezifische Vorprägung der Anwender zu vermeiden, orientieren sich die grundlegenden Kategorien der Skizzenelemente nicht an der klassischen Aufteilung in Mechanik, Elektrik und Software, sondern an den technischen Grundumsätzen *Stofffluss*, *Energiefluss* sowie *Informationsfluss* und somit einer Betrachtung der statischen, aber vor allem auch dynamischen Systembestandteile. Diese sind hinreichend für die konzeptionelle Beschreibung der Funktionalität eines Systems, unterstützen das Konstruktionsprinzip der Einfachheit und fördern die disziplinübergreifende Kommunikation. Dabei werden grundlegende Funktionselemente abgebildet und mittels einer Simulation abgesichert. Die Elemente der Skizze werden automatisch und online im Entwurfsprozess analysiert und identifiziert, wodurch die Synthese- und Analysephase verschmelzen. Der Anwender soll also nicht durch zusätzliche Eingaben eingeschränkt werden, die den kreativ-synthetischen Entwurfsprozess stören.

Das in Abbildung 5.21 skizzierte Beispiel, in dem ein Geometrieobjekt durch ein Loslager hinsichtlich der Freiheitsgrade eingeschränkt wird, dient im Folgenden der Veranschaulichung einzelner Bestandteile des Teilkonzeptes.

⁶⁰ Albert Einstein, zitiert nach ZITATE-ONLINE (2016).

5.4.2 Syntaktische Interpretation der Skizzelemente

Alle möglichen Skizzelemente lassen sich in ihren Bestandteilen auf eine geringe Anzahl an Grundzeichen reduzieren, die in Abbildung 5.22 zusammengefasst sind. Geschlossene Vektorzüge umfassen Grundformen der Geometrie sowie beliebige Polygonzüge. Offene Vektorzüge sind Striche, Winkelzüge, Bogensegmente, Polygone n-ter Ordnung, selbstschneidende Kurvenelemente⁶¹ sowie Schrift.

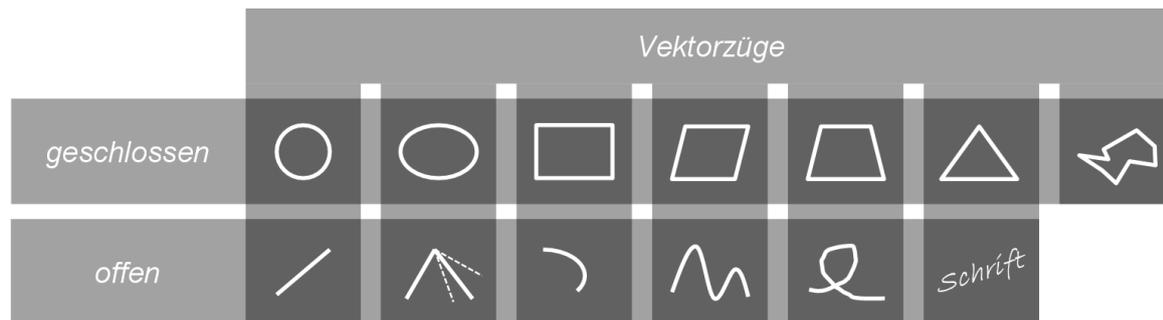


Abbildung 5.22: Grundlegende Bestandteile beliebiger Skizzelemente.

Verglichen mit einer Sprache stellen die Grundzeichen einzelne „Buchstaben“ dar, aus deren Kombination sich eine interpretierbare Information ergibt. Skizzierte Elemente bestehen in den überwiegenden Fällen aus mehreren Grundzeichen, die beliebig kombiniert werden können. Aus den einzelnen „Buchstaben“ wird sozusagen ein „Wort“ gebildet. Innerhalb der ersten Stufe der Interpretation werden die syntaktischen Zusammenhänge analysiert und eine Zuordnung zu den jeweiligen Skizzelementen vorgenommen, die den Stoff-, Energie- bzw. Informationsfluss repräsentieren.

Das skizzierte Element wird zunächst im Interpreter in seine Bestandteile aufgliedert. So besteht das Skizzelement eines Loslagers aus Abbildung 5.21 aus einem Kreis, einem Dreieck sowie einem dazu horizontal angeordneten Strich. Dem Interpreter ist ein Erkennungsalgorithmus unterlagert, der die einzelnen Vektorzüge und deren relative Lage zueinander auswertet. Je Kategorie der Funktionselemente wurde dazu eine Hierarchie der Grundzeichen definiert, die im Folgenden näher dargestellt werden. Für die vorliegende Arbeit wurden repräsentative Skizzelemente anhand einer Auswertung von bestehenden Prinzipskizzen sowie Informations- und Simulationsmodellen⁶² definiert, mit denen Wirkpaarungen für

⁶¹ Selbstschneidende Kurvenelemente können mathematisch beispielsweise durch das kartesische Blatt, einer algebraischen Kurve 3. Ordnung beschrieben werden: $x^3 + y^3 - 3axy = 0$, mit $a \in \mathbb{R}$ (WEISSTEIN 2014).

⁶² Siehe Abschnitt 3.2.3 und Abschnitt 3.4.2.

Verarbeitungsfunktionen abgebildet werden können. Eine Erweiterung der Skizzenelemente kann bei Bedarf erfolgen, sofern diese mit den Grundzeichen abbildbar sind. Jede Klasse an Skizzenelementen hat innerhalb der mechatronik-orientierten Skizze einen eigenen Layer, der im Zuge des Entwurfsprozess synchron gefüllt sowie visualisiert wird und in die Systemsimulation einfließt. Aufgrund der unterschiedlichen Layer können einzelne Skizzenelemente auch mehrfach belegt werden, weshalb die Zugehörigkeit zu Stoff-, Energie- und Informationsfluss in der Skizze durch ein parametrierbares Farbschema kenntlich gemacht wird.

Die Definition und Beeinflussung des Stoffflusses erfolgt durch Objekte der Klassen *Geometrieobjekte*, *geometrische Zwangsbedingungen*, *Materialflussbedingungen*, *Bewegungsbahnen* sowie *Verarbeitungsoperationen*. Abbildung 5.23 zeigt hierzu repräsentative Skizzenelemente.

	Stoffflussbezogene Skizzenelemente							
Geometrieobjekte								
Zwangsbedingungen								
Bewegungsbedingungen								
Materialflussbedingungen	Quelle 1..n	Kont. Quelle	Senke	Puffer				
Verarbeitungsfunktionen	Trenne	Füge						

Abbildung 5.23: Repräsentative Skizzenelemente zur Definition des Stoffflusses.

Die Grundstruktur des Stoffflusses eines Systems wird über geschlossene Vektorzüge realisiert, anhand derer Geometrieobjekte erzeugt werden. In der Skizzierumgebung werden die zweidimensionalen Skizzenelemente automatisch durch eine Extrusion in dreidimensionale Körper überführt. Hierzu ist ein initialer Wert eingestellt. Der Nutzer hat die Möglichkeit, dies bei Bedarf anzupassen, indem er auf den Körper das Längenmaß der Extrusion schreibt. Die Definition von Geometrieobjekten wurde bewusst auf einfache Geometrien beschränkt, um die Anteile der mechanischen Entwicklung bei der Modellierung des Stoffflusses nicht

in den Vordergrund zu rücken. Die Eigenschaften der Geometrieobjekte werden ebenfalls anhand vordefinierter Werte parametrisiert und können über ein Kontextmenü durch den Anwender beeinflusst werden. Neben den allgemeingültigen Werten wie Masse oder Reibung ist hierbei auch das Verformungsverhalten der Objekte einstellbar. Formlabiles Objektverhalten wird dabei innerhalb der Skizzierumgebung über die Möglichkeiten von Physik-Engines abgebildet. Sofern ein detaillierteres Verformungsabbild von Objekten notwendig ist, werden extern aufbereitete Modelle, z. B. mit diskreten Volumenelementen, in die Skizze geladen.

Die zweite Klasse der stoffflussbezogenen Skizzenelemente umfasst Zwangsbedingungen zwischen den Körpern, die an die Gelenk-Typen der Physik-Engines angelehnt sind. Die in Abbildung 5.23 dargestellten Elemente bilden eine feste Einspannung, ein Festlager, ein Loslager, ein Kugelgelenk, eine Längsführung sowie Dämpfer- und Federelemente ab.

Bewegungsbedingungen legen definierte Bahnkurven der Objekte im Raum fest. Prinzipiell können diese Skizzenelemente, die in Positionier-, Pendelbahnen oder umlaufende Bewegungsbahnen geclustert sind, auch den Zwangsbedingungen zugeordnet werden. Jedoch werden Bewegungsbedingungen oft durch eine antreibende Kraft komplettiert, weshalb eine eigene Klasse gewählt wurde. Ein Spezialfall der umlaufenden Bewegungsbahn ist die Mehrfachinstanziierung eines referenzierten Geometrieobjekts. Hierbei wird dieses gemäß der vorgegebenen Anzahl erzeugt und gleichmäßig über die skizzierte Umlaufbahn verteilt. Dies kann beispielsweise für die Definition eines Kettenförderers verwendet werden, der aus einer Vielzahl an gleichen Elementen besteht, die dieselbe Bewegungsbahn beschreiben.

Charakteristisch für Verarbeitungssysteme ist der Stoff- und somit Materialfluss. Dieser kann über Entwurfsmetaphern, wie einfache oder kontinuierliche Quellen sowie Senken oder Puffer, beeinflusst werden. Zudem können über weitere Entwurfsmetaphern die Verarbeitungsfunktionen Trennen und Fügen modelliert werden.

Über *Sensoren und Aktoren*, die Kräfte und somit die Einbringung von Energie in das System repräsentieren, wird der Energiefluss des Systems festgelegt. Durch die in Abbildung 5.24 dargestellten Elemente kann der Zustand des Systems erfasst und über die Einbringung von Energie und somit wirkenden Kräften Einfluss auf diesen genommen werden.

In den meisten Fällen ist eine einfache Detektion von Verarbeitungsgütern zur Abbildung der Sensorik ausreichend. Z. B. durch eine Lichtschranke, die als

Zylinderelement im physikbasierten Modell erzeugt wird. Ist ein spezieller Wirkungsbereich gefordert, so kann dieser zusätzlich mitskizziert werden. Entsprechend der Vorgabe werden quader- oder kegelförmige Objekte als Wirkungsbereich erzeugt. Als Unterarten der allgemeinen Sensorik zur Detektion von Objekten wurden exemplarisch Drucksensoren und Lesegeräte, sogenannte Reader, definiert. Je nach Sensortyp wird anhand des Kollisions-Callbacks der Physik-Engine entweder die an der Sensorfläche wirkende Kraft oder die ID des detektierten Objektes als Sensorwert zurückgegeben.

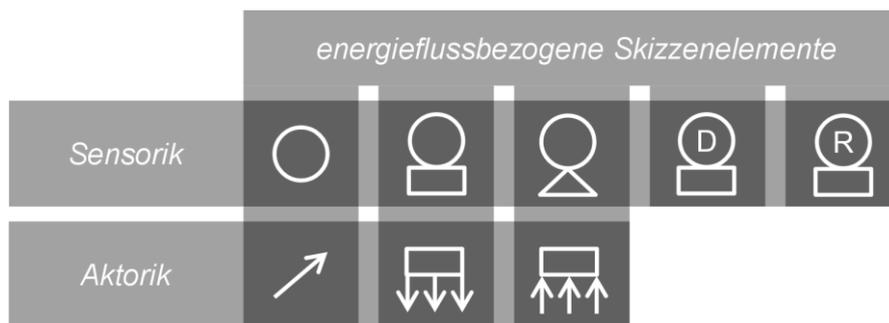


Abbildung 5.24: Repräsentative Skizzelemente zur Definition des Energieflusses.

Die Aktorik beschränkt sich in der Phase des Systementwurfs auf die Bestimmung der wirkenden Kräfte bzw. Kraftfelder, die weiterführend in anziehende und abstoßende Kraftfelder unterteilt werden können. Diese repräsentieren einen Energiespeicher bzw. -wandler, aus dem Energie über die einzelnen Kraftvektoren in das System eingebracht wird. Auf eine weitere Konkretisierung, z. B. einer Umsetzung der Kraftvektoren als elektrischer oder pneumatischer Antrieb, wurde bewusst verzichtet, da diese Festlegung Inhalt der disziplinspezifischen Detaillierung ist.

Der Informationsfluss legt über den zeitlichen Verlauf die Abläufe sowie Zustandsübergänge des Systems fest. Für die zugehörigen Skizzelemente wurde die in Abbildung 5.25 dargestellte Auswahl an *logischen Befehlsoperationen* sowie *Beziehungs-* und *Informationselementen* definiert.

Die ersten drei Logikobjekte sind eine direkte Zuweisung sowie zwei einfache mathematische Operationen, die auf Merker-Elemente angewendet werden können. Weiterhin können gängige Funktionen und Funktionsstrukturen über if-, while-, case- oder for-Anweisungen definiert werden, um State-Charts abzubilden. Zur Identifikation der zugehörigen Bedingungen wurde eine Handschrifterkennung⁶³

⁶³ Die umgesetzte Handschrifterkennung erfolgte auf Basis der Programmbibliothek Microsoft Ink.

verwendet. Wird beispielsweise im Layer Informationsfluss der Ausdruck „if true“ geschrieben, wird automatisch ein diesbezügliches Logik-Element erzeugt, das mit anderen Elementen verknüpft werden kann. Dazu sind Merker, Verzögerungsglieder und Beziehungselemente zur Definition und Beeinflussung der Ein- und Ausgangsbeziehungen zwischen den Skizzenelementen erforderlich. Zudem können den Skizzenelementen Bezeichner (z. B. *Lager*) zugewiesen oder Kommentare im Modell hinterlegt werden. Diese Kommentarelemente können ein spezifisches Skizzenelement referenzieren oder allgemeiner Natur sein.

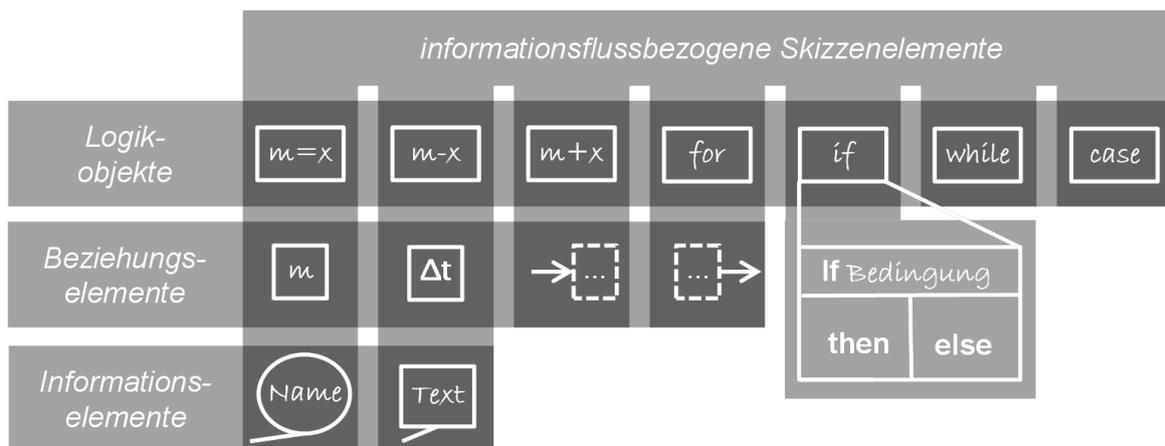


Abbildung 5.25: Repräsentative Skizzenelemente zur Definition des Informationsflusses und Beispielhafte Detaillierung eines Logikobjektes.

Bei der Definition der syntaktischen Hierarchien wurde auf eine einfache Erweiterbarkeit um zusätzliche Grundzeichen und Skizzenelemente geachtet. Die dargestellten Beispiele umfassen repräsentative Elemente, die den Entwurf einer verarbeitungstechnischen Lösung ermöglichen. Dabei fokussiert die Methode lediglich Objekte, die einen konkreten Einfluss auf die Funktion des Systems haben. Weiterführende Elemente, die in der Detaillierung einer Anlage hinzukommen, wie Stützkonstruktionen der Mechanik oder Funktionen der Sicherheitstechnik, werden in dieser ersten Entwurfsphase bewusst ausgeblendet, um die Konkretisierung und Umsetzung der Verarbeitungsfunktion und somit der wertschöpfenden Funktionen zu fokussieren.

5.4.3 Semantische Interpretation der Skizzenelemente

In der zweiten Stufe der Skizzeninterpretation wird neben der relativen Beziehung zu anderen Elementen die Bedeutung der Elemente erfasst und analysiert. Dafür wurden semantische Interpretationsregeln in einer Beziehungshierarchie zusammengefasst. Damit werden die einfachen oder mehrfachen Relationen von Skizzen-

elementen („Wörter“) interpretiert und aus deren Kontext („Satz“) der implizierte Informationsgehalt abgeleitet.

Die Geometrieobjekte weisen, wie in Abbildung 5.26 dargestellt, vor allem eine Beziehung zu den Elementen der Kategorie *Stoff- und Energiefluss* auf. Über unterschiedliche Zwangsbedingungen können beispielsweise gezielt Freiheitsgrade zur Bewegung eines Körpers eingeschränkt werden. Im Beispiel aus Abschnitt 5.4.1 besteht eine einfache Kontextbeziehung zwischen Loslager und Geometrieobjekt. Eine Mehrfachbeziehung ist bei den Bewegungsbedingungen möglich. So können unterschiedliche Bahnen definiert werden, die je nach modelliertem Informationsfluss bei spezifischen Zuständen des Systems aufgerufen werden. Während Materialflussbedingungen eindeutig einem Geometrieobjekt zugeordnet sind, können Objekte durch Sensoren erkannt sowie von Kräften beeinflusst werden.

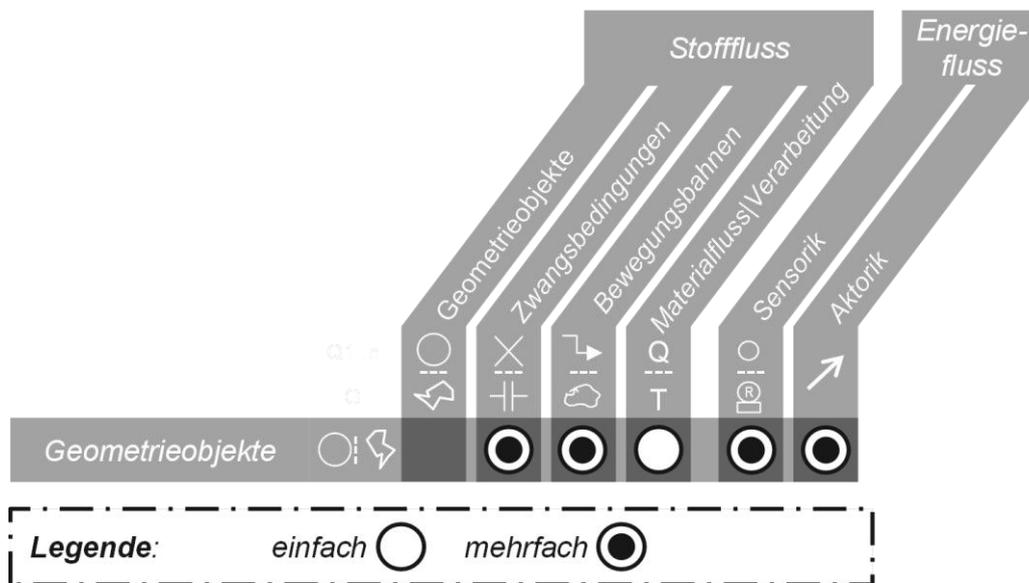


Abbildung 5.26: Kontextbeziehungen von Geometrieobjekten zu Skizzenelementen des Stoff- und Energieflusses.

Eine Übersicht von Relationen mit Elementen des *Informationsflusses* ist in Abbildung 5.27 dargestellt. Logische Operationen sind nur mit Merker-Elementen möglich. Zwischen den Elementen des Stoff-, Energie- und des Informationsflusses werden über Ein- und Ausgänge Daten ausgetauscht. So können geometrische Zwangsbeziehungen, Verfahrensbewegungen, Entwurfsmetaphern und wirkende Kräfte parametrisiert sowie Sensordaten und Logikoperationen ausgelesen werden.

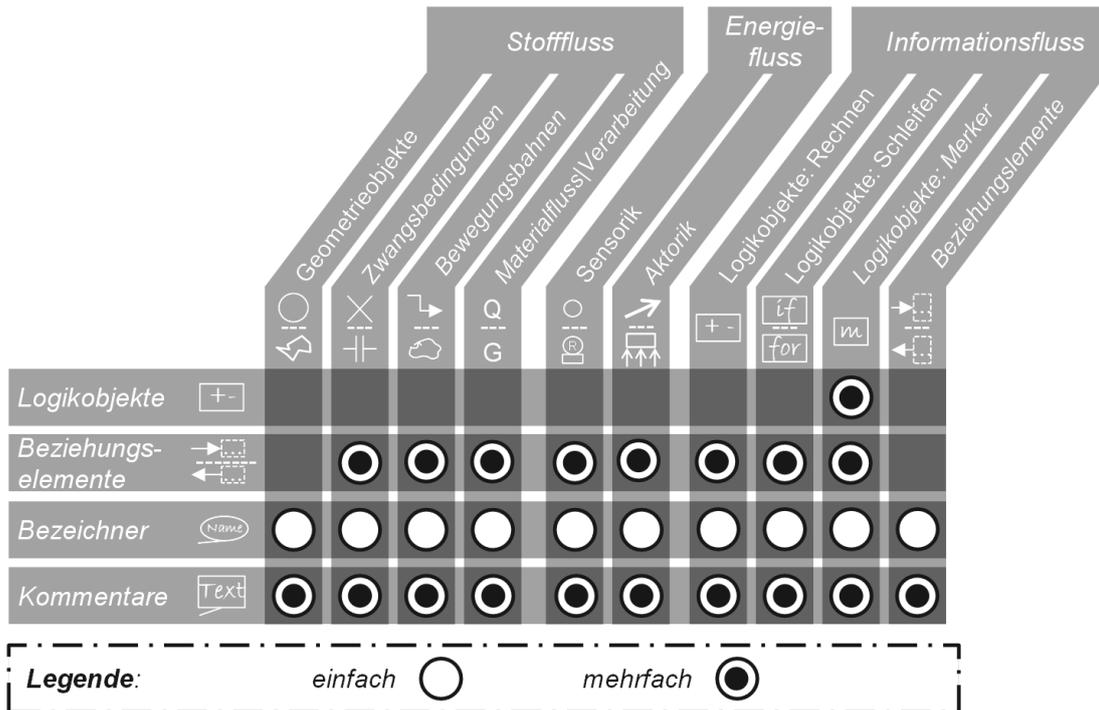


Abbildung 5.27: Kontextbeziehungen von Logikobjekten, Beziehungselementen, Bezeichnern und Kommentaren zu anderen Skizzenelementen.

5.4.4 Pragmatik der Skizzeninterpretation und Modellvernetzung

Für eine Umsetzung in einer Simulation würden die im letzten Abschnitt definierten Einzelinformationen und bidirektionalen Abhängigkeiten bereits für eine Modelltransformation ausreichen. Über eine Merkmalskombination und somit die Vernetzung der vorliegenden Information lässt sich noch weiteres Wissen über die Skizzenelemente bzw. die daraus resultierenden mechatronischen Einheiten gewinnen. Wirkt beispielsweise ein Kraftvektor auf ein Geometrieobjekt, dessen Freiheitsgrad durch eine Zwangsbedingung eingeschränkt ist, kann daraus abgeleitet werden, dass es mit einem Antrieb versehen ist. Somit kann ein wesentlich größerer Informationsgehalt für die spätere Simulation abgeleitet werden. Analog zu diesem Beispiel können ausgewählte mechatronische Einheiten wie

- Antriebe: Geometrie + Rotationsgelenk + Kraftvektor
- Positionierantriebe: Geometrie + Bewegungsbahn + Kraftvektor
- Förderbänder: Geometrie + Fixgelenk + oberflächenparallele Kraftvektor

definiert werden. Sofern diese Merkmalskombination detektiert wird, werden die einzelnen Elemente in einer mechatronischen Einheit zusammengefasst und können im Anschluss mit einem Element der Kategorie Informationsfluss verknüpft und mit einer dezentralen Steuerungslogik ausgestattet werden. Diese Zusammenfassung

unterstützt die Modularisierung und spätere Wiederverwendung. Die Merkmalskombination von einzelnen Skizzenelementen zu mechatronischen Einheiten ist erweiterbar. Dazu werden lediglich die Einzelemente und deren spezifische Kontextbeziehung in der diesbezüglichen Verknüpfungshierarchie hinterlegt.

Die in Abschnitt 5.2 und 5.3 dargestellten Elemente der physikbasierten Simulation sowie die zugehörige Modellbildung können über den gesamten Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Gerade in frühen Phasen, in denen die vorangehend beschriebene mechatronische Skizziermethodik im Zuge des Systementwurfs zum Einsatz kommt, ist es erforderlich, die Modellvernetzung und auch die Interpretation der skizzierten Elemente parallel zum Entwurfsprozess vorzunehmen, um den interaktiven Ansatz zu unterstützen. Der diesbezügliche Ablauf wird im Nachfolgenden dargestellt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Elemente des Stoff-, des Energie- und des Informationsflusses in einem System abgebildet werden.

Das Skizzieren der systemtechnischen Lösungskonzepte ist bewusst auf eine Koordinatenebene begrenzt. Weitere Skizzenebenen dienen nur der Detaillierung, wohingegen eine automatisch erzeugte dreidimensionale Ansicht ausschließlich für die Visualisierung der Simulationsergebnisse genutzt wird. Dadurch wird eine frühe Fokussierung auf einzelne technische Details vermieden.

Die skizzierten Elemente sind eine Aggregation von Entwicklungsartefakten, die eine statische Sicht auf die technische Lösung darstellen. Um eine weitergehende Eigenschaftsabsicherung zu ermöglichen, werden die skizzierten Elemente in den vorgestellten Interpreterstufen ausgewertet und in ein ausführbares Modell überführt. In Versuchsreihen⁶⁴ hat sich gezeigt, dass im Skizzierprozess die zeitliche Differenz (Δt) zwischen dem Zeichnen syntaktisch zusammengehörender Grundzeichen kleiner ist, als zwischen einzelnen Skizzenelementen ($\Delta t, \text{min}$). Wird somit nach dieser Zeitspanne kein weiteres Grundzeichen hinzugefügt, ist das Zeichnen eines einzelnen Skizzenelements statistisch gesehen abgeschlossen. Daraus lässt sich ableiten, wann die Interpretation der Syntax bzw. der Semantik erfolgen kann. Das Zusammenspiel zwischen Benutzer und Interpreter sowie die Kopplung zwischen Skizze und Modell sind in Abbildung 5.28 zu sehen.

Während die Syntax nach jedem einzelnen Grundzeichen ausgewertet wird, werden die gesammelten Daten erst nach einer Zeitspanne $\Delta t, \text{min}$ an den Semantik-

⁶⁴ Von Testpersonen wurde eine Auswahl an Skizzenelementen gezeichnet und die Zeiträume dazwischen aufgenommen sowie ausgewertet. Die Zeitspanne, die im Durchschnitt bei einer Versuchsperson minimal zwischen dem Skizzieren einzelner Elemente gelegen ist, wird als $\Delta t, \text{min}$ bezeichnet. Diese lag bei der Versuchsreihe im Durchschnitt bei 2-3s, kann aber je nach Benutzergruppe auch anderweitig definiert und im Interpreter angepasst werden.

Interpreter übergeben und für die Modelltransformation vorbereitet. Die minimale Zeit zwischen zwei Skizzenelementen wurde im Beispiel in Abbildung 5.28 auf drei Sekunden gesetzt. Hierbei sind die Skizzenelemente des Beispiels aus Abbildung 5.21 dargestellt, die sequenziell gezeichnet werden: ein Geometrieobjekt und ein Loslager.

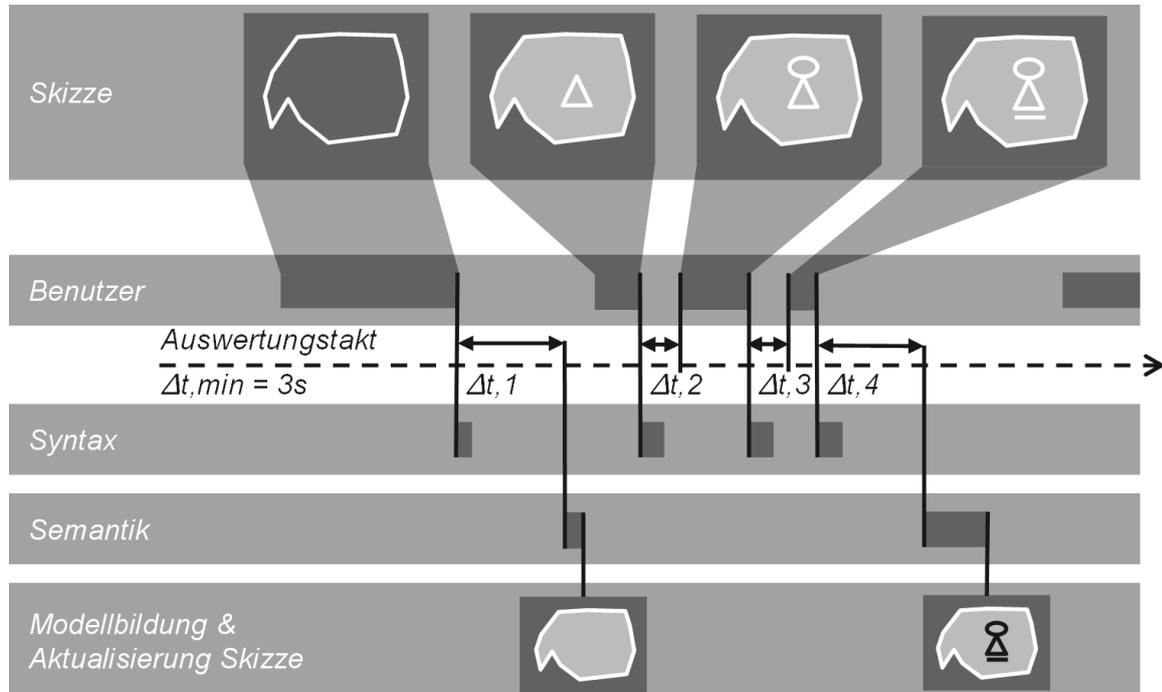


Abbildung 5.28: Interaktionsdiagramm und Ablauf der Skizzeninterpretation.

Nach Definition des ersten Elementes wird dieses syntaktisch interpretiert und ein Geometrieobjekt abgeleitet. Die nach $\Delta t,1$ ($= \Delta t, \text{min}$) durchgeführte Semantik-Interpretation ergibt, dass keine weiteren Elemente im Umfeld des erstellten Geometrieelements vorhanden sind. Somit wird im unterlagerten Daten- und Simulationsmodell ein geometrischer Körper erzeugt und die Visualisierung in der Skizze aktualisiert. Im Skizzierprozess des Loslagers erfolgt die Definition der einzelnen Grundzeichen in Zeiträumen $\Delta t,2$ und $\Delta t,3$ ($< \Delta t, \text{min}$). Somit werden die Elemente Dreieck, Kreis und waagrechter Strich gesammelt mit ihrer syntaktischen Interpretation nach $\Delta t,4$ ($= \Delta t, \text{min}$) an den Semantik-Interpreter übergeben, in dem die relative Beziehung zu anderen Geometrieobjekten analysiert wird. Auf Basis dieser Kontextinformation erfolgt neben der Aktualisierung der visuellen Darstellung in der Skizze die Erstellung eines Loslagers im physikbasierten Modell. Das Loslager referenziert sich auf das Geometrieobjekt und schränkt somit dessen kinematische Freiheitsgrade in der Simulation ein.

Durch die kontinuierliche Modelltransformation können die Entwickler zu jeder Zeit im Entwurfsprozess eine zugehörige Simulation ablaufen lassen und die Eigenschaften des skizzierten Systems online analysieren sowie darauf aufbauend die entworfene Lösung anpassen. Die onlinefähige Simulation wird durch ein physikbasiertes Simulationsmodell realisiert. Durch eine automatische Modelltransformation werden die Skizzenelemente iterativ in der Physik-Engine und den Verhaltens- und Steuerungsmodellen aktualisiert. Die Modellbildung erfolgt unter Verwendung der in Abschnitt 5.3 dargestellten Prozesse. Die Definition von geometrischen Systembestandteilen wurde in der interaktiven Skizzierumgebung bereits so gestaltet, dass die Schritte der Datenaufbereitung entfallen und die physikbasierten Modelle (teil-)automatisch erstellt werden. Die Parametrierung der Modellcharakteristika erfolgt zunächst über vordefinierte Werte⁶⁵. Der Anwender hat jedoch in der Skizze die Möglichkeit, über Kontextmenüs oder durch die direkte Modifikation der Skizzenelemente die Gestaltung und Parametrierung des mechatronischen Systems aufwandsarm zu verändern und somit das Objektverhalten gezielt zu modifizieren. Dies gilt für alle Elemente zur Realisierung des Stoff-, Energie- und Signalflusses.

5.4.5 Schnittstellen zu bestehenden Entwicklungsumgebungen

Nach der technischen Systemspezifikation im Zuge des Entwurfsprozesses können die Skizzenelemente in weitere Zielsysteme exportiert werden. Darüber hinaus stehen auch Simulationsdaten, im Speziellen die Parametrierung des Simulationsmodells, zur Verfügung. Die informationstechnischen Wechselwirkungen zwischen Entwurfs- und Entwicklungsumgebung werden im Folgenden detailliert.

Da der Entwurf die erste Phase des Entwicklungsprozesses darstellt, wurde vornehmlich der Export von Daten fokussiert, um die erstellten Lösungen für die disziplinspezifische Realisierung bereitzustellen. Die Gestaltung von Datenschnittstellen ist je nach fokussiertem Zielsystem unterschiedlich ausgeprägt. Deshalb wurde nur rudimentär die Umsetzung von bestehenden Import- bzw. Export-Frameworks betrachtet. Vielmehr wurde die Schnittstelle zu bestehenden Entwicklungsumgebungen durch ein standardisiertes Format fokussiert und exemplarische Modellelemente in einer Datenstruktur definiert, die in Anlehnung an das XML-

⁶⁵ Als vordefinierter Objekttyp ist für Geometrieobjekte ein Rigid-Body hinterlegt. Sofern formlabiles Objektverhalten notwendig ist, können über ein Kontextmenü Eigenschaften für Soft- bzw. Clothbodies definiert werden. Da die Modellierung von formlabilen Objekten über diskrete Volumenelemente noch manuelle Aufwände bedingt, wurden diesbezügliche Prozessschritte ausgelagert.

basierte Format AutomationML strukturiert ist. Über einen Parser, der für jede Entwicklungsumgebung an deren Datenstruktur angepasst wird, können die Informationen aus der Datenstruktur in das Zielformat transferiert werden. Dies ermöglicht eine Skalierung der Datenschnittstelle von einer manuellen Übertragung bis hin zu einer vollautomatischen Integration.

Aus den stoffflussbezogenen Skizzenelementen werden neben der Geometrie und der Kinematik vor allem Verhaltensmodelle abgeleitet, die spezifische Parameter und Charakteristika enthalten. Darüber hinaus kann bei einem Datenexport die Kategorisierung der Skizzenelemente gespeichert werden. Diese Informationen können beispielsweise in der VIBN genutzt werden, um eine Reduktion der ausdetaillierten Entwicklungsartefakte zu vereinfachen. Dies wurde beispielhaft am CAD-System SolidWorks umgesetzt. Dazu wird am Anfang der Konstruktion für jede Komponente, die für eine Simulation notwendig ist, ein entsprechendes Flag definiert. Anhand dieser Flags kann im Verlauf des Konstruktionsprozesses zu jedem Zeitpunkt aufwandsarm eine Reduktion komplexer Baugruppen auf benötigte Modellelemente erfolgen.

Der Energiefluss liefert die Art und Pose der einzelnen Sensoren und angreifenden Kräfte, die für die Definition von Schaltplänen im E-CAD sowie zur Auslegung der Aktorik verwendet werden. Die Elemente des Informationsflusses können einerseits in Steuerungsmodelle überführt werden. Andererseits werden die zusätzlich definierten Informationen sowie die Querbeziehungen der einzelnen Elemente in den disziplinspezifischen Daten der referenzierten Skizzenelemente hinterlegt.

Der Import stellt eine Inversion des Exports dar. Deshalb können die Datenstrukturen, die zum Mapping der Skizzenelemente auf andere Formate genutzt wurden, für einen Datenimport modifiziert werden. Daten aus bzw. für bestehende Entwicklungsumgebungen müssen dazu vorab aufbereitet werden, da die jeweils vorliegende Abbildung nicht der Datenstruktur des Zielsystems entspricht. Bestehende Daten müssen nachträglich den einzelnen Bestandteilen des Stoff-, Informations- und Energieflusses sowie deren Unterklassen zugeordnet und diesbezügliche Querverbindungen definiert werden. Der Import von mechatronischen Einheiten ist erst sinnvoll, wenn ein Unternehmen bereits einen mechatronischen Baukasten einsetzt, in dem mechatronische Einheiten und zugehörige Skizzenelemente abgelegt sind, auf die zurückgegriffen werden kann. Nach einem Import einzelner Elemente können der Stoff-, Energie- und Informationsfluss an die Rahmenbedingungen des Kundenauftrags angepasst bzw. neu definiert werden.

5.5 Methodische Integration in den Entwicklungsprozess

5.5.1 Übersicht des Teilkonzeptes

Innerhalb des Entwurfs mechatronischer Verarbeitungssysteme werden die entscheidenden Grundzüge für die spätere Umsetzung definiert, weshalb diesen Prozessschritten sowie deren Einbindung in überlagerte Entwicklungsprozesse eine entscheidende Bedeutung zukommt. Die methodische Integration der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Methoden ist in Abbildung 5.29 dargestellt. Die einzelnen Aspekte substituieren bzw. erweitern dabei die Prozessschritte klassischer Vorgehensmodelle der Mechatronik, wie dem Quality-Gate-Modell.

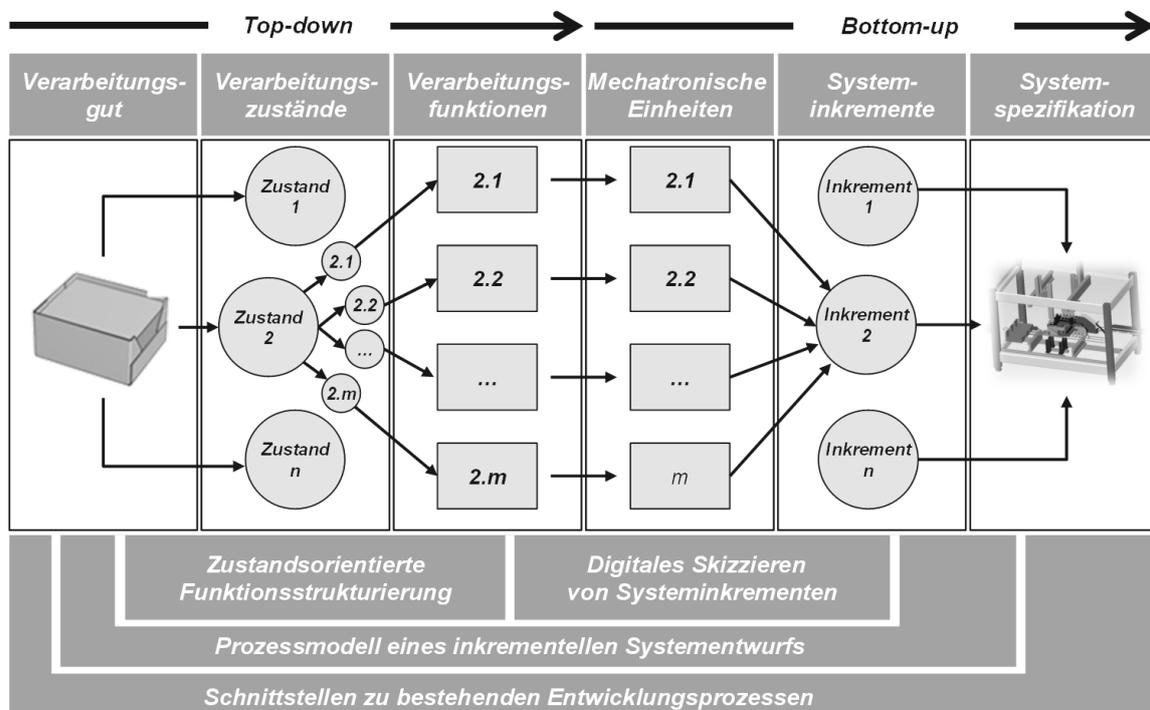


Abbildung 5.29: Inkrementeller Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme am Beispiel einer Verpackungsmaschine.

Ausgehend vom Zielzustand des Verarbeitungsgutes werden die einzelnen Zwischenschritte und zugehörigen Zustände identifiziert sowie die benötigten Verarbeitungszustände abgeleitet. Dieser zustandsorientierten Funktionsstrukturierung folgt der interaktive und simulationsgestützte Entwurf einzelner mechatronischer Einheiten auf Basis einer digitalen Skizze. Für die einzelnen Systeminkremente, die eine definierte Anzahl an Verarbeitungsfunktionen repräsentieren, werden die zugehörigen Entwurfsschritte iterativ durchlaufen, bis eine vollständige und abgesicherte Spezifikation des Verarbeitungssystems vorliegt. Das zugehörige

Prozessmodell, welches in Anlehnung an das agile Vorgehensmodell SCRUM gestaltet ist, wurde in das Quality-Gate Modell der Mechatronik integriert und substituiert diesbezügliche Phasen der Anforderungs- und Lösungsspezifikation.

5.5.2 Prozessmodell eines inkrementellen Systementwurfs

Der interaktive simulationsgestützte Systementwurf ermöglicht in frühen Phasen die Erstellung abgesicherter Lösungsbausteine für das zu entwickelnde Verarbeitungssystem. Die Interaktivität der Entwurfsmethodik unterstützt die Einbindung aller Prozessbeteiligten, wodurch Hierarchien im Team und langwierige Iterationen zwischen den Fachbereichen vermieden werden. Durch den Einsatz der physikbasierten Simulation kann während des Entwurfs die Funktionserfüllung bewertet werden. Zur Eingliederung des Systementwurfs in den Entwicklungsprozess wurde in Anlehnung an das agile Vorgehensmodell SCRUM das in Abbildung 5.30 dargestellte Prozessmodell erstellt, dessen Rollen, Artefakte und Aktivitäten nachfolgend beschrieben werden.

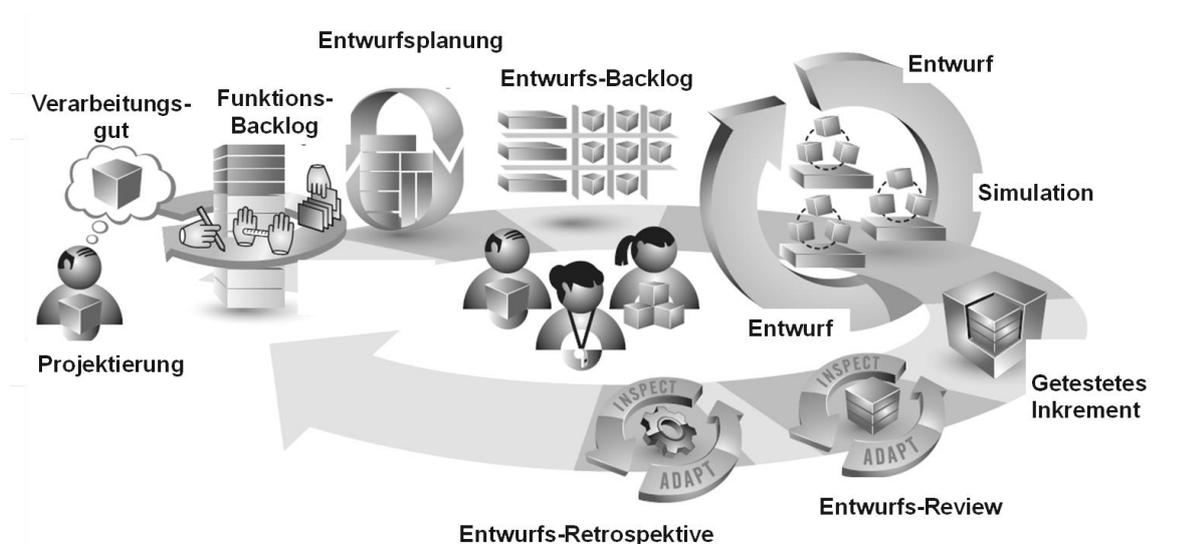


Abbildung 5.30: Prozessmodell eines interaktiven simulationsgestützten Entwurfs funktionsfähiger Systeminkremente⁶⁶.

Rollen im Entwurfsprozess und zugehörige Aufgabengebiete

Für den Entwurfsprozess wurden drei Rollen definiert: Das Entwurfs-Team, die Projektierung und der Moderator. Das Team sollte aus je einem/einer Mitarbeiter/in der Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software bestehen und kann bei größeren

⁶⁶ Gestaltung analog zum Vorgehensmodell SCRUM (in Anlehnung an RUBIN 2012, S. 17).

Entwicklungsaufgaben mit vielen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Verarbeitungsfunktionen optional durch einen Systemingenieur oder Mechatroniker ergänzt werden. Jedes Teammitglied sollte ein Basiswissen der anderen Disziplinen aufweisen, um alle Elemente der Kategorien Stoff-, Energie- oder Informationsfluss definieren und diskutieren zu können. Das Team organisiert sich im Entwurfsprozess selbst und ist in Summe für die Erarbeitung funktionsfähiger Lösungen für die geforderten Verarbeitungsfunktionen verantwortlich.

Der *Moderator* der Entwurfsphase achtet darauf, dass die gegebenen Regeln eingehalten werden und beispielsweise keine Hierarchien zwischen den einzelnen Teildisziplinen und den Mitarbeitern entstehen. Der Moderator ist kein Projektleiter und gibt dem Entwurfsteam weder Anweisungen noch ist er selbst am Entwurfsprozess beteiligt. Diese Rolle ist mit einem SCRUM-Master vergleichbar und beinhaltet die Verantwortung für prozessbedingte Fragen des Entwicklerteams sowie die Beseitigung von Hindernissen und Störungen im Verlauf des Entwurfsprozesses. Beispiele hierfür sind Unklarheiten über die geforderten Verarbeitungsfunktionen, persönliche Konflikte im Team oder mangelnde Kommunikation.

Die *Projektierung* (vergleichbar mit dem SCRUM-Product-Owner) wird im besten Fall mit einem Vertriebsmitarbeiter und einem Systemingenieur besetzt. Die Projektierung bildet die Schnittstelle zum Kunden und muss somit einen Überblick über die vom Kunden gewünschten Funktionen haben sowie deren prinzipielle Umsetzbarkeit abschätzen können. Die Hauptaufgabe der Projektierung ist die Dekomposition der Verarbeitungsaufgabe und die Ableitung der geforderten Verarbeitungsfunktionen. Daher sollte keine zu starke persönliche disziplinspezifische Vorprägung gegeben sein, um der Lösungsfindung nicht vorzugreifen. Die Projektierung analysiert, priorisiert und beschreibt am Anfang des Systementwurfs die benötigten Verarbeitungsfunktionen und die zugehörigen Rahmenbedingungen. Diese werden in einem Funktions-Backlog festgehalten, der eine systematisierte und priorisierte Liste aller Anforderungen darstellt, die sich aus dem Verarbeitungsgut, z. B. einer Packung, und den dafür notwendigen Verarbeitungsfunktionen ergeben. Neben dem Anfangs- und Endzustand des werden für die Zustandstransformation zugehörige Zustandsbeziehungen⁶⁷ und allgemeine funktionale Anforderungen, wie die Ausbringmenge, definiert. Diese werden in Form von konkreten Eigenschaften festgehalten sowie kundenorientiert und fachlich formuliert. Zusätzlich wird mit dem Entwurfsteam für jede Verarbeitungs-

⁶⁷ Entspricht einer Analyse vor- oder nachgelagerter Verarbeitungsfunktionen, zu denen eine Abhängigkeit besteht.

funktion ein gemeinsames Verständnis herbeigeführt sowie diesbezüglich Akzeptanzkriterien für die Funktionserfüllung definiert und dokumentiert.

Phasen des Systementwurfs und zugehörige Arbeitsschritte

Der Systementwurf wird in mehreren Phasen durchgeführt, in denen jeweils ein Inkrement der Systemfunktionalität in eine konkrete Lösung umgesetzt wird. Der Entwurf eines Inkrements wird auf zwei bis drei Stunden angesetzt. Diese Zeit wird nicht verlängert. Sollte die vorhandene Zeit nicht ausreichen, wird an dieser Stelle abgebrochen und unter Berücksichtigung der aufgetretenen Restriktionen erneut eine Planung der nächsten Entwurfsphase vorgenommen. Die nicht realisierten Verarbeitungsfunktionen werden dabei wieder dem Funktions-Backlog zugeführt.

Entwurfsplanung I: Für jede Entwurfsphase wird durch die Projektierung, das Entwurfsteam und den Moderator eine Menge an Verarbeitungsfunktionen definiert, die umgesetzt werden sollen. Diese Funktionen charakterisieren das Inkrement. Das Team schätzt vorgelagert die zum Entwurf der Systembestandteile benötigten Umfänge. Dabei werden die Eigenschaften der Verarbeitungsfunktionen besprochen und Kriterien festgelegt, die zur Bewertung des Produktinkrements herangezogen werden. Ziel ist es, nach jeder Entwurfsphase ein abgesichertes Lösungskonzept an die disziplinspezifische Realisierung zu übergeben.

Entwurfsplanung II: Nachdem ein gemeinsames Verständnis geschaffen wurde, was innerhalb der Entwurfsphase realisiert werden kann, wird der Entwurfsprozess durch das Team geplant. Dazu werden die einzelnen Funktionen weiter spezifiziert, um die Komplexität durch die Aufteilung in kleinere handhabbare Umsetzungsaufgaben zu reduzieren und die notwendige Systemstruktur zu identifizieren. Die Ergebnisse fließen in das Entwurfs-Backlog ein, das konkrete Aufgaben für die spezifische Entwurfsphase umfasst.

Entwurfsprozess: Auf Basis des detaillierten Entwurfs-Backlogs werden mit Hilfe der interaktiven simulationsgestützten Entwurfsmethodik unterschiedliche Lösungsalternativen erstellt und mittels einer Simulation evaluiert. Die anschließende Bewertung anhand der Akzeptanzkriterien ermöglicht die Auswahl einer geeigneten Alternative. Dieser Prozess wird in Abschnitt 5.5.4 detailliert.

Entwurfsreview: Am Ende der jeweiligen Entwurfsphase erfolgt ein Review, in dem die entwickelte Lösung, die zugehörigen Anforderungen und das Vorgehen überprüft werden. Das Entwurfsteam stellt hierbei die Ergebnisse vor und zeigt die Simulationsergebnisse zu deren Validierung. Das Feedback der Projektierung entscheidet über die Abnahme des Entwurfs-Inkrementes. Dabei werden nur gänzlich

funktionsfähige Lösungen anhand der Akzeptanzkriterien abgenommen. Andernfalls werden die Verarbeitungsfunktionen wieder in den Funktions-Backlog zurückgeführt und durch die Projektierung weiterführend aufbereitet, so dass der Entwurf in der nächsten Phase zielgerichteter erfolgen kann. Neben der reinen Bewertung der Lösung sind für das Entwurfs-Team vor allem auch das Feedback zum Erfüllungsgrad und die Art der Gestaltung der Systemelemente wichtig, um dies in den nächsten Entwurfsphasen einfließen zu lassen. Zudem ist die Aufwandschätzung erneut zu durchlaufen, um für die nächste Entwurfsphase fundiertere Aussagen treffen zu können.

Entwurfsretrospektive: Darüber hinaus überprüfen das Entwurfs-Team und der Moderator mit dem Ziel einer kontinuierlichen Verbesserung die Arbeitsweise der letzten Entwurfsphase. Der Moderator muss hierbei eine offene Atmosphäre herstellen, in der konstruktive Kritik geäußert werden kann und auch angenommen wird. Dazu werden Informationen, Optimierungspotenziale und Meinungen gesammelt. Das Team analysiert die zugrundeliegenden Ursachen und leitet gemeinsam Verbesserungsmaßnahmen ab, die priorisiert und dokumentiert werden. Der Maßnahmenplan enthält eine konkrete Umsetzungsroadmap, die durch den Moderator koordiniert und überprüft wird. In der nächsten Entwurfsphase sollten nur Veränderungen eingeplant werden, die realistisch umsetzbar sind. Weitere Verbesserungsmaßnahmen der Arbeitsprozesse werden nach Priorität innerhalb der nächsten Phasen umgesetzt.

Entwurfsvorbereitung: Parallel zum Systementwurf überarbeitet und detailliert die Projektierung kontinuierlich das Funktions-Backlog. Die Basis bilden die Rückmeldungen des Entwurfsteams, aber auch die des Kunden. Verarbeitungsfunktionen werden hinzugefügt, mit weiteren Zusatzinformationen angereichert, abgeändert, mit anderen Funktionen zusammengeführt oder gelöscht. Darüber hinaus nimmt die Projektierung in Vorbereitung auf die nächsten Entwurfsphasen eine erneute Priorisierung vor und schätzt die entsprechenden Umfänge im Entwurfsprozess.

Unterschied zu klassischen sequenziellen Prozessen

Durch das Prozessmodell ist kontinuierlich eine Transparenz bezüglich des Entwicklungsfortschritts möglich. Die validierten Lösungskonzepte, die am Ende einer Entwurfsphase vorliegen, weisen einen Reifegrad auf, der eine Realisierung in den disziplinspezifischen Fachabteilungen zulässt. Anpassungen, die aufgrund geänderter Kundenanforderungen notwendig sind, werden durch die Projektierung berücksichtigt und fließen in die kontinuierliche Überarbeitung des Backlogs ein. Der inkrementelle Entwurf reduziert nicht die Gesamtkomplexität der Entwicklung.

Jedoch wird der Entwurf durch die Dekomposition der Gesamtaufgabe in kleinere, abgegrenzte Verarbeitungsfunktionen überschaubar und damit abschätzbar gestaltet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die zwei wesentlichen Prozessschritte, die Erstellung des Backlogs im Zuge einer zustandsorientierten Funktionsstrukturierung sowie der Ablauf einer Entwurfsphase unter Verwendung einer digitalen Skizzierumgebung, detailliert. Anschließend werden das Prozessmodell beispielhaft in ein bestehendes Vorgehensmodell integriert und die notwendigen methodischen Schnittstellen beschrieben.

5.5.3 Zustandsorientierte Funktionsstrukturierung

Agile Prozesse bauen auf der inkrementellen Erarbeitung von ausführbaren Ergebnissen auf. Dazu ist es notwendig, die Gesamtaufgabe strukturiert zu untergliedern, um abgegrenzte Arbeitsumfänge für die Entwurfsphasen zu definieren. Die Festlegung der geforderten Anlagenfunktionalität stellt die Ausgangsbasis für den Entwurf der Systemelemente dar und beginnt in Zusammenarbeit mit dem Kunden. Die Eingangsdaten dieser Planungsschritte resultieren aus der Verarbeitungsaufgabe, mit der die Art, Menge und Qualität des zu erzeugenden Gutes sowie bestehende Rahmenbedingungen des Unternehmens festgelegt sind. Letztere sind z. B. verpflichtend einzusetzende Norm- oder Zukaufteile.

Klassische Prozesse bei der Anforderungsdetaillierung gehen von den zur Verfügung stehenden Rohmaterialien aus, leiten deduktiv die notwendigen Zustandsübergänge und somit die Verarbeitungsfunktionen ab. Aus den einzelnen Vorgangsoperationen werden anschließend Varianten einer Funktionsstruktur⁶⁸ gebildet. Dieser Prozess wird durchgeführt, bis der gewünschte Endzustand erreicht ist. Aus der Eigenschaftskombination der vorhandenen Zustände sind für die Definition einzelner Verarbeitungsprozesse Freiheitsgrade vorhanden, die bei der Zusammenführung zu einem Widerspruch führen können. Beispielsweise wird bei einem Umformprozess erst spät festgestellt, dass bestimmte, vorab definierte Geometrieconturen nicht in den nächsten Prozessschritten weiterverarbeitet werden können. Diese Widersprüche müssen in einem iterativen Prozess aufgelöst werden und verlangsamen den Entwicklungsprozess.

⁶⁸ Rechnergestützte Methoden zum Synthetisieren von Funktionsstrukturen von Verarbeitungsmaschinen finden sich z. B. in MAJSCHAK (1996).

Um diese Iterationen zu vermeiden, wird ein neuer Ansatz verfolgt, der mit der Methode Assembly by Disassembly (siehe Abschnitt 3.2.2) vergleichbar ist. Durch eine rekursive Dekomposition des Endzustandes eines Verarbeitungsgutes werden iterativ die vorgelagerten Verarbeitungsschritte sowie die notwendigen Funktionen abgeleitet und in Form einer Funktionsstruktur aufbereitet, welche die Basis für das Funktions-Backlog bildet. Für die Dekomposition wurde ein Vorgehen definiert, das in Abbildung 5.31 dargestellt ist und die Projektierung bei der systematischen Erfassung von Zwischenzuständen des Verarbeitungsgutes sowie diesbezüglichen Zwangsbedingungen unterstützt.

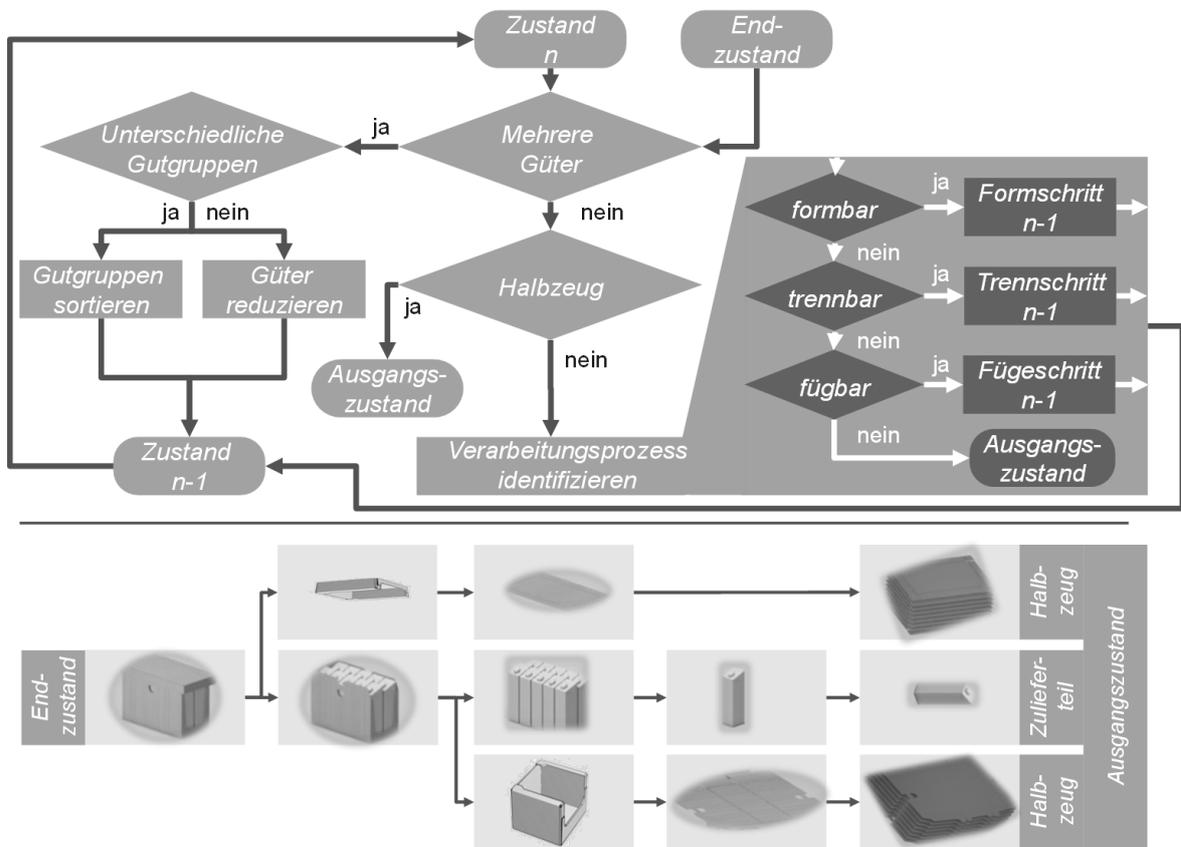


Abbildung 5.31: Dekomposition einer Verarbeitungsaufgabe und exemplarische Umsetzung am Beispiel der Sekundärverpackung.

Der betrachtete (End-)Zustand wird zunächst hinsichtlich der Güter und Gutgruppen analysiert. Besteht der Zustand aus mehreren Objekten gleicher oder unterschiedlicher Art, wie eine Gruppierung von Beutelpackungen in einem Faltkarton, erfolgt eine Aufteilung in Einzelobjekte. Die Vorgangsoperationen *Speichern* und *Dosieren* wirken sich auf die Anzahl der einzelnen Güter aus. Die Operation *Ordnen* spiegelt sich einerseits in den unterschiedlichen Objekten oder Gutgruppen wider, andererseits in der Lage und Orientierung der Objekte im Raum. Letzteres ist

ein implizites Ergebnis jeder Vorgangsoperation. Alternativ wird ermittelt, ob der Zustand durch die Operationen *Formen*, *Trennen* oder *Fügen* hergestellt wurde. Daraus lässt sich der vorgelagerte Verarbeitungsschritt ableiten, der den Ausgangspunkt für weitere Analyseschritte darstellt. Die Dekomposition wird für jede resultierende Menge an Zuständen erneut durchgeführt, bis an jedem Verarbeitungsstrang ein Zustand erreicht ist, der über ein Halbzeug, ein Norm- oder ein Zulieferteil abgebildet werden kann. Sollte die Identifikation eines vorgelagerten Verarbeitungsprozesses nicht möglich sein, wird an dieser Stelle abgebrochen. In diesem Fall ist eine Rücksprache mit dem Kunden notwendig, da das gewünschte Produkt nicht in der definierten Art verarbeitet werden kann. Abbildung 5.31 zeigt eine Anwendung der Dekomposition am Beispiel einer gefüllten Faltschachtel. Als Halbzeuge bzw. Zulieferteile wurden hierbei die Rohlinge einer Faltschachtel sowie die gefüllten Primärverpackungen definiert, die von separaten Anlagen in einem definierten Zustand übergeben werden.

Anhand der Analyseregeln kann eine Verarbeitungsstruktur erstellt werden, die die diskreten Zustände der Verarbeitungsgüter enthält. Durch die rekursive Definition der benötigten Funktionen werden in der ersten Entwicklungsphase nur die Kernfunktionalitäten berücksichtigt, wobei die Dekomposition auch iterativ zur Detaillierung einzelner Verarbeitungsprozesse erneut durchlaufen werden kann. Stütz- und Hüllfunktionen (z. B. Rahmenkonstruktion), die nur indirekt der Erfüllung eines Kundennutzens dienen, werden im Zuge der Strukturierung der Verarbeitungsaufgabe ausgeblendet. Neben der reinen Geometrie können in der Dekomposition auch die Rahmenbedingungen der Produktion weiter zerlegt werden. So lassen sich z. B., ausgehend von der benötigten Ausbringleistung, Fördergeschwindigkeiten, Materialbedarf etc. für die einzelnen Verarbeitungsfunktionen ermitteln. Darüber hinaus können Layout-Restriktionen oder andere Rahmenbedingungen den einzelnen Verarbeitungszuständen zugeordnet werden. Durch eine Inversion der Operationen, die für die Dekomposition notwendig waren und unter Einbeziehung der jeweiligen Zustände lässt sich die für die Verarbeitung notwendige Funktion ableiten und im Funktions-Backlog zusammenfassen.

5.5.4 Interaktives Skizzieren von Systeminkrementen

Wie in Abschnitt 5.5.2 beschrieben, wird aus dem Funktions-Backlog für jede Entwurfsphase ein Entwurfs-Backlog abgeleitet. Dieses beinhaltet die Rahmenbedingungen des Inkrements, das mit der interaktiven simulationsgestützten Entwurfsmethodik konzeptioniert werden soll. In einem ersten Schritt werden dazu

Start- und Endzustand des Verarbeitungsgutes in die Entwurfsumgebung geladen. Darauf aufbauend gestaltet das Entwurfsteam gemeinsam unterschiedliche Lösungsvarianten.

Zwischen Stoff-, Energie- und Informationsfluss bestehen Abhängigkeiten, die iterativ verfeinert werden. Dabei wird das Prinzip der Einfachheit forciert. Zur Erfüllung der Funktionen sollen nur elementare Systemelemente definiert werden. Zu jedem Zeitpunkt des Entwurfsprozesses kann eine Simulation gestartet werden, um die Vollständigkeit der Funktionserfüllung zu prüfen. So kann das Entwurfsteam aufwandsarm den aktuellen Status analysieren und hinsichtlich der definierten Kriterien bewerten. Ist der Funktionstest erfolgreich, liegt eine Lösungsvariante des Systeminkrements vor.

Der Prozess wird wiederholt, um unterschiedliche Alternativen zu modellieren. Die Anzahl der notwendigen Lösungsalternativen wird durch die Projektierung vorgegeben und ist zudem über die Bearbeitungszeit, die für das Entwurfsinkrement definiert wurde, begrenzt. Diese Inkremente werden anhand des Eigenschaftsabbilds aus der Simulation gegeneinander bewertet. Neben dem Erfüllungsgrad der gestellten Anforderungen an das Entwurfsinkrement werden der Komplexitätsgrad der umgesetzten Lösung und daraus resultierende Restriktionen für andere Systeminkremente überprüft. So kann z. B. eine Falteinheit als hochintegratives System oder als serielle Anordnung einfacherer Teilfunktionen realisiert werden. In diesem Beispiel würde auch der benötigte Platzbedarf in Korrelation mit den Layout-Restriktionen eine Rolle bei der Bewertung spielen. Darüber hinaus werden die Lösungskonzepte hinsichtlich der Anzahl an mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Komponenten bewertet. Aus der Anzahl und Beschaffenheit lässt sich abschätzen, wie viel Aufwand im Zuge der disziplinspezifischen Realisierung entsteht.

Das gemeinsam mit der Projektierung ausgewählte Lösungskonzept wird im Anschluss in eine Systemspezifikation überführt. Als Vorlage kann hierfür z. B. der VDMA-Leitfaden zur Systemspezifikation⁶⁹ verwendet werden. Darin werden spezifische Inhalte des Datenmodells aus dem Entwurfsprozess referenziert, das aus der mechatronikorientierten Skizzierumgebung ausgeleitet wird. Darüber hinaus werden alle Aspekte, die im Laufe des Entwurfs-Reviews diskutiert wurden, einschließlich der überlagerten Funktionsstruktur, in der Spezifikation dokumentiert.

⁶⁹ Siehe Abschnitt 3.2.2 und VDMA (2000).

Zur Überprüfung der überlagerten Systemfunktionalität werden einzelne Entwurfsinkremente nachgelagert zum Entwurfsprozess in einer übergreifenden Simulation synchronisiert. Ziel ist hierbei die Überprüfung der Schnittstellen der Teilmodule und der zugehörigen Material- und Informationsflüsse. Für diese Simulationsstudie muss nicht zwangsläufig die Entwurfsumgebung verwendet werden. Die notwendigen Modelle können aus dem vorliegenden Datenmodell abgeleitet und in anderen Simulationssystemen ausgeführt werden. Dadurch kann der Entwurfsprozess von den Modul- sowie Integrationstests entkoppelt werden. Letztere werden parallel zum Entwurfsprozess durch die Projektierung durchgeführt. Sollten sich aufgrund eines unvorhergesehenen Verhaltens Änderungen der Anforderungen ergeben, werden diese im Funktions-Backlog dokumentiert. Innerhalb der Planung der nächsten Entwurfsphasen werden die diesbezüglichen Inkremente hinsichtlich der geänderten Rahmenbedingungen mit dem Entwurfsteam besprochen und notfalls überarbeitet.

5.5.5 Schnittstellen zu bestehenden Entwicklungsprozessen

Das Prozessmodell eines inkrementellen Systementwurfs unter Verwendung einer interaktiven simulationsgestützten Entwurfstechnik stellt einen Teil der Entwicklung dar. Die entstehenden Ergebnisse müssen in den überlagerten Prozess eingebettet werden. Abbildung 5.32 zeigt dies am Beispiel des Quality-Gate-Modells der Mechatronik.

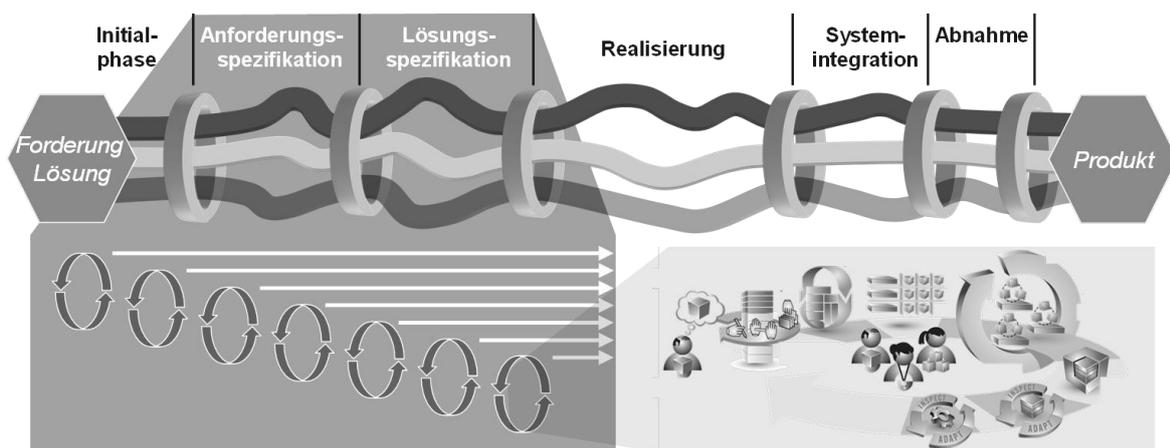


Abbildung 5.32: Eingliederung des interaktiven simulationsgestützten Entwurfs in bestehende Entwicklungsprozesse am Beispiel des Quality-Gate-Modells der Mechatronik.⁷⁰

⁷⁰ Quality-Gate-Modell der Mechatronik nach VDMA (2006); Agiler Entwurf in Anlehnung an RUBIN (2012).

Der Entwurfsprozess substituiert die Prozessschritte von der Initialphase bis zur Systemspezifikation. Darüber hinaus sind Anteile der Modul- und Integrationstests mit abgedeckt. Die verwendeten Testfälle ergeben sich aus den Akzeptanzkriterien eines Entwurfsinkrements. Nach erfolgter Realisierung werden diese erneut durchlaufen, um die Qualität der Ergebnisse kontinuierlich sicher zu stellen. Die Entwurfsmethodik lässt sich analog auch in andere Vorgehensmodelle integrieren. So bildet sie beispielsweise die System-Anforderungsanalyse und den Systementwurf nach dem V-Modell der Mechatronik nach BENDER (2005) ab. Ebenso kann sie als Mikrozyklus am Anfang des Vorgehens nach VDI 2206 eingesetzt werden. Dazu ist eine Anpassung der Schnittstellen im Entwicklungsprozess nötig. Aus der gegebenen Systemspezifikation müssen die jeweiligen Eingangsdaten für die weiteren Prozessschritte abgeleitet und anhand der Anforderungen des gewählten Vorgehensmodells aufbereitet werden.

Bei der Erweiterung bzw. Anpassung bestehender Vorgehensmodelle müssen unterschiedliche Rahmenbedingungen beachtet werden. Hierfür lassen sich z. B. in Anlehnung an ANTON (2011), VDI 2219, VDI 4499-Blatt 1 und 2, oder WÜNSCH (2008) folgende elementare Einflussfaktoren identifizieren: die Unternehmenskultur, die Mitarbeiter, die vorhandenen Ressourcen, die Kosten bzw. der Nutzen, die Organisationsform, die Unternehmensstrategie sowie die Produktstrategie. Für den interaktiven, simulationsgestützten Systementwurf ist vor allem auch der mechatronische Reifegrad für die Skalierung und Integration in die Entwicklungsprozesse entscheidend. Die physikbasierte Simulation, die zugehörigen Modellbildungsprozesse sowie die mechatronikorientierte Skizzierung können in unterschiedlichen Ausprägungsstufen in eine bestehende Entwicklungsorganisation eingeführt werden. Zum Beispiel erfordern mechatronische Modelle eine grundlegende interdisziplinäre und modulare Strukturierung der Systeme. Erst in diesem Fall ist die Wiederverwendung von mechatronischen Einheiten gegeben, durch die der Aufwand in der Entwurfsphase gesenkt werden kann. Abhängig vom Reifegrad der Organisation lassen sich die Teilkonzepte der dargestellten Entwurfsmethodik skalieren. Eine Darstellung der spezifischen Einsatzpotenziale und die diesbezügliche Ableitung unterschiedlicher Ausbaustufen der Methodik sowie eine wirtschaftliche Bewertung ist in Kapitel 7 dargestellt.

5.6 Zusammenfassung der erstellten Methodik

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellte Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme wurde vor dem Hintergrund konzeptioniert, technische und methodische Lücken in frühen Entwicklungsphasen zu schließen und den Systementwurf effizienter zu gestalten. Im Vergleich zu anderen Simulationsansätzen bieten die entwickelten physikbasierten Modelle den Vorteil der echtzeitfähigen Berechnung des Systemverhaltens. Dies ist notwendig, um dem Entwickler im Zuge des Entwurfs eine direkte Rückkopplung der Systemdynamik zu geben, was eine Zwangsvoraussetzung für die Interaktivität im Entwurfsprozess darstellt. Darüber hinaus können physikbasierte Modelle mit geringem Aufwand modelliert werden.

Die Modellbildung ist das Bindeglied zwischen disziplinspezifischen Entwicklungsartefakten und einem ablauffähigen Simulationsmodell. Im Entwurfsprozess werden die skizzierten Systemelemente ohne Zwischensysteme und weiteren Aufwand direkt in eine ausführbare Modelle und somit in eine Simulation zur Eigenschaftsabsicherung überführt. Darüber hinaus wurden spezifische Erweiterungen definiert, die einen Transfer der physikbasierten Modelle auf den gesamten Entwicklungsprozess, z. B. im Rahmen einer VIBN, ermöglichen.

Im Rahmen des Systementwurfs erfolgt die Modellbildung auf Basis der Skizzen-elemente, die spezifische Lösungsalternativen für einzelne Verarbeitungsfunktionen darstellen. Die zugehörige Interpretation dieser mechatronischen Skizzen und deren Überführung in ein Simulationsmodell wurden anhand repräsentativer Elemente von Hand- und Prinzipskizzen gestaltet. Die gewählten Skizzen-elemente wurden bewusst so gewählt, dass sie von allen disziplinspezifischen Experten definiert und interpretiert werden können. Darüber hinaus wird über die Interpretation der Skizzen-elemente im Hintergrund des Entwurfsprozesses die Komplexität der Modelltransformation vor dem Anwender „versteckt“, so dass eine Fokussierung auf die Gestaltung der systemtechnischen Lösung möglich ist.

Neben den technischen Teilkonzepten wurde zudem ein Prozessmodell erstellt, das den methodischen Rahmen für den interaktiven simulationsgestützten Systementwurf darstellt. In Anlehnung an das agile Vorgehensmodell SCRUM wurden spezifische Rollen, Artefakte und Aktivitäten definiert, die einen inkrementellen Entwurf von Verarbeitungssystemen unterstützen. Die diesbezüglichen Prozess-schritte substituieren bzw. erweitern Teile bestehender Vorgehensmodelle, wie z. B. das Quality-Gate-Modell der Mechatronik.

6 Umsetzung und Evaluierung der Entwurfsmethodik

6.1 Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich

Für die einzelnen Abschnitte der im vorangegangenen Kapitel dargestellten Methodik wurden Funktionsprototypen erstellt, um die erarbeiteten Erkenntnisse validieren zu können (Abschnitt 6.2). Der Fokus lag dabei vor allem auf Umsetzungshinweisen bezüglich der Integration in Middleware- bzw. Softwaresysteme. Zusätzlich wurden Einzelmodule in einer digitalen Skizzierumgebung verknüpft und die diesbezüglichen Interaktionen abgebildet (Abschnitt 6.3). Die Methodik wurde an einem Beispiel der Verpackungstechnik evaluiert, das in Abschnitt 6.4 vorgestellt wird. Eine Zusammenfassung der Umsetzung und Evaluierung in Abschnitt 6.5 runden das Kapitel ab.

6.2 Softwaretechnische Realisierung der Teilkonzepte

6.2.1 Umsetzung der erweiterten physikbasierten Modelle

Zur Umsetzung der physikbasierten Modelle wurde zum einen der Forschungsprototyp „virtual engineering environment extended“ (ve³)⁷¹ weiterentwickelt. Zum anderen wurden spezifische Aspekte direkt mit den zugrundeliegenden Physik-Engines und einer zugehörigen Visualisierung realisiert, um eine unmittelbare Validierung der Konzepte zu ermöglichen.

Bezüglich der Umsetzung formlabiler Objekte sowie der Ausweitung der physikbasierten Simulation auf Anwendungsfälle der Verarbeitungstechnik wurde ve³ um die Physik-Engines Bullet und ODE erweitert sowie bestehende Klassen und Methoden der aktuellen Engines adaptiert (siehe Abbildung 6.1). Analog zu Starrkörpermodellen sind in der Softwarearchitektur die grundlegenden Datenmodelle (veDM) und Methoden (veSIM) unabhängig von der Physik-Engine definiert. Dabei können sowohl existierende Physik-Engines der Computergrafik (beispielsweise Havok®, PhysX® oder Bullet) als auch speziell entwickelte Programm-bibliotheken⁷² genutzt werden.

⁷¹ Der Forschungsprototyp ve³ wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München in mehreren Projekten erstellt und weiterentwickelt (EGERMEIER 2002, SPITZWEG 2009, LACOUR 2012). Der Fokus war dabei bisher die physikbasierte Starrkörpersimulation sowie deren Integration in die VIBN.

⁷² Beispielsweise auf Basis der Darstellungen von EBERLY (2010) oder MILLINGTON (2010).

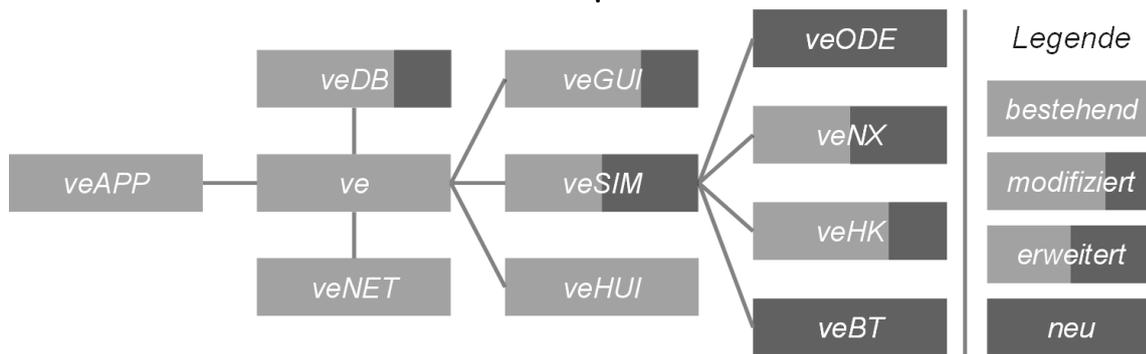


Abbildung 6.1: Überblick der ve^3 -Softwarearchitektur⁷³ und deren Erweiterung.

Sofern unterschiedliche Modellcharakteristika vorliegen, werden diese innerhalb der Engine-spezifischen Programmmodule auf Basis der importierten Daten und Parametervorgaben erzeugt. Durch diese standardisierte Datenaufbereitung können die Modellbildungsprozesse unabhängig von der gewählten Simulationemethode umgesetzt werden. Abbildung 6.2 zeigt den Ablauf zur Erstellung von formlabilen Objekten, der bei Simulationen in ve^3 , aber auch im Zuge des Systementwurfs in der digitalen Skizzierumgebung durchlaufen wird.

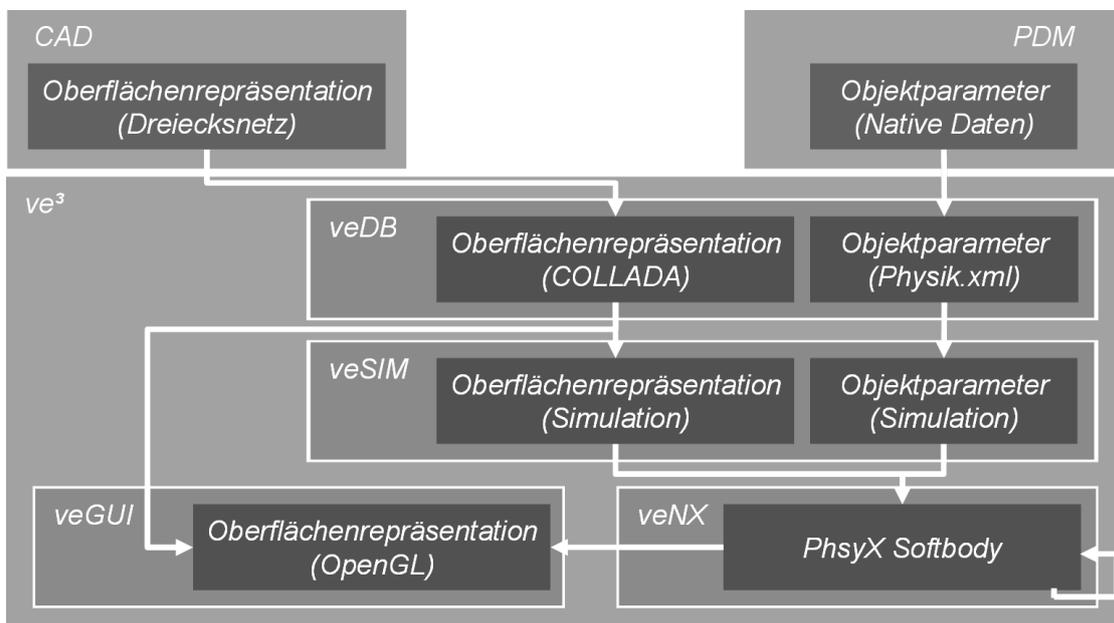


Abbildung 6.2: Funktionsstruktur zur Erstellung von formlabilen Objekten in ve^3 am Beispiel formlabiler Objekte der PhysX®-Engine.

⁷³ Erklärung der Abkürzungen: veDB: Dateiverwaltung || veAPP: Ausführung des Programms || ve: Szenenverwaltung || veGUI: graphische Benutzerschnittstelle || veHUI: hardwareseitige Benutzerinteraktion || veNET: Kommunikation mit der Steuerungstechnik || veSIM: Entwurfsmetaphern und Implementierung der Simulationsobjekte || veODE: Anbindung der Physik-Engine ODE || veNX: Anbindung der Physik-Engine PhysX® || veHK: Anbindung der Physik-Engine Havok® || veBT: Anbindung der Physik-Engine Bullet. Siehe SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012).

Der Import bestehender Daten erfolgt beispielsweise über XML-basierte Dateien, wie COLLADA für die geometrische Repräsentation. Diese können auch als Bestandteile eines übergreifenden Formats (wie AutomationML) umgesetzt werden. Während die Generierung von Modellen für formlabile Objekte nur zu Beginn der Simulation angestoßen wird, werden die Applikation und das Physikmodell kontinuierlich über den Simulationsverlauf aktualisiert, synchronisiert und anschließend visualisiert.

Der Ablauf gilt nicht analog für die Abbildung mittels diskreter Volumenelemente. Hierfür wird die Objektgeometrie gesondert aufbereitet und die Parametrierung anhand der definierten Diskretisierung vorgenommen. Dafür wurden bestehende Datenmodelle um spezifische Bereiche erweitert. Die Modellbildungsprozesse wurden nur teilweise automatisiert umgesetzt, um eine größere Flexibilität bei der Gestaltung der physikbasierten Modelle und eine bessere Experimentierbarkeit zu gewährleisten. Jedoch kann anwendungsspezifisch der Automatisierungsgrad der Modellbildung durch die Implementierung von Automatismen gesteigert werden.

Anhand der in Abschnitt 5.2 dargestellten Modelle und deren Charakteristika wurden bestehende Datenmodelle zur physikbasierten Simulation nach SPITZWEG (2009) und LACOUR (2012) erweitert. Diesbezügliche Teilmodule wurden in die digitale Skizzierumgebung, die in Abschnitt 6.3 dargestellt ist, integriert und unter Verwendung des PhysX® SDK⁷⁴ 2.8.1 exemplarisch umgesetzt. Im Vergleich zu höheren Versionsständen des SDKs können Soft-, Cloth- und Rigidbodies in einem Simulationsszenario abgebildet werden. Dies vereinfacht die Integration der physikbasierten Modelle in eine Simulations- und Entwicklungsumgebung, da unterschiedliche Engines und zugehörige SDKs zur Abbildung von starren und formlabilen Objekten nicht zusätzlich integriert werden müssen. Aktuellere Versionen von PhysX® fokussieren die Abbildung spezifischer Objekttypen.

6.2.2 Umsetzung der Skizzeninterpretation

Die Interpretation der Skizzen wurde in mehreren Ausbaustufen umgesetzt. Ausgehend von einer Beispielanwendung⁷⁵ zum Skizzieren von geometrischen Objekten wurde eine Skizzeninterpretation für rein zweidimensionale Anwendungsfälle realisiert. Hierbei wurden die in Abschnitt 5.4 dargestellten Interpretations-

⁷⁴ Software Developer Kit.

⁷⁵ Diese wurde originär am MIT in Kooperation mit Microsoft für die Interpretation von einfachen Geometrieobjekten sowie kinematischen Bedingungen entwickelt und für einen ersten Funktionsträger der Methodik erweitert sowie angepasst.

regeln durch eigene Erkennungsalgorithmen abgebildet, die sich auf die direkte Analyse von Vektorketten beziehen. Vorteil dieser Umsetzung ist die freiere Gestaltung der verwendeten Grundzeichen. Jedoch müssen abweichende Formmerkmale über Filteroperationen aufbereitet werden. Dies erhöht einerseits den Implementierungsaufwand je Skizzenelement, andererseits schränkt dies die Stabilität der Skizzeninterpretation aufgrund nicht abgedeckter Sonderfälle ein. Für eine zweite Ausbaustufe wurde ein Interpreter auf Basis der Microsoft.Ink⁷⁶ Bibliothek erstellt, dessen Struktur in Abbildung 6.3 zu sehen ist.

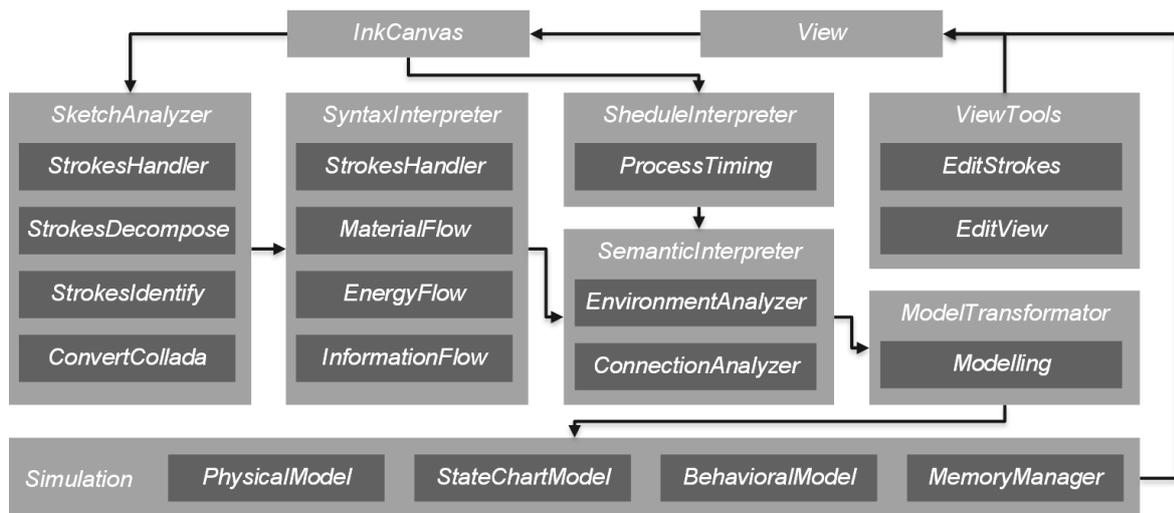


Abbildung 6.3: Einzelmodule und Ablauf zur Interpretation von Skizzenelementen.

Die Unterscheidung der Kategorien Stoff-, Energie- und Informationsfluss wird über eine Benutzereingabe auf dem User-Interface definiert⁷⁷. Die Elemente einer Kategorie werden zunächst anhand der Anzahl der Grundzeichen aufgeteilt und deren Art sowie relative Umgebungsbedingungen ermittelt. Daraus wird auf Basis definierter Zuordnungsregeln die Bedeutung des skizzierten Elements ermittelt. Für eine Erweiterung bzw. Änderung der Skizzenelemente müssen diesbezüglich die Grundzeichen, deren Relation sowie die Verknüpfung zu Bestandteilen der physikbasierten Simulation bzw. der Verhaltens- oder Steuerungsmodelle definiert werden. Neben den Skizzenelementen wurden weitere Operatoren erstellt, die zur Manipulation der Szene dienen. Dies sind u. a. Operatoren zum Löschen oder Verändern der Objekte bzw. zur Veränderung des Blickpunktes auf die Szene.

⁷⁶ Diese Programmierbibliothek von Microsoft stellt Grundfunktionen bereit, die eine einfache Erkennung der Grundzeichen sowie eine Handschrifterkennung ermöglichen.

⁷⁷ Die Unterscheidung zwischen den Kategorien Stoff-, Energie- und Informationsfluss kann je nach Eingabegerät unterschiedlich umgesetzt werden. Bestimmte SmartBoards, aber auch Touch-Panel, bieten die Möglichkeit, unterschiedliche Eingabestifte zu erkennen.

Für den Interpreter wurde zudem ein Testsystem aufgesetzt, das unabhängig von der Modelltransformation und Simulation eingesetzt werden kann. Damit können einfache Tests bei der Definition weiterer oder modifizierter Skizzenelemente durchgeführt werden. Unterschiedliche Analysefunktionen, z. B. zur Erfassung der Skizzierabschnitte und Zeitintervalle (vgl. Abschnitt 5.4.4), ermöglichen die Analyse des Skizzierprozesses zur Verbesserung der Verknüpfungsregeln.

6.2.3 Schnittstellen zu Entwicklungswerkzeugen

Die Aufbereitung von Geometriedaten wurde exemplarisch am CAD-Werkzeug CATIA V5R20 umgesetzt. Neben einer filterbasierten Bauteilreduktion wurden Methoden zur Polygonreduktion angewandt, die eine weitere Reduktion der Datengröße eines Modells ermöglichen. Der gesamte Ablauf der Datenkonvertierung ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

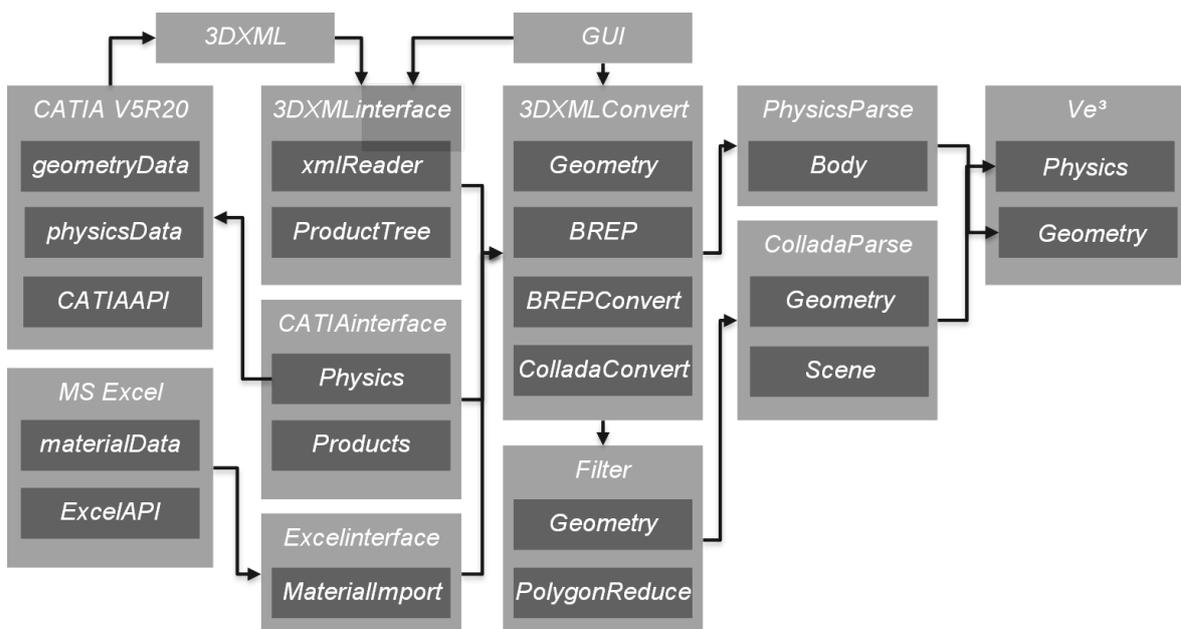


Abbildung 6.4: Exemplarische Aufbereitung von Geometriemodellen für die physikbasierte Simulation am Beispiel CATIA V5.

Über einen Zwischenschritt wird das CATIA-interne Datenmodell (3DXML) durch einen Konverter sowie einen COLLADA-Parser bereitgestellt. Der diesbezügliche Ablauf ist reversibel, so dass über eine Inversion der gegebenen Konvertierungsregeln ein Import von Geometriedaten aus der digitalen Skizzierumgebung bzw. ve³ in das CAD-System möglich ist. Die Daten für die Elemente des Energie- und Informationsflusses können in einer analogen Vorgehensweise abgeleitet und über XML-basierte Zwischendateien in definierte Zielsysteme transferiert werden.

6.3 Struktur einer Entwurfs- und Simulationsumgebung

6.3.1 Überlagerte Softwarearchitektur

Die Umsetzung der mechatronikorientierten Skizzierumgebung erfolgte vor dem Hintergrund des industriellen Anwendungsbeispiels, das in Abschnitt 6.4 detailliert wird. Zu diesem Zweck wurden einerseits Teilmodule des Interpreters, andererseits physikbasierte Modelle in einer Entwurfs- und Simulationsumgebung synthetisiert, deren Aufbau und User Interface in Abbildung 6.5 dargestellt ist.

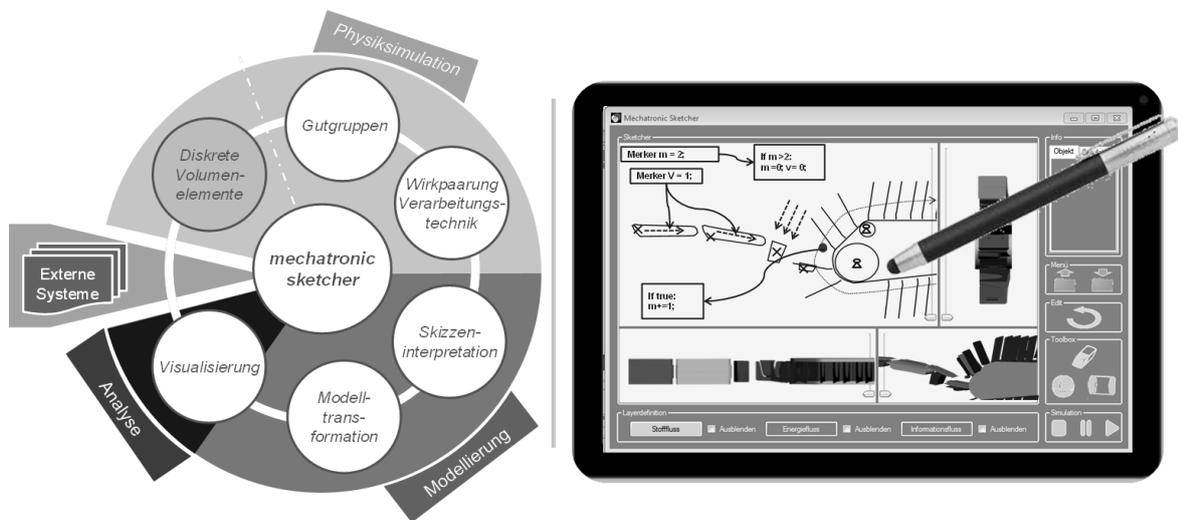


Abbildung 6.5: Struktur und User Interface des Entwurfs- und Simulationswerkzeuges *mechatronic sketcher*.

Die Funktionsfähigkeit und damit die Validierung der einzelnen Bestandteile der Methodik wurden mit vorgelagerten Software-Prototypen sichergestellt. Grundgedanke bei der Konzeptionierung der Architektur und Schnittstellen war ein modularer Aufbau, in dem die Teilbereiche der Methodik zusammengesetzt werden. Die Softwarearchitektur basiert auf drei maßgeblichen Teilen. Die Umsetzung der physikbasierten Simulation sowie der Skizzeninterpretation erfolgte durch die exemplarische Übernahme von Teilmodulen, deren Umsetzung vorangehend in Abschnitt 6.2 dargestellt wurde. Zusätzlich sind weitere Projektionsebenen und eine dreidimensionale Visualisierung des skizzierten Systems möglich. Letzteres wird vornehmlich zur Darstellung der Simulationsobjekte verwendet.

Eine Übersicht des User Interfaces, das mit WPF umgesetzt wurde, ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die aktuelle Implementierung fokussiert den Einsatz eines Touch-Displays. Prinzipiell lassen sich aber auch andere interaktive Eingabegeräte, wie

SmartBoards, integrieren. Diese dienen neben der Datenerfassung ebenfalls der Visualisierung der Modellelemente sowie der Simulationsergebnisse. Bei der Oberflächengestaltung wurde bewusst nur eine geringe Anzahl an Eingabemöglichkeiten definiert, um den Skizzierprozess in den Vordergrund zu stellen.

6.3.2 Programmablauf und Interaktionsbeziehungen

Der prinzipielle Ablauf bei der Interpretation der Skizzenelemente wurde bereits in Abschnitt 5.4.4 dargestellt. Dieser wird im Folgenden um Implementierungsdetails ergänzt. Sobald der Nutzer ein Element in der Skizzierumgebung zeichnet, wird eine Instanz eines InkCanvas erzeugt, dessen Inhalte an den Interpreter übergeben werden. Dieser wertet in zwei Stufen die Syntax sowie die Semantik aus und übergibt die Elemente an die unterlagerte Modelltransformation. Hierbei sind Konvertierungsklassen für Modellelemente des Stoff-, des Energie- und des Informationsflusses vorhanden. Diese setzen die Skizzenelemente anteilig in das physikbasierte Modell bzw. das Verhaltensmodell oder das logische Ersatzmodell um und aktualisieren die Visualisierung des Sketchers. Sofern der Bediener eine Simulation startet, wird eine Instanz des Physikmodells in der Simulationsszene erzeugt und die Ergebnisse in der 3D-Visualisierung dargestellt. In den projektierten Ansichten, die statisch bleiben, können jederzeit weitere Modellelemente definiert werden. Diese werden automatisch dem Physikmodell und damit auch der laufenden Simulation hinzugefügt. Wird die Simulation durch den Benutzer beendet, werden alle Modellelemente auf den Status zurückgesetzt, der innerhalb der Skizze vorliegt.

Zur Triangulation der skizzierten Geometrieobjekte wurde der Cutting-Edge-Algorithmus eingesetzt und auf die Abbildung von dreidimensionalen Objekten erweitert. Dies ist notwendig, da die Datenaufbereitung direkt in der Skizzierumgebung erfolgt. Bei einem Einsatz der physikbasierten Simulation in der VIBN ist dieser Prozess automatisch beim Export aus CAD-Systemen über hinterlegte Vernetzungsalgorithmen abgebildet.

Während die Erstellung von formlabilen Objekten auf der Basis der verwendeten Physik-Engine automatisch vorgenommen wird, sind die Modellbildungsprozesse zur Abbildung formlabiler Objekte über den Ansatz der diskreten Volumenelemente nur in Teilen automatisch umgesetzt. Dies ist darin begründet, dass die erhöhte Flexibilität bezüglich des einstellbaren Objektverhaltens und die Berücksichtigung der problemspezifischen Rahmenbedingungen weitere Eingaben des Anwenders benötigen. Der aktuelle Modellbildungsprozess erfolgt daher in externen Systemen

zur Aufbereitung und Vernetzung geometrischer Daten, wie z. B. 3dsMax oder Blender.

6.3.3 Installations- und Betriebsvoraussetzungen

Die physikbasierte Simulation stellt Anforderungen an die Prozessorleistung der verwendeten Rechenhardware. Dazu wurden repräsentative Simulationsszenarien bei einer Diversität an Objekttypen und einer Variation der Objektzahl auf mehreren Rechensystemen analysiert. Auf dieser Basis wurde die entwickelte Methodik so ausgelegt, dass ein Einsatz mit vorhandenen CAx-Workstations der Unternehmen möglich ist. Dies gilt nur für die Simulation einzelner Entwurfsinkremente. Für nachgelagerte Integrationstests in Form einer Systemsimulation wird der Einsatz spezieller Simulationsrechner bzw. die verteilte Berechnung der Simulation (vgl. Abschnitt 5.3.5) empfohlen.

Zum Einsatz der Skizzierumgebung ist die Installation der Systemsoftware PhysX®, des SDK PhysX 2.8.1 sowie des zugehörigen Patch PhysX 2.8.1 SDK_VRD notwendig. Diese beziehen sich auf die aktuell implementierte Physik-Engine. Darüber hinaus werden Bestandteile des Tablet PC Edition SDK von Windows benötigt. In diesem ist die Klassenbibliothek Microsoft.Ink enthalten, auf deren Basis die Analyse der Grundzeichen eines Skizzenelements erfolgt. Zur Anwendung der Applikation auf einer touchfähigen Bedienoberfläche, z. B. auf einem Tablet, müssen im Vorfeld hardware-spezifische Parameter im Programm angepasst werden, um die Funktionsfähigkeit des Interpreters zu gewährleisten.

6.4 Evaluierung im Umfeld der Verpackungstechnik

6.4.1 Rahmenbedingungen des Anwendungsbeispiels

Die systemtechnische Auslegung von Verarbeitungsfunktionen unter Berücksichtigung formlabilen Objektverhaltens stellt vor allem bei hochintegrierten Maschinen, beispielsweise aus der Verpackungstechnik, eine große Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurde für die Validierung des gezeigten Lösungsansatzes ein Entwicklungsszenario der Verpackungstechnik gewählt, das im Folgenden spezifiziert und umgesetzt wird. Teilbereiche des Anwendungsbeispiels wurden bereits zur Veranschaulichung der Methodik im Rahmen des letzten Kapitels dargestellt. Dieser Abschnitt bettet die einzelnen Teilbereiche in den Kontext der gesamten Aufgabenstellung des fokussierten Entwicklungsprojektes

ein. Das betrachtete Unternehmen⁷⁸ hat bereits ein modulares Prinzip bei der Entwicklung etabliert. Dieses ist durch eine Hierarchie des Verarbeitungssystems, bestehend aus parametrierbaren Komponenten, Bausteinen, Einheiten sowie Funktionsgruppen charakterisiert. In Standardfällen kann ein Großteil des Kundenauftrages aus dem zugehörigen mechatronischen Baukasten abgedeckt werden. Bei weiteren Funktionen oder kundenspezifischen Anforderungen erfolgt eine Anpassung bestehender bzw. eine Entwicklung neuer Komponenten oder Funktionsbausteine, die in die standardisierte Grundstruktur der Verpackungsmaschine integriert werden. Das betrachtete Spektrum der Verarbeitungsaufgaben ist dabei der Sekundärverpackung zuzuordnen, die sich, wie in Abbildung 6.6 dargestellt, in den gesamten Verpackungsprozess eingliedern lässt.

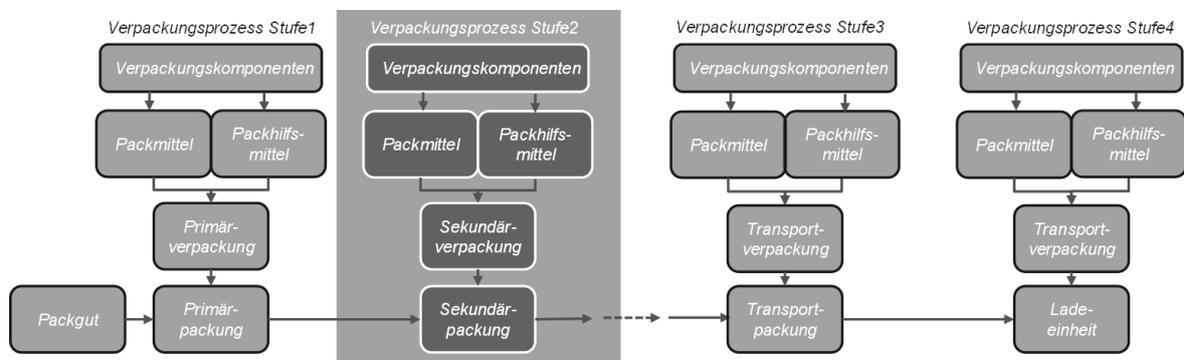


Abbildung 6.6: Verpackungsprozess (DIN 55405, S. 7) und Betrachtungsbereich des Anwendungsbeispiels.

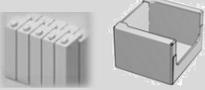
6.4.2 Identifikation der benötigten Verpackungsfunktionen

Das gegebene Verarbeitungsgut ist eine gefüllte Wrap-Around-Faltschachtel. Die darin beinhalteten formlabilen Beutelverpackungen werden von einer vorgelagerten Maschine produziert und in einem egalisierten Zustand liegend übergeben. Diese Egalisierung muss über den gesamten Verpackungsprozess aufrecht erhalten werden, damit eine möglichst hohe Packungsdichte in der Sekundär- und Tertiärverpackung erreicht werden kann. Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen erfolgte die dargestellte Analyse der benötigten Verarbeitungsfunktionen. Tabelle 6.1 zeigt eine Auswahl der Zustandstransformationen sowie die abgeleiteten Verarbeitungsfunktionen und zugehörigen Akzeptanzkriterien, die durch eine Dekomposition des Verarbeitungsgutes (vergleiche Abbildung 5.31) abgeleitet wurden. Aus den zu definierenden Funktionen wurden durch die Projektierung

⁷⁸ Basierend auf dem Produktportfolio des betrachteten Unternehmens wurde ein fiktives, aber repräsentatives Anwendungsszenario definiert, anhand dessen die Entwurfsmethodik bewertet werden kann.

Funktionsstapel für die Entwurfsphasen definiert. Die Gestaltung eines Entwurfsinkrements wird nachfolgend exemplarisch für die Funktionen „Umorientieren & Gruppieren“ detailliert. Dabei müssen formlabile Beutel, die in einer Sequenz aus einer vorgelagerten Maschine bereitgestellt werden, im Maschinentakt hinsichtlich ihrer Orientierung beeinflusst und in einer definierten Anordnung zusammengestellt werden.

Tabelle 6.1: Charakterisierung exemplarischer Verpackungsfunktionen.

Eingangszustand	Ausgangszustand	Funktionsbeschreibung	Akzeptanzkriterium
		Beutel umorientieren	Egalisierung bleibt erhalten
		Beutel gruppieren	Orientierung & Gruppierung bleiben erhalten
		Karton falten	Form bleibt erhalten
		Stofffluss vereinen	Packung & Orientierung bleiben erhalten

6.4.3 Interaktiver und simulationsgestützter Systementwurf

Ausgehend von den ermittelten Zustandstransformationen des Verpackungsgutes wurden im Mechatronic Sketcher Lösungsalternativen für die geforderte Verarbeitungsfunktion erstellt. Das Entwurfsteam detaillierte dafür zunächst eine Lösungsvariante, die aus mehreren planaren Förderbändern und einem umlaufenden Band mit mehreren Fächern besteht. Ausschnitte des Entwurfsprozesses sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

In einem ersten Schritt wurde das Verarbeitungsgut charakterisiert und hinsichtlich der Objekteigenschaften parametrisiert. Hierbei wurde das formlabile Verhalten eingestellt und eine Quelle zur Erzeugung definierter Objekte angelegt. Darauf aufbauend erfolgte die Definition der Kinematik über Elemente des Stoff- und Energieflusses. Nach der Definition mehrere Förderbänder und eines Kettenförderers konnte das Entwurfsteam durch eine erste Simulation zwei maßgebliche Anpassungen des Entwurfs ableiten. Zum einen mussten die Geometrieobjekte des

Kettenförderers sowie die Größe der zugehörigen Fächer verändert werden. Zum anderen ist eine Synchronisation des sogenannten „Fächersammlers“ und der vorgelagerten Förderbänder nötig. Neben der Anpassung der Stoffflusselemente wurden dafür Sensoren sowie logische Elemente in der skizziert.

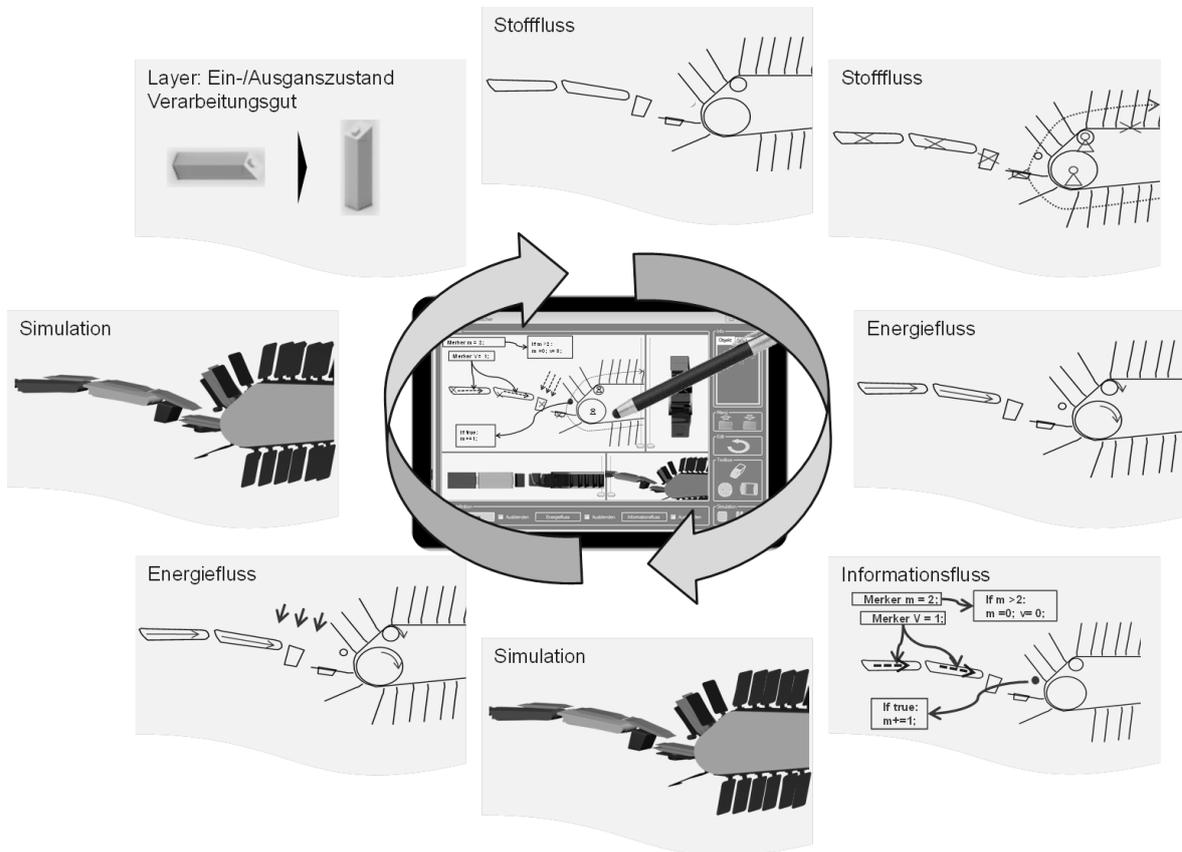


Abbildung 6.7: Interaktiver Entwurfsprozess und simulative Absicherung einer definierten Lösungsalternative.

In einem weiteren Simulationslauf konnten die einzelnen Packungen durch den Fächersammler aufgenommen werden. Nur bei einer höheren Fördergeschwindigkeit kam es zu nicht prognostizierten Effekten an einem der vorderen Förderbänder. Hierbei konnte die Packung nicht mehr definiert positioniert werden. Dies war darin begründet, dass durch die Schräglage des Förderbandes die Reibung nicht ausreichend für eine definierte Positionierung des Verpackungsgutes ist. Daher wurde ein Kraftfeld erstellt, das einen definierten Druck auf die Verpackung ausübt und somit die Haftung am Förderband sicherstellt⁷⁹. In einer Simulation

⁷⁹ Dies kann beispielsweise über Saugelemente im Förderband oder alternativ über eine Schikane, wodurch das Verpackungsgut geführt wird, umgesetzt werden. Eine Konkretisierung erfolgt jedoch erst im Zuge der disziplinspezifischen Detaillierung.

konnte daraufhin der gewünschte Endzustand der Verarbeitungsgüter erzeugt werden.

Für die Funktionskombination „*Umorientieren & Gruppieren*“ wurden weitere alternative Inkremente entworfen und anhand der Ausbringleistung, Komplexität der Lösung sowie des Erfüllungsgrades der Systemfunktionalität verglichen. Die ausgewählte Lösung wurde im Anschluss in die Systemspezifikation überführt. Neben der übergreifenden Funktions- und Systemarchitektur wurde je Verarbeitungsfunktion auch die Charakterisierung sowie die Beschreibung des Lösungskonzeptes erstellt und auf Daten der Skizze referenziert. Darüber hinaus wurden weitere Daten dokumentiert, die für eine Weitergabe an die disziplinspezifische Realisierung benötigt werden. Beispiele hierfür sind in der Vorlage zur Systemspezifikation zu finden (z. B. Risikoanalyse, vgl. VDMA (2000)). Der gezeigte Prozess kann iterativ durchlaufen werden, bis eine vollständige Systemspezifikation für die Realisierung vorliegt.

6.5 Zusammenfassung der Umsetzung und der Evaluierung

Durch die exemplarische Umsetzung konnte die entwickelte Methodik zur frühzeitigen Auslegung mechatronischer Verarbeitungsmaschinen anhand interaktiver und simulationsgestützter Skizzen validiert werden. Die einzelnen Bestandteile können jedoch auch im Zuge eines Entwicklungsprozesses skaliert bzw. als Teilmodule eingesetzt werden. Darüber hinaus konnten auf der Grundlage des Anwendungsbeispiels auch Daten für die qualitative und quantitative Bewertung der Methodik ermittelt werden. Die erzielbaren Nutzenpotenziale werden im nachfolgenden Kapitel 7 nochmals eingehend dargestellt und bezüglich der Integrationsfähigkeit in weiteren Entwicklungsphasen sowie in Relation zu den Anforderungen aus Kapitel 4 bewertet.

7 Analyse und Bewertung der Nutzenpotenziale

7.1 Kapitelüberblick und Betrachtungsbereich

Der Erfolg eines neuen Lösungsansatzes zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass der Transfer in die industrielle Anwendung gelingt. Im Folgenden werden die entwickelten Methoden den Anforderungen aus Kapitel 4 gegenübergestellt und ergänzend zum umgesetzten Anwendungsbeispiel weitere Einsatzpotenziale aufgezeigt (Abschnitt 7.2). Diese werden in Abschnitt 7.3 den benötigten Aufwänden gegenübergestellt und in einer anwendungsspezifischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung analysiert und bewertet.

7.2 Einsatzpotenziale und resultierender Nutzen

7.2.1 Erweiterung der physikbasierten Simulation

Modelle zur Abbildung von Verarbeitungsprozessen

Die physikbasierte Simulation findet aktuell vornehmlich als Erweiterung von Kinematikmodellen bzw. zur Abbildung von Prozessen der Produktionslogistik Einsatz. Dies ist durch die Restriktion auf ausgewählte Starrkörpermodelle begründet. Durch die Erweiterung der physikbasierten Modelle um die Gutgruppen Strang-, Faden-, Flachform-, Stück-, Schüttgut, pastöses Gut sowie (eingeschränkt auch) Flüssigkeiten konnte das Anwendungsfeld der physikbasierten Simulation erweitert werden. Durch bestehende Ansätze von Physik-Engines sowie die Abbildung über diskrete Volumenelemente können zudem formlabile Objekte in der Simulation abgebildet werden. Das Verhalten der Objekte ist dabei nicht mit einer detaillierten FEM-Simulation vergleichbar, jedoch für eine qualitative Bewertung von Systemen in frühen Entwicklungsphasen ausreichend.

Neben der Definition unterschiedlicher Gruppen von Verarbeitungsgütern können über neue Entwurfsmetaphern sowie eine Kombination von bestehenden Aktoren und Sensoren die Vorgangsguppen Trennen, Fügen, Formen, Speichern, Dosieren, Fördern sowie Ordnen und damit eine Vielzahl an Verarbeitungsprozessen aufwandsarm in der physikbasierten Simulation abgebildet werden. Die vorliegenden Wechselwirkungen zwischen Verarbeitungsgut und -system, wie Fremd- und Eigenkollision, Kontaktberechnung mit Reibung und Stoß, können dynamisch und statisch ausgewertet und echtzeitfähig dargestellt werden. Dadurch wird eine

Interaktivität der Simulation möglich, die dennoch qualitativ plausible Ergebnisse zur Einschätzung der Funktionserfüllung bereitstellt. Die Ersatzmodelle zur Abbildung von elastischem und plastischem Verhalten sowie zur Abbildung von Effekten wie Bruch und weiteren Trennvorgängen stellen eine hinreichende Ergebnisqualität bereit, um Konzepte in einer frühen Phase der Entwicklung bewerten zu können. Neben der Simulation von dreidimensionalen formlabilen Objekten, wie dem Verpackungsgut im Beispiel aus Abschnitt 6.4, werden ebenfalls ein- und zweidimensionale Objekte abgedeckt.

Um das Potenzial der Simulationsansätze für einen entwicklungsübergreifenden Einsatz zu ermitteln, wurden diese beispielhaft in anderen Anwendungsbereichen, wie der Virtuellen Inbetriebnahme oder der Optimierung bestehender Produktionssysteme, eingesetzt. Abbildung 7.1 zeigt zwei weitere beispielhafte Einsatzszenarien. Diese beziehen sich einerseits auf die Handhabung von Matten aus Verbundwerkstoffen. Andererseits wurde das Verhalten eindimensionaler Objekte am Beispiel eines formlabilen Versorgungsschlauches untersucht.

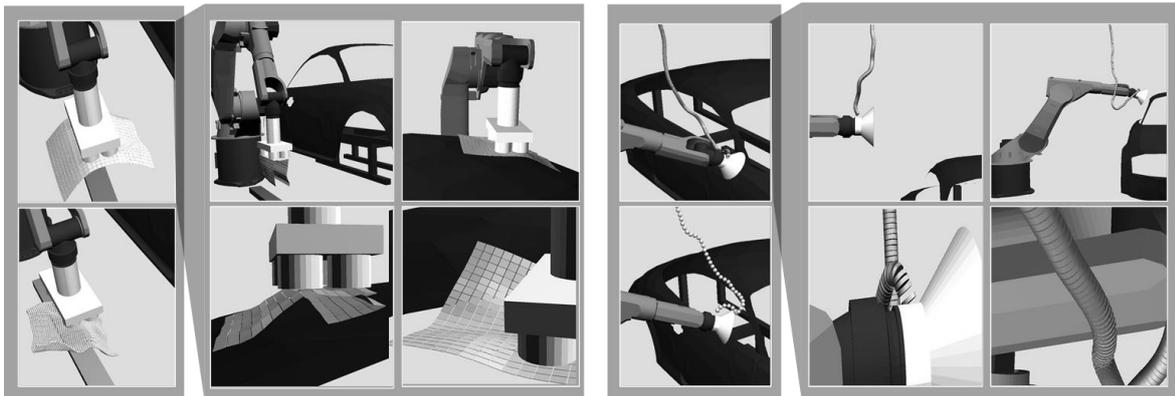


Abbildung 7.1: Handhabung großflächiger, formlabiler Bauteile und Auslegung des Verformungsverhaltens von Versorgungsschläuchen.

Die abbildbaren Szenarien zeigten die Einsatzfähigkeit der Simulationsmethoden innerhalb einer detaillierten Kinematiksimulation. Zudem konnte der aufwandsarme Import von bestehenden Entwicklungsartefakten, wie dem Modell des Roboters oder der Karosserie, in die physikbasierte Simulation gezeigt werden. Die Skalierung zwischen geometrischer Exaktheit bzw. physikalischer Genauigkeit wurde aber nur begrenzt umgesetzt. Zudem ist, vor allem bei der Abbildung von formlabilen Objekten, die Größe des abbildbaren Szenarios weiterhin eingeschränkt. Über eine Verteilung der Modelle auf unterschiedliche Rechensysteme kann die Größe des Simulationsszenarios ausgeweitet werden. Die Übertragung von Zustandsänderungen zwischen den Teilmodulen ist allerdings limitiert. Zudem

müssen zur deterministischen Datenübertragung bestimmte Voraussetzungen vorliegen, wie z. B. ein von der Unternehmens-IT losgelöstes Simulationsnetzwerk, das in vielen Unternehmen nicht oder nur eingeschränkt umsetzbar ist.

Adaption und Erweiterung von Modellbildungsprozessen

Bei der Verwendung von Cloth- bzw. Softbodies können bestehende Prozesse aufwandsarm adaptiert werden. Der Anwender kann dabei auf analoge Modellbildungsmethoden zurückgreifen wie bei der physikbasierten Starrkörpersimulation. Diese wurden auch bei der intuitiven Eingabe von Modelldaten im Mechatronic Sketcher berücksichtigt, so dass die hinterlegte Modelltransformation automatisch erfolgen kann. Dadurch kann dem Anwender kontinuierlich ein Simulationsmodell im Entwicklungsprozess bereitgestellt werden, in dem eine gezielte Variation bzw. Optimierung der Parameter oder Geometrien des Modells möglich sind.

Im Vergleich dazu ist der Automatisierungsgrad der Modellbildung formlabiler Objekte mittels diskreter Volumenelemente niedrig. Der Ansatz kann jedoch auch eingeschränkt mit anderen Tools zur physikbasierten Starrkörpersimulation, beispielsweise V-Rep oder Visual Components, umgesetzt werden. Die dabei erzielbaren Simulationsergebnisse sind für eine Absicherung mechatronischer Anlagen in frühen Entwicklungsphasen ausreichend. Der Anwender hat bei der Verwendung bestehender Entwurfs- und Simulationssysteme weniger Möglichkeiten, auf die Objektparameter Einfluss zu nehmen. Jedoch können bestehende Simulationssysteme genutzt werden, wodurch weitere Investitionskosten entfallen, Modellbildungsprozesse aber manuell geprägt sind.

7.2.2 Interaktiver simulationsgestützter Systementwurf

Identifikation benötigter Verarbeitungsfunktionen

Die gestaltete Entwurfsmethodik stellt in einem ersten Schritt in Anlehnung an das Konzept „Assembly by Disassembly“ die Detaillierung einer gegebenen Problemstellung sicher. Dadurch können am Anfang der Entwicklung die benötigten Verarbeitungsfunktionen strukturiert aufgenommen werden. Durch die feingranulare Definition der Objektzustände und Zustandstransformationen wird die Komplexität der einzelnen Aufgaben reduziert. Die daraus resultierende Funktionsstruktur bildet nur die Kernanforderungen der Kunden ab. Unwesentliche Entwicklungsanteile werden dabei noch nicht betrachtet, wodurch die Fokussierung auf wertschöpfende Entwicklungstätigkeiten verbessert wird.

Interaktive Definition problemspezifischer Lösungsalternativen

Innerhalb des Systementwurfs können bewusst nur elementare Systemelemente definiert werden, um das Prinzip der Einfachheit zu unterstützen und die Abstimmung zwischen den einzelnen Disziplinen in den Vordergrund zu stellen. Die Skizzenelemente wurden so gestaltet, dass sie auch ohne große Vorkenntnisse definiert werden können. Dies verbessert die Integration unterschiedlicher Anwender und Experten. Sie können interaktiv und intuitiv in einer gemeinsamen Skizze den Prozess, die Wirkprinzipien sowie die Struktur eines Entwurfsinkrements und somit eine abgeschlossenen Menge an Funktionen definieren, ohne durch unnötige Benutzereingaben oder Modellbildungsprozesse abgelenkt zu werden. Durch die einfache Übertragung der skizzierten Modelle in ein ausführbares Simulationsmodell und die parallele Ergebnisdarstellung der Simulation, die auf physikbasierten Modellen basiert, können die entwickelten Lösungen in Echtzeit validiert und interaktiv optimiert werden.

Darüber hinaus ist die Abbildung der Szenarien durch die Anzahl der vordefinierten Skizzenelemente limitiert. Die gewählte Syntax und Semantik entspricht der etablierten Nomenklatur unterschiedlicher disziplinspezifischer Prinzipskizzen. Dadurch soll die Intuitivität verbessert werden. Dennoch hat der Anwender aufgrund der modularen Struktur des Interpreters die Möglichkeit, aufwandsarm die Interpretationsregeln zu ändern bzw. zu erweitern. Dabei wurde darauf geachtet, dass nicht die Maschinengeometrie, sondern vor allem die Erfassung funktionaler Spezifika im Fokus des Entwurfs steht. Dies ist auch notwendig, um bei einer hohen Änderungsdynamik früher Entwicklungsphasen in kurzer Zeit umsetzbare Lösungen zu gestalten, die alle Disziplinen berücksichtigen. Die Skizzenelemente sind auf zweidimensionale Objekte beschränkt, weshalb beispielsweise keine komplexen 3D-Bewegungsbahnen definiert werden können. Dies ist aber aufgrund der vorgelagerten Dekomposition der Verarbeitungsaufgabe in handhabbare Teilaufgaben nicht oder nur in Sonderfällen nötig.

Des Weiteren laufen die Skizzeninterpretation und die Simulation in unterschiedlichen Threads. Deshalb können zur Laufzeit der Simulation neue Skizzenelemente definiert und nach der Modelltransformation direkt in der aktuellen Simulation analysiert werden. Dies verstärkt die Interaktivität des Entwurfs. Jedoch muss dafür sichergestellt werden, dass das neu erzeugte Modellelement nicht im Widerspruch zum aktuellen Systemzustand der Simulation steht.

Wie die physikbasierten Modelle, kann auch die Skizziermethodik ganz oder zu Teilen eigenständig im Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Die Entwurfsun-

gebung wird in diesem Fall rein als digitale Skizze zur Dokumentation genutzt, ohne eine konkrete Simulation durchzuführen. Dadurch verbessert sich ebenfalls die Zusammenarbeit der Entwickler, da alle relevanten Systemelemente in einem Modell vereint sind und die Beteiligten zur Diskussion angeregt werden.

7.2.3 Technische und methodische Integration

Technische Integration in Entwicklungsumgebungen

Ein weiterer Vorteil der Methodik ist die Dokumentation des Entwurfs in einem Systemmodell. Dies ist einerseits von mechanischen Konstrukteuren wie auch von Softwareentwicklern nachvollziehbar. Andererseits werden innerhalb des Entwurfsprozesses alle Alternativen in der Entwurfsumgebung erstellt und simulativ abgesichert. Neben einer erhöhten Entscheidungsqualität aufgrund des besseren Systemverständnisses können für nicht verwertete Ideen, die aber z. B. über patentrechtliche Schritte geschützt werden sollen, Dokumente aus den digitalen Modellen abgeleitet werden. Der Export der Daten kann in Anlehnung an Standardformate, wie AutomationML, erfolgen. Eine toolspezifische Anbindung der Skizzier- und Simulationsumgebung an andere Entwicklungsumgebungen wurde nicht im Detail betrachtet, da mögliche Vorteile eines direkteren Datenzugriffs und den damit einhergehenden Zeitvorteilen eventuell in Widerspruch zu einem flexiblen Einsatz der Methodik stehen.

Methodische Integration in Entwicklungsprozesse

Das Prozessmodell zum interaktiven simulationsgestützten Systementwurf kann einfach in bestehende Vorgehensmodelle integriert werden bzw. substituiert einzelne Prozessschritte. Die Anlehnung an agile Vorgehen stellt sicher, dass die Aufgaben in konkrete Inkremente und damit abgeschlossene Einheiten zusammengefasst und zur Detaillierung an die disziplinspezifische Realisierung übergeben werden. Durch die Definition von Akzeptanzkriterien für die Abnahme der Entwurfsinkremente können die Entwickler wesentlich besser den Erfüllungsgrad des Entwurfes abschätzen.

Der Entwurf in sich geschlossener und funktionsfähiger Lösungsinkremente ist zudem auch für den gesamten Entwicklungsprozess mit Vorteilen verbunden. Die Realisierung setzt zur Ausgestaltung der Systeme auf fundierte und abgesicherte Konzepte auf. Dadurch verringern sich zum einen Rücksprünge im Entwicklungsablauf. Zum anderen können Entwicklungsaktivitäten parallelisiert werden, was sich positiv auf prognostizierte Fertigstellungstermine auswirkt. Jedoch muss dabei durch die Projektierung auf eine detaillierte und konsistente Definition von

Schnittstellen zwischen den Teilmodulen geachtet werden, so dass die Entwurfsinkremente später kombiniert werden können. Zudem ist neben der Zerlegung der Verarbeitungsaufgabe auch die Projektion von Rahmenbedingungen, z. B. Vorgaben zum Anlagenlayout, auf die einzelnen Inkremente notwendig, so dass das Zusammenspiel der Teillösungen bei der Systemintegration nicht zu einem Widerspruch führt.

Die inkrementelle und iterative Entwicklung wird auch durch die Simulation unterstützt. Bisherige Simulationen sind meist auf eine Ergebnisdarstellung nach Ende der Simulation beschränkt. Die physikbasierte Simulation und deren echtzeitfähige Online-Darstellung können hingegen jederzeit unterbrochen, modifiziert oder neu gestartet werden. Das damit mögliche direkte Feedback bezüglich der resultierenden Eigenschaften des Systems reduziert die Dauer der einzelnen Entwurfszyklen. Diese Einsparpotenziale werden nachfolgend detailliert.

7.3 Anwendungsspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

7.3.1 Einsparpotenziale im Entwicklungsprozess

Ein übergeordnetes Ziel der Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Systementwurf ist die Reduktion von Aufwänden zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung. Das im vorangegangenen Kapitel dargestellte Beispiel wurde auch in anderen Entwicklungsumgebungen und nach bestehenden Entwicklungsprozessen abgebildet, um diesbezügliche Einsparpotenziale zu ermitteln. Der Vergleich wurde exemplarisch mit Softwaresystemen zur Kinematiksimulation (V-Rep) sowie zur Konzeptionierung mechatronischer Systeme (Trysim) durchgeführt. Sofern es für die Modellbildung und Simulation notwendig war, wurden weitere Systeme, wie z. B. CAD-Systeme oder (Modell-)Steuerungen, eingesetzt. Eine zeitliche Auswertung der Vergleichsszenarien findet sich in Tabelle 7.1.

Die gegebenen Zeitanteile beziehen sich auf die Aufwände zur Definition der Lösungsalternative sowie der diesbezüglichen Modellbildung und Simulation zur Eigenschaftsabsicherung. Die Konzeptgestaltung und somit die Definition des Stoff-, Energie- und Informationsflusses ist bei allen Toolkombinationen nötig. Klassische Ansätze erfordern jedoch einen nachträglichen Transfer der Lösungskonzepte in die Entwicklungsumgebungen, um ein ausführbares Modell zu erstellen. Dies ist dadurch charakterisiert, dass weitere Aufwände aufgrund der Nachbereitung und Ergebnisauswertung sowie der Kommunikation der spezifischen

Experten entstehen. Die betrachteten Systeme bieten zudem nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Abbildung von Verarbeitungsfunktionen und -gütern sowie formlabiler Objekte. Daher ist die Ergebnisqualität der Tools V-Rep und Trysim geringer als bei einem Einsatz des Sketchers.

Tabelle 7.1: *Unterschiedliche Entwurfsprozesse und exemplarischer Vergleich von Simulationsumgebungen bezüglich resultierender Zeitaufwände (in Stunden) am Beispiel des Inkrements „Gruppieren & Umorientieren“.*

	Definition Stofffluss			Definition Energiefluss			Definition Informationsfluss			Erstellung Modell Informationsfluss		Erstellung Modell Stofffluss		Vorbereitung Modell Energiefluss		Dauer Simulationslauf		Nachbereitung Simulationsläufe		Änderung Simulationsdaten		Summe		
mechatronic sketcher	0,1	0,1	0,2	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,8	
Trysim	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,7	
V-Rep	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,6

Im dargestellten Vergleich wurde nur die Umsetzung einer Lösungsalternative für ein spezifisches Entwurfsinkrement betrachtet („Gruppieren & Umorientieren“). Innerhalb des Anwendungsbeispiels wurden weitere Lösungsalternativen entworfen. Die dafür notwendigen Zeiten waren mit dem im letzten Abschnitt dargestellten Entwurfsprozess vergleichbar. Deshalb werden auch in den anderen Systemkonstellationen Zeitaufwände analog zu den Werten in Tabelle 7.1 angenommen. Fasst man die Zeiten zum Entwurf sowie zur Simulation zusammen und skaliert diese auf die Gesamtzahl der Verarbeitungsfunktionen, werden die Vorteile eines interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs ersichtlich. Damit lassen sich je nach Vergleichsbasis und zugrunde gelegtem Anwendungsszenario teils über 50% an Aufwänden im Entwurfsprozess einsparen.

Die Modelle des Entwurfs sind nicht mit den detaillierten Modellen der disziplinspezifischen Realisierung vergleichbar. Dennoch stellen sie eine hinreichend genaue Basis zur Bewertung der Konzepte dar und bilden den Ausgangspunkt der Realisierung. Am Beispiel einer Verpackungsmaschine, deren Konkretisierung über den Entwicklungsverlauf in Abbildung 7.2 dargestellt ist, konnte in einem Abgleich mit der realen Anlage die Genauigkeit als ausreichend für den Systementwurf bestätigt werden. Der interaktive simulationsgestützte Systementwurf führt nicht

nur in frühen Phasen zu zeitlichen Einsparungen. Durch die frühzeitige Eigenschaftsabsicherung reduzieren sich auch Rücksprünge in der Entwicklung.

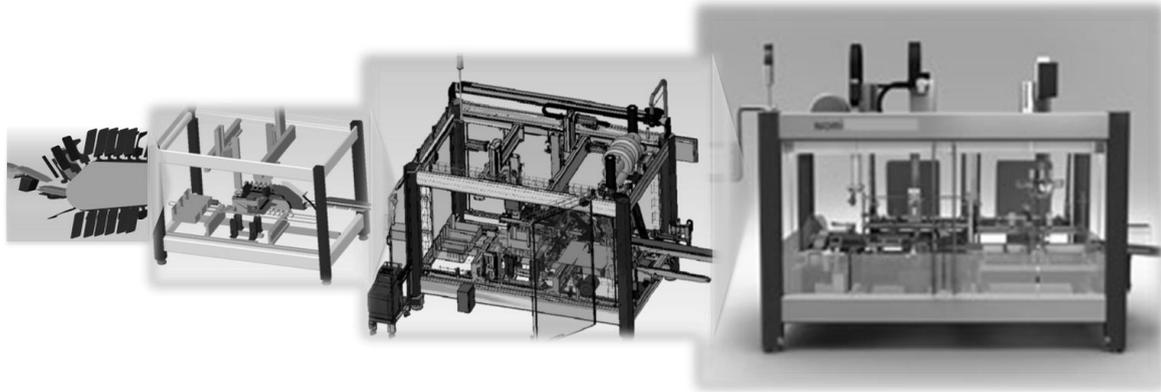


Abbildung 7.2: Systementwurf, Realisierung und reale Verpackungsanlage⁸⁰.

7.3.2 Wirtschaftliche Bewertung der Einsparpotenziale

Anhand der vorliegenden Nutzen- und Einsparpotenziale sowie der damit verbundenen Kostenreduktion in der Entwicklung kann eine wirtschaftliche Bewertung des interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs vorgenommen werden. In einer Analyse unterschiedlicher Projekte eines Unternehmens in der Verpackungstechnik wurden Referenzwerte für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermittelt. Diese wird nachfolgend in Anlehnung an VOGL (2009, S. 175–177) und LACOUR (2012, S. 130–133) dargestellt. Ausgehend von grundlegenden betriebswirtschaftlichen Daten (Personalkosten, Einarbeitungsaufwände etc.), den notwendigen Installations- und Betriebsvoraussetzungen sowie den Kostenpositionen der Funktionsumfänge der Entwurfsmethodik kann ein Unternehmen die jährlich anfallenden Kosten für die Umsetzung und den Betrieb des interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs ermitteln. Dazu wurden zunächst die anteiligen Investitionskosten sowie die jährlichen Betriebskosten für die Hard- und Softwaresysteme identifiziert, die in Tabelle 7.2 dargestellt sind. Neben einem Simulationsrechner fallen Kosten für ein Eingabegerät, wie ein Touch-Display, an. Zusätzlich entstehen Lizenz-, Wartungs- sowie Schulungskosten für entsprechende Softwaresysteme.

⁸⁰ Bildquelle: Somic (2015).

7.3 Anwendungsspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Tabelle 7.2: Exemplarische Kostenkalkulation des interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs.

Investitionskosten Hardware			
Investitionskosten Rechnereinheit	I_{RE}	2.000	€
Investitionskosten Eingabegerät	I_{EG}	500	€
Investitionskosten Hardwaresysteme	$I_{HW} = I_{RE} + I_{EG}$	2.500	€
Investitionskosten Software			
Softwarelizenz Entwurfsumgebung	I_{EU}	30.000	€
Softwarelizenz Betriebssystem	I_{BS}	200	€
Investitionskosten Softwaresysteme	$I_{SW} = I_{EU} + I_{BS}$	30.200	€
Summe Investitionskosten			
Investitionskosten gesamt	$I_G = I_{HW} + I_{SW}$	32.700	€
Jährliche Kosten Hardware			
Nutzungsdauer	T_{HW}	3	a
Kalkulatorische Abschreibung	$AfA_{HW} = I_{HW} / T_{HW}$	833	€/a
Zinssatz	Z_{HW}	9	%
Kalkulatorische Zinsen	$K_{HW} = Z_{HW} * I_{HW}$	180	€/a
Jährliche Fixkosten Hardware	$FK_{HW} = AfA_{HW} + K_{HW}$	1.013	€/a
Jährliche Kosten Software			
Nutzungsdauer	T_{SW}	5	a
Kalkulatorische Abschreibung	$AfA_{SW} = I_{SW} / T_{SW}$	6.040	€/a
Zinssatz	Z_{SW}	9	%
Kalkulatorische Zinsen	$K_{SW} = Z_{SW} * I_{SW}$	2.718	€/a
Wartungs- und Schulungskosten	W_{SW}	4.500	€/a
Jährliche Fixkosten Software	$FK_{SW} = AfA_{SW} + K_{SW} + W_{SW}$	13.258	€/a
Summe jährliche Kosten			
Jährliche Fixkosten gesamt	$FK_G = FK_{HW} + FK_{SW}$	14.271	€/a

In einem zweiten Schritt lassen sich die Nutzen- und Einsparpotenziale in Relation zu den anfallenden Kosten setzen, wie es in Tabelle 7.3 dargestellt ist. Hierbei wurde eine Einsparung von mindestens 40% gegenüber aktuellen Methoden und Werkzeugen zum Systementwurf angenommen. Der jährliche personelle Aufwand entspricht dem Vollzeitäquivalent eines Systemingenieurs bzw. einer Gruppe von drei disziplinspezifischen Experten, die je zu einem Drittel für den Systementwurf arbeiten.

Tabelle 7.3: Exemplarische Nutzenkalkulation des interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs.

Jährliche Nutzeneffekte			
Kostensatz Entwicklungsingenieur	K_E	60	€/h
Prozentuale Zeiteinsparung	e	40	%
Nutzungsdauer	N	1.400	h/a
Kostenvorteil	$S = K_E * e * N$	33.600	€/a
Jährlicher monetärer Vorteil vor Zins	$G_{VZ} = S - FK_G$	19.329	€/a
Amortisationsberechnung			
Amortisationszeit (statisch)	$T_A = \frac{I_G}{AfA_{HW} + AfA_{SW} + G_{VZ}}$	1,25	a

Nach der exemplarischen Nutzenkalkulation amortisiert sich die Investition in einen interaktiven simulationsgestützten Systementwurf nach ca. 15 Monaten. Zur Ermittlung eines Wirtschaftlichkeitskorridors kann eine Grenzkurve verwendet werden, auf welcher der erzielbare Nutzen den jährlichen Gesamtkosten entspricht (siehe dazu Abbildung 7.3). Bei Einsatzszenarien, die oberhalb dieser Grenzkurve anzuordnen sind, liegt ein positiver monetärer Nutzeneffekt vor.

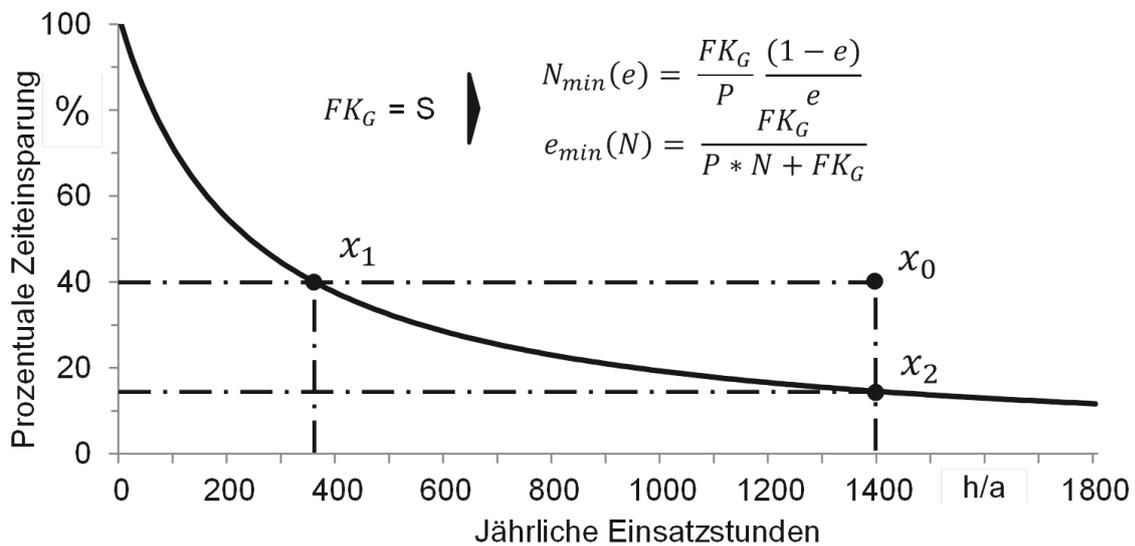


Abbildung 7.3: Wirtschaftlichkeitsgrenze des interaktiven simulationsgestützten Systementwurfs.

Das dargestellte Einsatzszenario (x_0) liegt dabei deutlich oberhalb der Grenzkurve. Bei einer jährlichen Nutzungsdauer von 1.400 Stunden ist bereits ab einer Effizienzsteigerung von 15% ein wirtschaftlicher Einsatz der Methodik möglich (x_2). Bei der

angenommenen Einsparung von über 40% amortisiert sich der interaktive simulationsgestützte Systementwurf bereits bei einem jährlichen Einsatz von über 375 Stunden (x_1). Die Reduktion von weiteren Entwicklungs- bzw. Entwurfswerkzeugen, wie WinMod zur Abbildung von Verhaltensmodellen, wurde in der exemplarischen Berechnung nicht mit betrachtet. Dies würde weitere Einsparpotenziale und somit eine geringere Amortisationszeit bewirken.

7.3.3 Spezifische Ausprägungen der Entwurfsmethodik

Für eine weitere Reduktion der notwendigen Anschaffungskosten können für die spezifischen Problemstellungen der Anwender unterschiedliche Ausprägungen der Methodik gestaltet werden. In Abhängigkeit zum Reifegrad einer Organisation kann eine Methode oder ein digitales Werkzeug unterschiedliche Nutzenpotenziale generieren. Somit können sich für den Betrachtungsbereich eines interaktiven Entwurfs sowie der zugrundeliegenden Simulationsmethoden unterschiedliche Funktionsumfänge ergeben, die in Teilen gegenseitig substituierbar sind. Daraus lassen sich unterschiedlich skalierte Ausprägungen der Entwurfsmethodik ableiten. Die physikbasierten Modelle können in drei Ausbaustufen eingeteilt werden. Es wird in Grundfunktionalitäten (z. B. Starrkörper), Erweiterungsbausteine (z. B. Entwurfsmetaphern) und Expertenbausteine (z. B. formlabile Objekte) unterschieden. Dem gegenüber stehen ebenfalls drei Ausbaustufen der Skizzeninterpretation. Diese weisen eine Abhängigkeit zu den physikbasierten Modellen auf, sofern eine integrierte Eigenschaftsabsicherung eingesetzt werden soll. So müssen mindestens die entsprechenden Grundfunktionalitäten gegeben sein, um ein ausführbares Modell im Entwurfsmodell erstellen zu können.

Je höher der mechatronische Reifegrad, desto mehr Funktionsumfänge können zielbringend eingesetzt werden. Darüber hinaus fallen entsprechende Einführungskosten geringer aus, da einerseits die Anwender ein höheres Prozesswissen und Erfahrungswissen besitzen. Andererseits sind auch die Rahmenbedingungen des Entwicklungsprozesses besser für einen Einsatz der mechatronikorientierten Skizzierumgebung und der diesbezüglichen simulationsgestützten Auslegung produktionstechnischer Systeme geeignet. Beispielsweise setzt ein Unternehmen nicht den Sketcher für den Systementwurf ein, sondern integriert die Funktionsumfänge der Simulation in bestehende Systeme, wie z. B. industrialPhysics. Ein weiteres Beispiel wäre der Verzicht auf bestimmte Simulationsfunktionen, weil eine Starrkörpersimulation in den frühen Phasen ausreicht oder die Simulation über externe Tools erfolgt. Im Gegenzug werden alle Funktionalitäten der Skizzier-

methodik eingesetzt, um das System umfassend zu spezifizieren. In beiden Beispielen liegt bezüglich des Wissens der resultierenden Anlagenfunktionalität in Summe ein vergleichbarer Kenntnisstand vor. Die Definition dieser unterschiedlichen Ausprägungen ist ein anwendungsspezifischer Prozess und ist im Einzelfall anhand der organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen zu prüfen.

Das in Abschnitt 5.5 definierte agile Prozessmodell eines inkrementellen Systementwurfs wurde unabhängig von der eingesetzten Entwicklungsumgebung und dem Reifegrad einer Organisation konzeptioniert. Die feingranulare Analyse der Verarbeitungsschritte und die inkrementelle Konzeptionierung von Lösungsalternativen stellen unabhängig von einer toolseitigen Unterstützung der Entwicklungsprozesse eine Methode dar, um die Komplexität einer Entwicklungsaufgabe zu beherrschen.

7.4 Zusammenfassung der Nutzenpotenziale

Die entwickelte Methodik zielt darauf ab, die in Abschnitt 1.2 dargestellten Herausforderungen zu beheben. Die daraus resultierenden Nutzenpotenziale für den Entwurf mechatronischer Systeme wurden innerhalb dieses Kapitels dargestellt. Die Entwurfsumgebung bietet intuitive Möglichkeiten zur Unterstützung des kreativ-synthetischen Prozesses bei der Gestaltung von Lösungsalternativen, die eine Interaktion mit dem Systemmodell, aber auch eine Interaktion zwischen den beteiligten Entwicklern zulässt. Durch die Integration der physikbasierten Simulation steht zur Laufzeit des Entwurfs ein Modell bereit, das eine aufwandsarme Eigenschaftsabsicherung unter Einbeziehung aller vorliegenden Systemelemente ermöglicht. Dabei können nicht nur einfache Starrkörpersysteme abgebildet werden. Durch die Integration der Simulation formlabiler Objekte sowie der Abbildung von verarbeitungstechnischen Prozessen über neue Entwurfsmetaphern konnte eine Ausweitung der simulationsgestützten Verfahren auf neue Anwendungsfelder erreicht werden. Die der Skizzierumgebung hinterlegte Modellbildung reduziert diesbezügliche Aufwände für den Anwender und ermöglicht eine Fokussierung auf wertschöpfende Entwurfstätigkeiten. Durch den modularen Aufbau der Methodik können die einzelnen Bestandteile auch losgelöst im Unternehmen umgesetzt werden. Dadurch wird eine Skalierung auf die Rahmenbedingungen der Unternehmen sowie eine spätere Erweiterung entsprechenden des mechatronischen Reifegrades ermöglicht.

8 Resümee und Ausblick

8.1 Schlussbetrachtung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, bestehende Lücken disziplinspezifischer Ansätze zu schließen, um den systematischen Entwurf von Verarbeitungssystemen zu unterstützen. Dazu wurde zunächst das Umfeld der Arbeit von den Produktionssystemen im Allgemeinen bis zu Kernthemen der Informatik und Computergrafik sowie einer Betrachtung formlabilen Objektverhaltens aufbereitet. Erkenntnisse aus Wissenschaft und Industrie zeigen einen Paradigmenwechsel innerhalb der Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme auf, in dem Einzeldisziplinen sukzessive durch integrierte, funktionsorientierte Ansätze abgelöst werden. Dies gilt sowohl für Vorgehensmodelle und Methoden zur Vereinfachung des Entwicklungsprozesses als auch für unterstützende Software- und vor allem Simulationssysteme. Daraus resultieren unterschiedliche Handlungsfelder, um die digitale Entwicklung auch in frühen Phasen nutzbar zu machen.

Bisherige Ansätze eines digitalen Engineerings fokussieren die Realisierung und die nachfolgende Systemintegration sowie eine diesbezügliche Absicherung. Um den Aufwand zur Modellierung und Simulation sowie zur Synchronisation der Entwicklungsartefakte in frühen Phasen zu reduzieren, ist der Einsatz einer disziplinübergreifenden Simulation notwendig, die bei einem geringen Konkretisierungsgrad einer technischen Lösung, z. B. einer einfachen Skizze, ausführbar ist. Zusätzlich muss eine Interaktion bei der Gestaltung der Systemanteile möglich sein, die den kreativ-synthetischen Entwurf mechatronischer Systeme unterstützt.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde eine Methodik zum interaktiven simulationsgestützten Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme entwickelt. Den Kern der simulationsgestützten Entwurfsmethodik bilden physikbasierte Modelle, die durch eine Integration von Modellen zur Abbildung formlabiler Objekte sowie unterschiedlicher Verarbeitungsgüter und -prozesse erweitert wurden. Dies bedingt eine Modifikation und Erweiterung bestehender Modellbildungsprozesse, die vor dem Hintergrund der Aufwandsminimierung erfolgte. Neben der reinen Datenaufbereitung für die Simulation wurden dazu Möglichkeiten zur aufwandsarmen Parametrierung sowie Skalierung der Modelle geschaffen.

Zur Verbesserung der Interaktivität wurde eine neue Art der Systemgestaltung entwickelt, die sich an frei gestaltbaren Handskizzen anlehnt. Neben der reinen Definition mechatronischer Systembestandteile ist zudem eine Simulation auf Basis

physikbasierter Modelle möglich, die parallel zum Entwurfsprozess automatisch erstellt werden. Dadurch steht zu jedem Zeitpunkt ein ausführbares Modell bereit, das eine Eigenschaftsabsicherung und darauf aufbauend eine Rückkopplung des dynamischen Systemverhaltens ermöglicht.

Die Skizzierumgebung stellt nur ein Hilfsmittel im Entwurfsprozess dar. Zur Komplexitätsreduktion bei der Gestaltung von Verarbeitungssystemen wurde zudem ein Prozessmodell erstellt. Dies verfolgt in Anlehnung an agile Vorgehensmodelle das Kernziel, abgesicherte Entwurfsinkremente zyklisch an die disziplinspezifische Realisierung zu übergeben. Dadurch wird eine Parallelisierung der Entwicklungsprozesse ermöglicht und aufgrund des erhöhten Reifegrades der Entwicklungsergebnisse Rücksprünge in der Entwicklung reduziert.

Die Teilbereiche der Methodik wurden in Funktionsprototypen umgesetzt und exemplarisch in einer möglichen Ausbaustufe eines interaktiven Entwurfswerkzeugs verknüpft. Sowohl bei der Konzeptionierung als auch bei der technischen Umsetzung wurde darauf geachtet, dass die Bestandteile der Methodik auch einzeln in anderen Entwicklungsphasen, z. B. im Rahmen einer Virtuellen Inbetriebnahme, eingesetzt werden können. Im Zuge einer Evaluation anhand eines Beispiels aus der Verpackungstechnik sowie einer exemplarischen Anwendung in weiteren Einsatzszenarien konnten die Nutzenpotenziale und Grenzen der Entwurfsmethodik sowie der Erfüllungsgrad der gestellten Anforderungen ermittelt werden. Durch den modularen Aufbau können Anwender unterschiedliche Ausbaustufen definieren und die Methodik auf den mechatronischen Reifegrad der Organisation sowie das gegebene Investitionsvolumen skalieren.

8.2 Ausblick auf weitere Handlungsfelder

Der interaktive simulationsgestützte Entwurf mechatronischer Verarbeitungssysteme stellt einen Teilbereich der Entwicklung dar. Die Methodik wurde so gestaltet, dass ein Transfer von Teilbereichen in spätere Entwicklungsphasen möglich ist. Dennoch stellen sich dabei Herausforderungen, die zusammen mit weiteren Trends des digitalen Engineerings in vier maßgebliche Handlungsfelder zusammengefasst werden können, die nachfolgend detailliert werden.

Die *physikbasierte Simulation* hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch die hohe Dynamik in der Computergrafik entwickeln sich die Physik-Engines und somit die Basis der physikbasierten Simulation kontinuierlich weiter. Aspekte, die aktuell noch über Ersatzmodelle realisiert werden, können

zukünftig direkt abgebildet werden. Dies bezieht sich einerseits auf die Abbildung physikalischer Effekte und verarbeitungstechnischer Prozesse. Neben der Abbildung von elastisch-plastischen Verformungen sind vor allem im Bereich der Fluidodynamik sowie der Abbildung von Phasenübergängen weitere Potenziale für einen Ausbau der physikbasierten Simulation vorhanden. Andererseits nähern sich die Ansätze der Computergrafik und der Ingenieurwissenschaften immer weiter an. Die daraus resultierende Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit unter Beibehaltung der Berechnungsgeschwindigkeit wirkt sich nicht nur auf die frühen bzw. späten Entwicklungsphasen aus, in denen die physikbasierte Simulation aktuell maßgeblich eingesetzt wird. Vielmehr wird der Übergang zwischen den einzelnen Phasen fließend. Dadurch können diesbezügliche Modelle ohne weitere Aufwände entwicklungsbegleitend eingesetzt werden, wodurch sich der phasenspezifische Modellbildungsaufwand weiter reduziert. Die Simulation stellt jedoch immer eine abstrahierte Abbildung der Realität dar, weshalb sichergestellt werden muss, dass je nach Anwendungsfall ein hinreichend genaues und validiertes Modell vorliegt.

Im Umfeld der *Modellierung* von technischen Systemen besteht weiterhin Potenzial zur Reduktion der diesbezüglichen Aufwände, die einerseits durch das eingesetzte Simulationsverfahren geprägt sind. Andererseits ist die Definition übergreifender Datenformate und deren Umsetzung in den spezifischen Entwicklungsumgebungen ein bedeutendes Thema zur Etablierung der digitalen Entwicklung. Interaktive Methoden zur Gestaltung digitaler Modelle, wie die dargestellte Skizziertechnik, werden dabei weiter zunehmen. Neue Eingabemöglichkeiten und intelligente Verfahren zur Auswertung und Bewertung der Daten werden in Zukunft die Interaktivität und Intuitivität in der Entwicklung noch weiter steigern, beispielsweise durch ein lernendes System bei der Skizzeninterpretation oder eine verstärkte Immersion des Anwenders in die virtuelle Welt. Die Einbindung der physikbasierten Simulation in Systeme der Virtuellen Realität ermöglichen weiterführende Verbesserungen bei der Definition und Analyse von technischen Systemen. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass diese Konzepte nicht zu stark durch die geometrische Repräsentation des Systems und damit der Mechanik geprägt sind. Somit sind neue Ansätze notwendig, wie Aspekte der Elektronik und Informationstechnik in einer immersiven Entwicklungsumgebung dargestellt werden können.

Die *intelligente Vernetzung* wird auch innerhalb der Simulationstechnik immer mehr zunehmen. Den Grundgedanken von Industrie 4.0 folgend sind auch bei Prozessen der Modellbildung und Simulation Nutzenpotenziale vorhanden. Durch den Einsatz moderner Internet-Technologien kann die verteilte Entwicklung verbessert werden. Beispielsweise im Zuge einer dezentralen Modellierung von

Systemen, die auf einer gemeinsamen Datenbasis erfolgt. Indem alle Änderungen der einzelnen Entwickler zeitsynchron in einem gemeinsamen Modell dargestellt werden, lässt sich die Interaktivität zwischen den Einzelpersonen wesentlich steigern. Zudem stellen die Ansätze von Industrie 4.0 selbstaktualisierende Modelle bereit, durch die sich Aufwände für die Pflege der Modelle reduzieren. Damit liegt zu jeder Zeit eine exakte digitale Repräsentation der Realität vor, anhand derer eine Optimierung, Erweiterung oder Rekonfiguration der Betriebsmittel vor der realen Umsetzung evaluiert werden kann.

Darüber hinaus werden sich auch die zugrundeliegenden Geschäftsmodelle ändern. Die Entwicklung technischer Systeme stellt ein Zusammenspiel unterschiedlicher Technologien und Experten dar. Die dafür notwendige Vielzahl an unterstützenden Entwicklungs- und Simulationsumgebungen kann, gerade bei KMUs, nicht oder nur eingeschränkt finanziell und technologisch abgebildet werden. In anderen Bereichen haben sich bereits Lösungen etabliert, bei denen je nach Bedarf einzelne Softwarepakete aber auch zugehörige Dienstleistungen genutzt werden können. Dies bietet, zusammen mit der synchronen Entwicklung auf verteilten Standorten, neue Möglichkeiten zur kontextspezifischen Integration unterschiedlicher Experten, auch über Unternehmensgrenzen hinweg.

Die Gestaltung von *Entwicklungsprozessen* stellt ebenfalls eine große Herausforderung für die Zukunft dar. Agile und mechatronische Methoden sind bereits seit vielen Jahren in Teilbereichen etabliert. Dennoch hemmt die Lücke zwischen Theorie und Praxis immer noch den flächendeckenden Einsatz. Dies ist vor allem darin begründet, dass die vielfältigen Rahmenbedingungen, die bei den Unternehmen vorliegen, sowie die Bedürfnisse der späteren Anwender nicht oder nur unzureichend berücksichtigt sind. Darüber hinaus werden neue Vorgehensmodelle und intelligente Planungssysteme die Entwicklungsprozesse revolutionieren und deren Automatisierungsgrad weiter steigern. „Die genaue Formulierung eines Problems ist wesentlich schwieriger als dessen Lösung, welche dann nur noch eine Frage des abstrakten Denkens und der experimentellen Kenntnisse ist“⁸¹. So verschieben sich zukünftig die Arbeitsinhalte innerhalb der Entwicklung von der Realisierung hin zur Spezifikation, die über parametrierbare mechatronische Einheiten automatisch umgesetzt wird.

⁸¹ Albert Einstein

9 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München und der Projektgruppe für Ressourceneffiziente Mechatronische Verarbeitungsmaschinen des Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in den Jahren 2010 bis 2013 unter meiner wesentlichen wissenschaftlichen, fachlichen und inhaltlichen Anleitung die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen im Umfeld der physikbasierten mechatronischen Simulation gemeinschaftlich untersucht wurden und deren Ergebnissen in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Mein herzlicher Dank gilt allen Studierenden für die tolle Zeit und die gemeinsamen Projekte während ihrer Studienarbeiten. Danken möchte ich zudem auch meinen studentischen Hilfskräften Nikolas Perakis, Bernhard Lorenz, Dinah Roser, Sebastian Spreng und Aljoscha Hermann für ihre Unterstützung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

BARTNIK, THOMAS (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2012)

Identifikation und Abbildung innovativer Simulationsverfahren zur Simulation formlabiler Materialflussobjekte.

EBERT, SVEN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM OKTOBER 2011)

Planung und Umsetzung einer Schnittstelle zur Synchronisation interdisziplinärer Entwicklungsprozesse mit Hilfe einer physikbasierten mechatronischen Simulation.

ECK, VINZENZ (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2010)

Entwicklung, Implementierung und Validierung einer Methode für die Simulation formlabiler Anlagenbauteile und Prozessgüter auf der Basis von NVIDIA® PhysX® Softbody für die Virtuelle Inbetriebnahme. (Gemeinschaftliche Betreuung mit Herrn Frédéric-Felix Lacour, *iwb*)

ENSLIN, MICHAEL (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM DEZEMBER 2012)

Effizientes Systems Engineering mit Hilfe von Hardware-in-the-Loop.

ENSLIN, MICHAEL (MASTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JUNI 2012)

Neue Technologien und Interaktionsansätze für zukünftige Mensch-Maschine-Schnittstellen.

FEILE, FLORIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2011)

Effiziente Gestaltung von Softwareentwicklungsprozessen mit Hilfe einer entwicklungsbegleitenden physikbasierten mechatronischen Simulation.

GRUNDL, KILIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM APRIL 2011)

Adaption von produktionstechnischen Simulationsverfahren für die Simulation formlabiler Objekte in der Medizintechnik.

GUO, LANFANG (MASTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JUNI 2011)

Simulation des Bewegungsverhaltens von biegeschlaffen Schutzschläuchen in der Medizintechnik.

(Gemeinschaftliche Betreuung mit Herrn Frédéric-Felix Lacour, *iwb*)

HEFNER, FLORIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JANUAR 2012)

Methodisches Konzept zur Validierung von Simulationsergebnissen der Physiksimulation an realen Versuchständen.

HEFNER, FLORIAN (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM JANUAR 2013)

Entwicklung eines Konzepts zur aufgabenorientierten Planung automatisierter Anlagen.

HELBIG, TOBIAS (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM OKTOBER 2012)

Konzeptionierung und Entwicklung eines Systems zur kollisionsfreien Wegeföhrung für ein flexibles Multiläufiger-Transportsystem.

(Gemeinschaftliche Betreuung mit Herrn Julian Backhaus, *iwb*)

HERKERT, TOBIAS (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM SEPTEMBER 2011)

Erstellung einer effizienten Methodik zur Implementierungs- und Testvorbereitung im Zuge der Restrukturierung gealterter Steuerungssysteme in der Produktionstechnik.

HILLER, FLORIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2011)

Methode zur automatischen Modellerstellung von Antriebssimulationen auf der Basis von modularen Baukastensystemen.

HILT, MARTIN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM SEPTEMBER 2012)

Adaption von Entwicklungsergebnissen für die physikbasierte mechatronische Simulation.

HOFFMANN, MICHAEL (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2011)

Strategien zum effizienten Datentransfer zwischen CAD-Systemen und Simulationsumgebungen im Rahmen einer physikbasierten mechatronischen Simulation.

JAENSCH, STEFAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM OKTOBER 2011)

Aufbau eines Interaktionssystems für die physikbasierte mechatronische Simulation von Mehrachskinematiken.

KREUZEDER, MARTIN (BACHELORARBEIT, ABGEGEBEN IM OKTOBER 2011)

Konzept zur wirtschaftlichen Bewertung der mechatronischen Simulation im Produktentwicklungsprozess.

MAGG, KONSTANTIN (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM MAI 2012)

Entwicklungsspezifische Adaption und Erweiterung von interdisziplinären Entwicklungsdokumenten.

MATULA, ANDREAS (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM APRIL 2013)

Entwurf einer wandlungsfähigen Schnittstelle zwischen Simulation und Steuerung für die mechatronische Simulation.

MATZKO, ANDREAS (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM JUNI 2011)

Automatisierte Modellerstellung für die physikbasierte mechatronische Simulation.

NEGRÍN, VICTOR (MASTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JUNI 2013)

Methoden zur effizienten simulationsgestützten Entwicklung von Verarbeitungsmaschinen.

PROSSER, FLORIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM SEPTEMBER 2011)

Methodisches Vorgehen zur Anforderungsanalyse bei der Softwarerestrukturierung von Legacy Systemen in der Produktionstechnik.

RINCK, PHILIPP (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM APRIL 2012)

Identifikation und Umsetzung innovativer Simulationsverfahren zur Abbildung formlabilen Bauteilverhaltens innerhalb einer mechatronischen Simulation.

SAILER, LORENZ (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM AUGUST 2012)

Methode zur Integration der physikbasierten mechatronischen Simulation in den Entwicklungsprozess.

SAUERER, OLIVER (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM MÄRZ 2012)

Benchmark von Simulationsansätzen und Physik-Engines für den kontextspezifischen Einsatz in der Produktionstechnik.

SAUERER, OLIVER (DIPLOMARBEIT, ABGEGEBEN IM DEZEMBER 2012)

Entwicklung eines Konzepts zur Planung von Bedarfen an Automatisierungskomponenten in der Automobilindustrie.

(Gemeinschaftliche Betreuung mit Herrn Julian Backhaus, *iwb*)

SCHMIDT, DANILO (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM SEPTEMBER 2011)

Identifikation und Umsetzung innovativer Simulationsverfahren zur Abbildung formlabilen Bauteilverhaltens innerhalb einer mechatronischen Simulation.

SCHOLL, KRISTINA (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM OKTOBER 2013)

Interaktives Skizzieren mechatronischer Systeme zur systematischen Entwicklung im Maschinen- und Anlagenbau.

SPRENG, SEBASTIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM SEPTEMBER 2011)

Konzept zur integrierten Anlagensimulation auf der Basis modularisierter Physikmodelle.

SPRINGER, SUSANNE (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM DEZEMBER 2012)

Methodisches Konzept zur Ermittlung der Energiebilanz auf der Basis von Physikmodellen.

WELLMANN, HORST (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM APRIL 2013)

Methodik zur standardisierten Projektierung von HMI-Systemen auf Basis vorhandener Entwicklungsdaten.

YU, DIAN (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JULI 2011)

Echtzeitsimulation von Antriebsmodulen in MATLAB®/Simulink für die mechatronische Simulation.

ZHAI, KUN (MASTERARBEIT, ABGEGEBEN IM JULI 2013)

Methodisches Konzept zur Validierung und Klassifizierung von
Simulationsergebnissen.

ZASTROW, STEFANIE (SEMESTERARBEIT, ABGEGEBEN IM FEBRUAR 2013)

Abbildung und Simulation automatisierter Anlagen des Automobilbaus.

10 Verzeichnis eigener Veröffentlichungen

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München und der Projektgruppe für Ressourceneffiziente Mechatronische Verarbeitungsmaschinen des Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in den Jahren 2010 bis 2015 unter meiner wesentlichen Beteiligung folgende Veröffentlichung, in denen teilweise bereits Auszüge der vorliegenden Arbeit dargestellt und diskutiert wurden.

REINHART ET. AL 2010 A

Reinhart, G.; Hensel, T.; Meling, F., Stich P.: Mensch-Maschine-Schnittstelle: Visualisierungsprojekte automatisiert erstellen. Computer und Automation 2010.

REINHART ET. AL 2010 B

Reinhart, G.; Stich, P.; Hensel, T.; Lacour, F.-F.: Simulationsgestützte Steuerungsentwicklung – Ein Anwendungsbeispiel. Montagetechnik Ausgabe 1/2011.

REINHART UND STICH 2010 A

Reinhart, G.; Stich, P.: Automation 2015: Anforderungen und Entwicklungstendenzen. ASQF-Automation Day 2010, Nürnberg 2010.

REINHART UND STICH 2010 B

Reinhart, G.; Stich, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Gausemeier, Jürgen (Hg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme: 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn 2011.

STICH UND LACOUR 2010

Stich, P.; Lacour, F.-F.: TRAMES-TRANsport-Prozesse in der MEchatronik-Simulation. *iwb*-Newsletter Ausgabe 3/2010. München 2010.

REINHART ET. AL 2011 A

Reinhart, G.; Stich, P.; Hensel, T.; Lacour, F.-F.: Simulationsgestützte Steuerungsentwicklung in der Praxis. B&R automotion, Ausgabe 1/2011.

REINHART ET. AL 2011 B

Reinhart, G.; Stich, P.; Krottil, S.; Hofmann, D.: Einsatzpotentiale und Trends in der mechatronischen Simulation. In: G. Reinhart und M. F. Zäh (Hg.): Seminar Mechatronische Simulation in der industriellen Praxis. München 2011: Utz-Verlag (iwb Seminarberichte), S. 1.1 - 1.17.

REINHART ET. AL 2011 C

Reinhart, G.; Stich, P.; Wunsch, G.: Effiziente Methoden zum digitalen Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. SPS/IPC/DRIVES Kongress. Nürnberg, November 2011.

REINHART UND STICH 2011

Reinhart, G.; Stich, P.: Simulation of deformable Objects for physically based Virtual Commissioning. In: Mital A. (Hg.): 16th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice (IJIE). Stuttgart, September 2011.

STICH 2011

Stich, P.: Seminar: Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. iwb-Newsletter Ausgabe 3/2011. München 2011.

DRESCHER ET. AL. 2012

Drescher B.; Klein, T.; Stich, P.; Haberstroh, P.: Innovative Produkte effizient entwickeln. iwb-Newsletter, Ausgabe 2/2012. München 2012.

REINHART ET. AL 2012 A

Reinhart G.; Drescher, B.; Klein, T.; Stich, P.: Kontextspezifische Auswahl und Adaption von Entwicklungsvorgehen zur Effizienzsteigerung im Maschinen- und Anlagenbau. In: Maurer, M.: Tag des Systems Engineering 2012: Zusammenhänge erkennen und gestalten. Paderborn 2012.

REINHART ET. AL 2012 B

Reinhart G.; Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.: Produktqualität intelligent sichern. Mechatronik 120 (2012), No.11, S. 36-37.

STICH 2012

Stich, P.: Neue Systemarchitektur zur Simulation produktions-technischer Anlagen der Automobilindustrie. iwb-Newsletter, Ausgabe 2/2012. München 2012.

STICH ET. AL 2012

Stich, P.; Reinhart, G.; Wunsch, G.; Julinek, S.: Abschluss BMBF-Projekt TRAMES: Transportprozesse in der Mechatronischen Simulation (BMBF-Fkz01IS0951).

STICH UND REINHART 2012

Stich, P.; Reinhart, G.: Digitaler und physikbasierter Prototypenbau. Aktuelle Technik «at», Ausgabe 01/2013. B+L Verlags AG, Schlieren 2013.

DRESCHER ET. AL 2013 A

Drescher, B.; Stich, P.; Reinhart, G.: Performance Assessment of Heterogeneous Engineering Tools along the Development Process of Mechatronic Manufacturing Systems. In: Zaeh, M. F.: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability : Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013). Munich 2013.

DRESCHER ET. AL 2013 A

Drescher, B.; Stich, P.; Kiefer, J.; Strahilov, A.; Bär, T.; Reinhart, G.: Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau. ASIM-Fachtagung 2013. In: Dangelmaier, W.: Simulation in Produktion und Logistik 2013. HNI-Verlagsschriftenreihe 316. Paderborn 2013.

ENGELHARDT ET. AL 2013

Engelhardt, P.; Philipp, T.; Stich, P.; Michniewic, J.: Forschungsprojekt CyProS. iwb-Newsletter, Ausgabe 1/2013.

REINHART UND STICH 2013 A

Reinhart, G.; Stich, P.: Approaches for the Simulation of Deformable Objects in Manufacturing Systems. In: Industrial and Systems Engineering Review (ISER), ISER 1 (2013), No.1, pp. 68-74.

REINHART UND STICH 2013 B

Reinhart, G.; Stich, P.: Physikbasierte Modelle formlabiler Objekte zur Auslegung produktionstechnischer Systeme. In: Gausemeier, Jürgen (Hg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme 2013: 9. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn 2013.

STICH ET. AL 2013 A

Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.; Reinhart, G.: Intelligentes mechatronisches Engineering. Clusterzeitschrift Mechatronik und Automation 2013.

STICH ET. AL 2013 B

Stich, Drescher, Klein, Richter: Intelligentes mechatronisches Engineering. iwb-Newsletter, Ausgabe 1/2013.

STICH ET. AL 2013 C

Stich, P.; Drescher, B.; Backhaus, J.; Hefner, F.; Reinhart, G.: Aufgabenorientierte Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme. Internationales Forum Mechatronik. Winterthur 2013.

STICH ET. AL 2013 D

Stich, P.; Drescher, B.; Backhaus, J.; Richter, C.; Klein, T.; Reinhart, G.: Herausforderung der mechatronischen Entwicklung und bestehende Lösungsansätze. Ingenieur-Spiegel. Fachmagazin für Ingenieure (2013), No.3, S. 23-24.

STICH ET. AL 2013 E

Stich, P.; Drescher, B.; Reinhart, G.: Leistungsbewertung heterogener Entwicklungswerkzeuge im Maschinen- und Anlagenbau. Megalink : Elektronik, Automation 20 (2013), No.6/7, S. 24-26.

STICH UND DRESCHER 2013

Stich, P.; Drescher, B.: Entwicklung hautnah erleben: Modulare Forschungsplattform zur intelligenten Steuerungsentwicklung und Anlagensimulation. iwb-Newsletter, Ausgabe 2/2012. München 2012.

STICH UND REINHART 2013

Stich, P.; Reinhart, G.: Mechatronic Sketching of Manufacturing Systems using Physically based Models - A Novel Approach for Simulation-based Systems Engineering IEEE Symposium on Business, Engineering & Industrial Applications (ISBEIA 2013).

GÖTZ ET. AL. 2014

Götz, Wagner, Stich, Reinhart: Automatisierungsansätze für die individuelle Lebensmittelverarbeitung und -verpackung Abschluss des bayerischen Forschungsverbundes FORFood. Forschungsreport für den Maschinenbau in Bayern 2014.

GRAF UND STICH 2014

Graf, J.; Stich, P.: CFK-Handling leicht gemacht – Möglichkeiten und Grenzen bei der automatisierten Handhabung. Ingenieur-Spiegel. Fachmagazin für Ingenieure (2014), No.3, S. 76-77.

HEFNER ET. AL. 2014

Hefner, F.; Krottil, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Physikbasierten Simulation von Produktionssystemen. Forschungsreport für den Maschinenbau in Bayern 2014.

KROTIL ET. AL. 2014

Krottil, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten der Fluidsimulation in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses. In: Wittmann, J.; Deatcu, C. : ASIM 2014 : 22. Symposium Simulationstechnik. Berlin 2014.

RICHTER ET. AL. 2014

Richter, C.; Klein, T.; Drescher, B; Stich, P.; Reinhart, G.: Modellfabrik für den spielerischen Einstieg in die Mechatronik. Forschungsreport für den Maschinenbau in Bayern 2014.

SIMON ET. AL. 2014

Simon, D.; Götz, G.; Dietrich, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Geometrieflexible Systeme zur Kunststoff- und CFK-Verarbeitung - Wirtschaftlicher Umformen und Zerspanen mit flexiblen Werkzeugsystemen. Maschinenmarkt. MM, das Industriemagazin (2014), No.35, S. 38-41.

STICH 2014 A

Stich, P.: Antriebe leichter programmieren. Megalink : Elektronik, Automation 5 (2014), Mai, S. 56-58.

STICH 2014 B

Stich, P.: Mechatronische Modularisierung produktionstechnischer Systeme - Wiederverwendung effizient gestalten. Ingenieur-Spiegel. Fachmagazin für Ingenieure (2014), No.3, S. 13-14.

STICH UND KROTIL 2014

Stich, P.; Krottil, S. : Geometriebasierte interaktive Programmierung von Antriebssteuerungen. iwb newsletter 2014.

STICH UND SCHMID 2014

Stich, P.; Schmid, M.: Kognitive Systeme in der Automatisierungstechnik - Anfahrmakulatur deutlich reduziert. Megalink : Elektronik, Automation (2014), No.7, S. 57-59.

STICH UND RICHTER. 2014

Stich,P.; Richter, C.: Anlagenbedienung leicht gemacht. Megalink : Elektronik, Automation 21 (2014), No.11, S. 32-34.

BERGER ET. AL 2015 A

Berger, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Verarbeitungsmaschinen - eine Begriffsbestimmung. Einordnung in die Produktionstechnik. wt Werkstattstechnik online 105 (2015), No.9, S. 657-661.

BERGER ET. AL 2015 B

Berger, S.; Simon, D.; Stich, P.; Reinhart, G.: Mechatronisches Roboter-System zum Rückbau von Reaktordruckbehältereinbauten. In: Gausemeier, Jürgen (Hg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme 2015.

NÄGELE ET. AL 2015

Nägele, J.; Stich, P.; Reinhart, G.: Intelligenter Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in der Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb : ZWF 110 (2015), No.10, S. 649-652.

RICHTER ET. AL 2015

Richter, C.; Hackenberg, G.; Stich, P.; Reinhart, G.: Modellbasierte Konzeption von Benutzerschnittstellen im Entwicklungsprozess von mechatronischen Systemen. In: Schulze, S.-O.: Tag des Systems Engineering 2015 : Verteiltes Arbeiten mit ganzheitlicher Kontrolle. Ulm 2015.

STETTER ET. AL. 2015

Stetter, R.; Spiegelberger, B.; Drescher, B.; Haberstroh, P.; Hammerstingl, V.; Klein, T.; Stich, P. und weitere: MEPRIMA – Anforderungen und Methoden im mechatronischen Engineering. VDMA-Leitfaden für Anwender im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt 2015

STICH 2015

Stich, P.: Wandel mechatronischer Entwicklungsansätze -Physikbasierte Simulation formlabiler Objekte zur Auslegung von Verpackungsanlagen. Megalink : Elektronik, Automation 22 (2015), No.3, S. 18-20.

STICH ET. AL 2015 A

Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Richter, C.; Reinhart, G.: Wertstromanalyse von mechatronischen Entwicklungsprozessen. In: Adolphs, P.:16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte 2258. Düsseldorf 2015.

STICH ET. AL 2015 B

Stich, P.; Hefner, F.; Reinhart, G.: Simulation & Visualisierung - Physikbasiert simulieren. IT & production (2015), No.6.

STICH ET. AL 2015 C

Stich, P.; Backhaus, J.; Reinhart, G.: Optimierung der Modellbildung und Simulation beim Einsatz der physikbasierten mechatronischen Simulation. Konstruktion 67 (2015), No.11/12, S. 95-98.

STICH ET. AL 2015 D

Stich, P.; Krottil, S.; Reinhart, G.: Interaktive simulationsgestützte Programmierung bei der Entwicklung mechatronischer Verpackungsanlagen. In: Majschak, J.-P.: VVD 2015 - wissenschaftliche Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik. Dresden 2015.

STICH UND REINHART 2015

Stich, P.; Reinhart, G.: Interaktives simulationsgestütztes Skizzieren mechatronischer Produktionssysteme Effizienzsteigerung im Systementwurf. In: Adolphs, P.:16. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte 2258. Düsseldorf 2015.

GÖTZ ET. AL 2016

Götz, G.; Stich, P.; Reinhart, G.: Design approach for the development of format-flexible packaging machines. International Conference on Mechanical, Mechatronics and Manufacturing Engineering (ICMMME). Singapore 2016.

11 Verzeichnis referenzierter Veröffentlichungen

ABELE ET AL. 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser, Carl 2011. ISBN: 3446425950.

ABTS 2014

Abts, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. 2., aktualisierte Aufl. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43929-0.

ACKER 2011

Acker, B.: Simulationstechnik. Grundlagen und praktische Anwendungen ; mit 18 Tabellen. 2 Aufl. Renningen: expert-Verl 2011. ISBN: 3816929990.

ACKOFF 1989

Ackoff, R. L.: From data to wisdom. Lancaster,,: 1989. (Journal of Applied Systems Analysis, Nr. 16).

ADAMS 1984

Adams, J. L.: Ich hab's! Wie man Denkblockaden mit Phantasie überwindet. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1984. ISBN: 978-3528085223.

ALBERS ET AL. 2013

Albers, A.; Zingel, C.: Extending SysML for Engineering Designers by Integration of the Contact & Channel – Approach (C&C2-A) for Function-Based Modeling of Technical Systems. Procedia Computer Science 16 (2013), S. 353-362.

ALBERS ET AL. 2014

Albers, A.; Klingler, S.; Wagner, D.: Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. 2014.

ALBERS ET AL. 2015A

Albers, A.; Scherer, H.; Bursac, N.; Rachenkova, G.: Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. Procedia CIRP 36 (2015a), S. 129-134.

ALBERS ET AL. 2015B

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015b.

ALBERS ET AL. 2016A

Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Richter, T.: iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Procedia CIRP* 50 (2016a), S. 100-105.

ALBERS ET AL. 2016B

Albers, A.; Haug, F.; Heitger, N.; Arslan, M.; Rapp, S.; Bursac, N.: Produktgenerationsentwicklung - Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen. 2016b.

ALBERS ET AL. 2016C

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2016, S. 541-569. ISBN: 978-3-446-44518-5.

ALBERS ET AL. 2017A

Albers, A.; Rapp, S.; Birk, C.; Bursac, N.: Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2017a.

ALBERS ET AL. 2017B

Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE - Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen* 81 (2017b) 1, S. 13-31.

ALTINTAS ET AL. 2005

Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M.; Witt, S.: Virtual Machine Tool. In: *CIRP (Hrsg.): CIRP Annals. Manufacturing Technology* 2005, S. 651-674.

ALVARADO 2011

Alvarado, C.: Multi-domain Hierarchical Free-Sketch Recognition Using Graphical Models. In: Jorge, J. A. et al. (Hrsg.): *Sketch-based interfaces and modeling*. London, New York: Springer 2011, S. 19-54. ISBN: 978-1-84882-812-4.

ALVARADO ET AL. 2001

Alvarado, C.; Randall, D.: Preserving the freedom of paper in a computer-based sketch tool. (Hrsg.): *Proceedings of HCI International 2001*, S. pp. 687-691.

ANDEL ET AL. 2010

Andel, F.; Konze, S.; Theissen, P.: Interdisziplinäre UML-Modellierung. In: Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. Die wichtigsten Methoden. München: Oldenbourg-Industrieverl. 2010, S. 78-84. ISBN: 978-3-8356-3210-3.

ANDERL ET AL. 2012

Anderl, R.; Eigner, M.; Sandler, U.; Stark, R. (Hrsg.): Smart engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-29371-9. (Acatech diskussion).

ANTON 2011

Anton, T.: Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2011. ISBN: 978-3843901178. (Produktentwicklung).

APPEL 2006

Appel, F.: Die virtuelle Inbetriebnahme im Anlagenbau - ein Erfahrungsbericht. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006.

ARNAUD ET AL. 2006

Arnaud, R.; Barnes, M. C.: COLLADA. Sailing the gulf of 3D digital content creation. Wellesley, Mass.: A K Peters 2006. ISBN: 9781568812878.

ASPERN 2005

Aspern, J. v.: SPS-Grundlagen. Aufbau, Programmierung (IEC 61131, S7), Simulation, Internet, Sicherheit. Heidelberg: Hüthig 2005. ISBN: 3-7785-2921-8. (Studium).

ASTRATH 2012

Astrath, D.-U.: VPS zur Unterstützung der Inbetriebnahme von verfahrenstechnischen Anlagen. Dresden 2012.

ATP 2011

atp (Hrsg.): Praktische Grundlagen der Automatisierungstechnik. Wissenswert - eine Veröffentlichung der atp. 1 Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH 2011. ISBN: 978-3-8356-3158-8.

BACHTHALER 2000

Bachthaler, M.: Entwicklung und Anwendung der Systemtechnik bei komplexen innovativen Vorhaben sowie bei Mensch-Maschine-Systemen. Eine Systemmethodik für das Technische Management. Als Ms. gedr Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2000. ISBN: 3-18-311416-X. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Nr. 114).

BACKHAUS 2016

Backhaus, J.: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Technische Universität München. München: 2016. ISBN: 978-3-8316-4570-1.

BALAZOVA 2005

Balazova, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation. Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn 2005.

BANGSOW 2008

Bangsow, S.: Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. München [u.a.]: Hanser 2008. ISBN: 9783446414907. (Edition Cad.de).

BÄR ET AL. 2010

Bär, T.; Wack, K.-J.; Straßburger, S.: Möglichkeiten und Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs in der Automobilindustrie. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010. ISBN: 386644558X.

BÄR ET AL. 2014

Bär, T.; Damrath, F.: Die Zukunft der Anlagenentwicklung. In: Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Braunschweig, 04./05.11.2014: Süddeutsche Verlag Veranstaltungen 2014.

BARAFF 1989

Baraff, D.: Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies. Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New York: ACM Press 1989. ISBN: 0-201-50434-0. (, Nr. 23).

BARAFF 1990

Baraff, D.: Curved Surfaces and Coherence for Non-penetrating Rigid Body Simulation. Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New York: ACM Press 1990. ISBN: 0-201-50933-4. (, Nr. 24).

BARAFF 1991

Baraff, D.: Coping with Friction for Non-penetrating Rigid Body Simulation. Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New York: ACM Press 1991. ISBN: 0-89791-436-8. (, Nr. 25).

BARFIELD ET AL. 2001

Barfield, W.; Claudell, C. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates 2001.

BARTELS ET AL. 2005

Bartels, R. H.; Beatty, J. C.; Barsky, B. A.: An introduction to splines for use in computer graphics and geometric modeling. [Nachdr.] Aufl. Los Altos, Calif.: Kaufmann 2005. ISBN: 978-1558604001.

BARZEL ET AL. 1988

Barzel, R.; Barr, A. H.: A modeling system based on dynamic constraints. Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New York: ACM Press 1988. ISBN: 0097-8930.

BATHELT 2007

Bathelt, J.: Entwicklungsmethodik für SPS-gesteuerte mechatronische Systeme. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2007. ISBN: 978-3-18-340520-6.

BATTY 2015

Batty, C.: Physics-Based Animation. The science of simulating physics for human visual consumption. <<http://www.physicsbasedanimation.com/>>.

BAUDISCH 2003

Baudisch, T.: Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine. München: H. Utz 2003. ISBN: 9783831602490. (Forschungsberichte IWB, Nr. 179).

BAUDISCH ET AL. 2007

Baudisch, T.; Zäh, M.; Lindworsky, A.: Entwicklungsumgebung zum Automatisierungsengineering - Ein Werkzeug zur integrierten Virtuellen Inbetriebnahme von Produktionsanlagen. Paderborn: Westfalia Druck 2007.

BAUER ET AL. 2014

Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D.; Ganschar, O.: Industrie 4.0. Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie. Berlin, Stuttgart: 2014.

BAUERNHANSL 2014A

Bauernhansl, T.: Industrie 4.0. In: Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Braunschweig, 04./05.11.2014: Süddeutsche Verlag Veranstaltungen 2014.

BAUERNHANSL 2014B

Bauernhansl, T.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014b. ISBN: 9783658046828.

BAUMGARTNER 1997

Baumgartner, P.: Evaluation vernetzten Lernens: 4 Thesen. Münster: Waxmann (Medien in der Wissenschaft) 1997.

BECK ET AL. 2001

Beck, K.; Grenning, J.; Martin, R. C.; Beedle, M.; van Bennekum, A.; Cockburn, A.; Cunningham, W.; Fowler, M.; Highsmith, J.; Hundt, A.; Jeffries, R.; Kern, J.; Marick, B.; Schwaber, K.; Sutherland, J.; Thomas, D.: Manifesto for Agile Software Development.
<<http://www.agilemanifesto.org/>>.

BECKER 1998

Becker, J.: Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung und ihre Einbettung in ein Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationsmodelle. <<http://www.wi-inf.uni-duisburg-essen.de/MobisPortal/pages/rundbrief/pdf/Beck98.pdf>>.

BEHRENDT ET AL. 2006

Behrendt, S.; Beißner, F.; Doberstein, D.; Erdmann, L.; Göll, E.; Nolte, R.; Wehnert, T.; Wölk, M.: Integrierte Technologie-Roadmap Automation 2015+. Frankfurt am Main: 2006.

BELL ET AL. 2005

Bell, N.; Yu, Y.; Mucha, P.; Kosorok, R. M.: Particle-based simulation of granular materials. (Hrsg.): Particle-based simulation of granular materials 2005.

BENDER 2005

Bender, K.: Embedded Systems. Qualitätsorientierte Entwicklung. 1 Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3540229957.

BENDER 2007

Bender, J.: Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität 2007.

BENDER 2014

Bender, J.: Dynamiksimulation in der Computergraphik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2014. ISBN: 9783731502043.

BENSIEK 2013

Bensiek, T.: Systematik zur reifegradbasierten Leistungsbewertung und -steigerung von Geschäftsprozessen im Mittelstand. Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Inst 2013. ISBN: 978-3942647311. (HNI-Verlagsschriftenreihe, Nr. 312).

BERGER ET AL. 2015

Berger, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Verarbeitungsmaschinen - eine Begriffsbestimmung. wt Werkstattstechnik online 9. <657-661>.

BERGERT ET AL. 2009

Bergert, M.; Kiefer, J.; Home, S.; Fedrowitz, C.: Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme im automobilen Karosseriebau. Ein Erfahrungsbericht. Augsburg: 2009.

BERGERT ET AL. 2010A

Bergert, M.; Höme, S.; Hundt, L.: Verhaltensmodellierung für die virtuelle Inbetriebnahme. etz 9.

BERGERT ET AL. 2010B

Bergert, M.; Höme, S.; Hundt, L.: Verhaltensmodellierung für die Virtuelle Inbetriebnahme. In: Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik <11, 2010, Baden-Baden> (Hrsg.): Automation 2010. Kongress Baden-Baden, 15. und 16. Juni 2010 ; [mit CD-ROM]. Düsseldorf: VDI-Verl 2010, S. 17-21. ISBN: 9783180920924.

BERNERS-LEE ET AL. 2015

Berners-Lee, T.; Jaffe, J.: XML Technology.
<<http://www.w3.org/standards/xml/>>.

BERTSCHE ET AL. 2009

Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.:
Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer
2009. ISBN: 3540850899. (VDI-Buch).

BETTENHAUSEN ET AL. 2013

Bettenhausen, K.; Kowalewski, S.: Cyber-Physical Systems: Chancen und
Nutzen aus Sicht der Automation. Thesen und Handlungsfelder. Düsseldorf:
2013.

BIEBER ET AL. 2004

Bieber, C.; Leggewie, C. (Hrsg.): Interaktivität. Ein transdisziplinärer
Schlüsselbegriff. Frankfurt: Campus-Verl 2004. ISBN: 3593376032.
(Interaktiva, Nr. 1).

BISCHOFF ET AL. 2004

Bischoff, R.; Kazi, A.: Einsatzmöglichkeiten von Augmented Reality in der
Industrierobotik: VDI-Verlag 2004.

BLEISCH ET AL. 2011

Bleisch, G.; Majschak, J.-P.; Weiss, U.: Verpackungstechnische Prozesse.
Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie. 1 Aufl. Hamburg: Behr 2011.
ISBN: 3899472810.

BMW I 2015

BMW I: Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den
Standort Deutschland; Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum
Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. Berlin: vierC print +
mediafabrik GmbH & Co. KG 2015.

BOCK 2000

Bock, Y.: Rapid styling validation. Berechnung und Simulation in der
Konzeptphase der Produktentwicklung. Berlin: IPK; Druckhaus Berlin Mitte
2000. ISBN: 9783816755920.

BOCKEL ET AL. 2010

Bockel, B.; Schmitz, M.; Wenzel, S.: Entwicklung von Methodiken zur systematischen Planung von Experimenten in Simulationsstudien. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010, S. 493-500. ISBN: 386644558X.

BODENDORF 2006

Bodendorf, F.: Daten- und Wissensmanagement. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006. ISBN: 978-3-540-28743-8. (Springer-Lehrbuch).

BOEING ET AL. 2007

Boeing, A.; Bräunl, T.: Evaluation of real-time physics simulation systems. 2007.

BÖHME ET AL. 2009

Böhme, T.; Kennel, M.; Schumann, M.; Winge, A.: Automatisierte Erstellung domänenübergreifender Modelle und echtzeitfähige Kopplung von Simulation, Visualisierung und realen Steuerungen. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Augmented & virtual reality in der Produktentstehung. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge - virtual prototyping, digitale Fabrik mit AR,VR - AR, VR Interaktions und Visualisierungstechniken. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst 2009, S. 155-172. ISBN: 978-3-939350-71-2.

BOLTON 2004

Bolton, W.: Bausteine mechatronischer Systeme. 3 Aufl. München, Boston [u.a.]: Pearson Studium 2004. ISBN: 9783827372628. (Maschinenbau : Mechatronik).

BONETSMÜLLER 2013

Bonetsmüller, M.: Die Anforderungen an das mechatronische Engineering aus Sicht des mittelständischen Maschinenbaus. In: Happacher, M. (Hrsg.): Benchmarkforum Intelligentes Engineering: Computer&AUTOMATION; ITQ 2013.

BORDEWIJK ET AL. 1986

Bordewijk, J. L.; van Kaam, B.: Towards a New Classification of TeleInformation Services”, . (Hrsg.): Inter Media, vol. 14, no. 1. 1986.

BOTASCHANJAN ET AL. 2009

Botaschanjan, J.; Hummel, B.; Lindworsky, A.: Interdisziplinäre Funktionsmodellierung im Anlagenbau. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 01-02.

BOTASCHANJAN ET AL. 2010

Botaschanjan, J.; Hensel, T.; Hummel, B.; Lindworsky, A.: AutoVIBN. Automatische Generierung von Verhaltensmodellen für die qualitätsorientierte. Technical Report TUM-I1012. 2010.

BOTSCH ET AL. 2006

Botsch, M.; Pauly, M.; Gross, M.; Kobbelt, L.: PriMo: Coupled Prisms for Intuitive Surface Modeling. 2006.

BOURG 2002

Bourg, D. M.: Physics for Game Developers. Sebastopol, USA: O'Reilly & Associates 2002. ISBN: 0-596-00006-5.

BOURG ET AL. 2013

Bourg, D. M.; Humphreys, K.; Bywalec, B.: Physics for game developers. 2nd ed Aufl. Sebastopol, Calif.: O'Reilly Media 2013. ISBN: 978-1449392512.

BOURJAULT 1988

Bourjault, A.: Methodology of Assembly Automation: A New Approach. In: Radharamanan, R. (Hrsg.): Robotics and Factories of the Future '87. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1988, S. 37-45. ISBN: 978-3-642-73892-0.

BRACHT ET AL. 2003

Bracht, U.; Bergbauer, J.: Fabriken erfolgreich planen mittels Virtual Reality. Magdeburg: 2003.

BRACHT ET AL. 2010

Bracht, U.; Schlange, C.: VR-gestützte Struktur-und Layoutplanung auf Grundlage erweiterter virtueller Fabrikmodelle. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010, S. 85-92. ISBN: 386644558X.

BRACTH ET AL. 2011

Bracht, U.; Wenzel, S.; Geckler, D.: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. 1 Aufl. Berlin: Springer Berlin 2011. ISBN: 978-3-540-89038-6. (VDI-Buch).

BRADE 2000

Brade, D.: Verifikation, Validierung und Akkreditierung von Simulationsmodellen. 2000. (Bericht).

BRAUN 2005

Braun, T. E.: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. 1 Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2005. ISBN: 978-3899632743.

BRAUN 2013

Braun, A.: Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung. Hochschulschrift. Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe 2013.

BRECHER 2006

Brecher, C. (Hrsg.): Simulationstechnik in der Produktion. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2006. ISBN: 3-18-365802-x. (Fortschrittberichte VDI / 2, Nr. 658).

BRECHER 2011

Brecher, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011. ISBN: 3642206921. (VDI-Buch).

BRECHER ET AL. 2009

Brecher, C.; Lohse, W.: Zielgerichtete Simulationsszenarien mit virtuellen Produktionsmitteln. In: Brecher, C. et al. (Hrsg.): Effiziente Methodiken und durchgängige Werkzeuge zur Modellerstellung digitaler Produktionseinrichtungen. [Treffen der Hochschulinstitute IPK Berlin, ISW Stuttgart und dem WZL der RWTH Aachen ; Aachen 2008]. Düsseldorf: VDI-Verl. 2009, S. 25-44. ISBN: 9783183671021.

BRO-NIELSEN ET AL. 1996

Bro-Nielsen, M.; Cotin, S.: Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation. (Hrsg.): Computer Graphics Forum 1996, S. 57-66.

BROY 2010

Broy, M. (Hrsg.): Cyber-physical systems. Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 3642144985. (Acatech diskutiert).

BROY ET AL. 2006

Broy, M.; Jarke, M.; Nagl, M.; Rombach, D.: Manifest: Strategische Bedeutung des Software Engineering in Deutschland. Informatik-Spektrum 29 (2006) 3, S. 210-221.

BROY ET AL. 2015

Broy, M.; Harhoff, D.: Industrie 4.0 ist erst der Anfang. FAZ.

BRÜDERLIN ET AL. 2001

Brüderlin, B.; Meier, A.: Computergrafik und Geometrisches Modellieren. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2001. ISBN: 978-3-322-80111-1.

BRYCHTA 2004

Brychta, P.: Technische Simulation. 1 Aufl. Würzburg: Vogel Verlag 2004. ISBN: 9783802319716.

BUCHWITZ 2012

Buchwitz, M.: Neue Wege in der Softwareentwicklung. SPS Magazin 8.

BULLINGER ET AL. 1997

Bullinger, H.-J.; Warschat, J.; Bading, A.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development. Stuttgart: Teubner 1997. ISBN: 3-519-06370-0. (Technologiemanagement - Wettbewerbsfähige Technologieentwicklung und Arbeitsgestaltung).

BUNGARTZ 2009

Bungartz, H.-J.: Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3540798095. (eXamen.press).

BUNGARTZ ET AL. 2002

Bungartz, H.-J.; Griebel, M.; Zenger, C.: Einführung in die Computergraphik. Grundlagen, Geometrische Modellierung, Algorithmen. 2 Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2002. ISBN: 978-3-663-01614-4.

BURGER ET AL. 1986

Burger, R.; Hartmann, G.; Höh, D.; Kloke, W., Pössinger, J.: Vorrichtung zum Einlegen von Dichtungsprofilen. 1987.

BÜSCHER ET AL. 2013

Büscher, C.; Kuz, S.; Ewert, D.; Schilberg, D.; Jeschke, S.: Kognitive Planungs- und Lernmechanismen in selbstoptimierenden Montagesystemen. In: Jeschke, S. et al. (Hrsg.): Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering 2011/2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 595-605. ISBN: 978-3-642-33388-0.

CHERLIN ET AL. 2005

Cherlin, J. J.; Samavati, F.; Sousa, M. C.; Jorge, J. A.: Sketch-based Modeling with Few Strokes. (Hrsg.): Proceedings of the 21st Spring Conference on Computer Graphics. New York, NY, USA: ACM 2005, S. 137-145. ISBN: 1-59593-204-6.

COOK ET AL. 2009

Cook, M. T.; Agah, A.: A Survey of Sketch-based 3-D Modeling Techniques. Interact. Comput. 21 (2009) 3, S. 201-211.

COOPER 2002

Cooper, R. G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung. Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2002. ISBN: 3-527-50027-8.

COTIN ET AL. 2004

Cotin, S.; Metaxas, D. N. (Hrsg.): Medical simulation. International symposium, ISMS 2004, Cambridge, MA, USA, June 17-18, 2004 : proceedings. Berlin, New York: Springer 2004. ISBN: 978-3-540-22186-9. (Lecture notes in computer science, Nr. 3078).

COUMANS 2007

Coumans, E.: Bullet Physics Library. <<http://www.bulletphysics.com> (Zugriff: 04.12.2008)>.

COYETTE ET AL. 2007

Coyette, A.; Vanderdonckt, J.; Limbourg, Q.: SketchiXML: A Design Tool for Informal User Interface Rapid Prototyping. In: Guelfi, N. et al. (Hrsg.): Rapid Integration of Software Engineering Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 160-176. ISBN: 978-3-540-71875-8.

CROSTACK 2010

Crostack, H.-A.: Sonderforschungsbereich 696. Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen. Logistics on Demand. Dortmund: 2010.

CZICHOS 2008

Czichos, H.: Mechatronik. Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme ; mit 12 Tabellen. 2 Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2008. ISBN: 3834803731. (Studium).

DAENZER ET AL. 2002

Daenzer, W. F.; Haberfellner, R.: Systems engineering. Methodik und Praxis. 11., durchges. Aufl. Zürich: Verl. Industrielle Organisation 2002. ISBN: 978-3857439988.

DAMRATH ET AL. 2014

Damrath, F.; Strahilov, A.; Bär, T.; Vielhaber, M.: Establishing Energy Efficiency as Criterion for Virtual Commissioning of Automated Assembly Systems. Procedia CIRP 23 (2014), S. 137-142.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, M.: Concept Experience. Virtuelle Realität in frühen Phasen der Produktentstehung. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Augmented & virtual reality in der Produktentstehung. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge - virtual prototyping, digitale Fabrik mit AR,VR - AR, VR Interaktions und Visualisierungstechniken. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst 2009, S. 321-332. ISBN: 978-3-939350-71-2.

DANKSAGMÜLLER ET AL. 2004

Danksagmüller, K.; Frank, R.: Planung und Umsetzung von Materialflusssystemen. In: Lutz, U. et al. (Hrsg.): Industrielles Facility Management. Berlin, Heidelberg: Springer 2004, S. 129-144. ISBN: 978-3-642-62230-4.

DAVIS 2005

Davis, A. M.: Just enough requirements management. Where software development meets marketing. New York: Dorset House Pub. 2005. ISBN: 978-0932633644.

DESILVA 2005

DeSilva, C. W.: Mechatronics. An integrated approach. Boca Raton: CRC Press 2005. ISBN: 0849312744.

DICK ET AL. 2011

Dick, C.; Georgii, J.; Westermann, R.: A Real-Time Multigrid Finite Hexahedra Method for Elasticity Simulation using CUDA. Simulation Modelling Practice and Theory 19 (2011) 2, S. 801-816.

DIEHL 2010

Diehl, H.: Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten. 1 Aufl: Verl. Dr. Hut 2010. ISBN: 3868534407. (Produktentwicklung).

DIERßEN 2002

Dierßen, S.: Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte. Dissertation. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 2002.

DIN EN ISO 9000

DIN . DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe.

DIN 30781

DIN . DIN 30781: Transportkette - Grundbegriffe. Berlin: Beuth Verlag 1989-05.

DIN 30781-1

DIN . DIN 30781-1: Transportkette: Grundbegriffe, Erläuterungen (Beiblatt). Berlin: Beuth Verlag 1989-05.

DIN 30781-2

DIN . DIN 30781-2: Transportkette: Systematik der Transportmittel und Transportwege. Berlin: Beuth Verlag 1989-05.

DIN V 19233

DIN . DIN V 19233: Prozeßautomatisierung: Automatisierung mit Prozeßrechensystemen - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag 1998-07.

DIN 55405

DIN . DIN 55405: Verpackung - Terminologie - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2006.

DIN EN 14943

DIN . DIN EN 14943: Transportdienstleistungen –Logistik –Glossar. Berlin: Beuth Verlag 2006-03.

DIN EN 62264 - Teil 3

DIN . DIN EN 62264 - Teil 3: Integration von Unternehmens-EDV und Leitsystemen: Aktivitätsmodelle für das operative Produktionsmanagement. Berlin: Beuth Verlag 2008-01.

DIN EN ISO 8373

DIN . DIN EN ISO 8373: Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. Berlin: Beuth Verlag 2010-11.

DIN EN 61131

DIN . DIN EN 61131: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2014-06.

DIN IEC 60050-351

DIN . DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik: 2014-07.

DIN EN 60050-351

DIN . DIN EN 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch; Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth Verlag 2014-09.

DISTEL ET AL. 2012

Distel, F.; Hofmann, D.; Hongrong, H.; Gunther, R.: Iterative Coupling of Physically-based and FEM Simulation. Frankfurt: 2012.

DIXIUS 1998

Dixius, D.: Simultane Projektorganisation. Ein Leitfaden für die Projektarbeit im simultaneous Engineering. Berlin: Springer 1998. ISBN: 978-3540645474.

DÖBELE 2010

Döbele, M.: Informationsmodell für die Planung und die Ausschreibung der Automatisierungstechnik in Fertigungsanlagen. Technische Universität München. München 2010.

DÖBLER 2008

Döbler, T.: Simulation und Visualisierung in der Produktentwicklung. Marktanalyse / Band 12. Stuttgart, Mannheim, Karlsruhe: 2008.

DOHMEN 2002

Dohmen, W.: Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme. 2002. ISBN: 9783831602148. (Forschungsberichte / IWB, Technische Universität München, Nr. 174).

DOMINKA 2007

Dominka, S.: Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen. Von der virtuellen zur realen Inbetriebnahme. 1 Aufl. Göttingen: Sierke 2007. ISBN: 3940333409. (Informationstechnik im Maschinenwesen).

DRAHT ET AL. 2010

Draht, R.; Miegel, V.: AutomationML verbindet Werkzeuge der Anlagenplanung. In: Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. Die wichtigsten Methoden. München: Oldenbourg-Industrieverl. 2010, S. 126-131. ISBN: 978-3-8356-3210-3.

DRAHT ET AL. 2011

Draht, R.; Schröter, B.; Hoernicke, M.: Datenkonsistenz im Umfeld heterogener Engineering- Werkzeuge. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 29-32. ISBN: 978-3-18-092143-3.

DRESCHER ET AL. 2013

Drescher, B.; Stich, P.; Kiefer, J.; Strahilov, A.; Bär, T.; Reinhart, G.: Physikbasierte Simulation im Anlagenentwicklungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau. In: Dangelmaier, W. (Hrsg.): 15. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Paderborn, 9. - 11. Oktober 2013 2013.

DRÖSCHEL ET AL. 2000

Dröschel, W.; Wiemers, M.: Das V-Modell 97. Der Standard für die Entwicklung von IT-Systemen mit Anleitung für den Praxiseinsatz. München [u.a.], Oldenbourg: 2000. ISBN: 978-3486250862.

DUDEN 2013

Duden: Die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln. 26 Aufl Aufl. [s.l.]: Bibliographisches Institut 2013. ISBN: 978-3411040162. (Der Duden in zwölf Bänden, Nr. 1).

EBERLY 2005

Eberly, D. H.: 3D game engine architecture. Engineering real-time applications with wild magic. Amsterdam [u.a.]: Morgan Kaufmann/Elsevier 2005. ISBN: 978-0-12-229064-0. (The Morgan Kaufmann series in interactive 3D technology).

EBERLY 2010

Eberly, D. H.: Game physics. 2 Aufl. Amsterdam, Boston: Morgan Kaufmann 2010. ISBN: 0123749034.

ECKSTEIN 1999

Eckstein, J.: Echtzeitfähige Kollisionserkennung für Virtual-reality-Anwendungen. München: Utz, Wiss. 1999. ISBN: 978-3896755551. (Informatik).

EGERMEIER 2002

Egermeier, H.: Haptische VR-Umgebung zur Analyse virtueller Prototypen. Mechatronik News 2 (2002).

EHINGER 2013

Ehinger, C. A.: Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen. München: Utz Verlag 2013. ISBN: 978-3-8316-4233-5. (Forschungsberichte IWB, Nr. 268).

EHRENSTRAßER 2010

Ehrenstraßer, M.: Konfigurieren statt Konstruieren – mechatronisches Engineering im Entstehungsprozess von Karosseriebauanlagen. Fulda: 2010.

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4 Aufl. München, Wien: Hanser 2009. ISBN: 3446420134.

EHRENSPIEL ET AL. 2014

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. 2014 Aufl. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-41959-1. (VDI-Buch).

EIGNER 2012

Eigner, M.: Modellbasiertes Systems Engineering für eine innovative Systementwicklung. Mannheim, 2012.

EIGNER 2014

Eigner, M.: Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014, S. 15-52. ISBN: 978-3-662-43815-2.

EIGNER ET AL. 2012A

Eigner, M.; Anderl, R.; Stark, R.: Interdisziplinäre Produktentstehung. In: Anderl, R. et al. (Hrsg.): Smart engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung. Berlin: Springer 2012, S. 7-16. ISBN: 978-3-642-29371-9.

EIGNER ET AL. 2012B

Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: Modellverwaltungsplattformen im modellbasierten Systems Engineering. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

EISENRING ET AL. 2012

Eisenring, S.; Frikart, M.; Gerritsen, W.; Krainer, C.; Lamm, J. G.; Mettauer, A.; Walker, M.; Zollinger, M.: Auf dem Weg zu einem Leitfaden im Systems Engineering für moderat-komplexe Systeme. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

ELEY 2012

Eley, M. (Hrsg.): Simulation in der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-27372-8. (Springer-Lehrbuch).

EPPLE 2011

Epple, U.: Einfachheit als Konstruktionsprinzip. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 17-20. ISBN: 978-3-18-092143-3.

ERICSON 2005

Ericson, C.: Real-time collision detection. Amsterdam, Boston: Elsevier 2005. ISBN: 978-0-08-047414-4. (Morgan Kaufmann series in interactive 3D technology).

ERLEBEN 2005

Erleben, K.: Physics-based animation. 1st ed Aufl. Hingham, Mass.: Charles River Media 2005. ISBN: 978-1584503804. (Charles River Media graphics series).

EBER ET AL. 2001

Eßer, K.; Hillebrand, W.; Messner, D.: Systemische Wettbewerbsfähigkeit und Entwicklung. In: Thiel, R. E. (Hrsg.): Neue Ansätze zur Entwicklungstheorie. 2 Aufl. Bonn: Dt. Stiftung für Internat. Entwicklung, Zentrale Dokumentation 2001, S. 147-163. ISBN: 9783931227760.

EVERITT 2001

Everitt, C.: Interactive Order-Independent Transparency. NVIDIA technical report. 2001.

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Flexible Produktionssysteme. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. 3., völlig neu gestaltete Aufl Aufl. Stuttgart: C.E. Poeschel Verlag 1992, S. 2058-2066. ISBN: 978-3-7910-8027-7.

FAZIO ET AL. 1987

Fazio, T. de; Whitney, D.: Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on Robotics and Automation 3 (1987) 6, S. 640-658.

FEDROWITZ 2004

Fedrowitz, C.: Virtuelle Inbetriebnahmen - heute und Morgen. Ludwigsburg: 2004.

FEDROWITZ ET AL. 2010

Fedrowitz, C.; Mikuta, G.; Diedrich, C.; Suchold, N.: Integriertes digitales Anlagenmodell für die virtuelle Inbetriebnahme. In: Sauer, O. (Hrsg.): Tagungband / Karlsruher Leittechnisches Kolloquium 2010. 9. - 10. Juni 2010. Stuttgart: Fraunhofer-Verl 2010. ISBN: 3839601304.

FELDHUSEN ET AL. 2013

Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013 Aufl. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-642-29569-0. (SpringerLink : Bücher).

FELDHUSEN ET AL. 2014

Feldhusen, J.; Schürmann, H.; Orloff, M.: Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 24., neu bearbeitete und erw. Aufl Aufl. Berlin: Springer 2014, S. F1 - F38. ISBN: 9783642388910.

FELGEN 2007

Felgen, L.: Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte. 1. Aufl Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-556-0. (Produktentwicklung).

FISCHER ET AL. 1997

Fischer, W.; Dittrich, L.: Materialfluß und Logistik. Optimierungspotentiale im Transport- und Lagerwesen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1997. ISBN: 978-3-642-97976-7.

FOLLMER ET AL. 2011

Follmer, M.; Hehenberger, P.; Punz, S.; Rosen, R.; Zeman K.: Approach for the creation of mechatronic system models. In: Culley, S. et al. (Hrsg.): ICED 11, København. The 18th International Conference on Engineering Design : 15th-18th August, 2011, Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark : proceedings : impacting society through engineering processes. [Great Britain]: Design Society 2011, S. 258-267. ISBN: 978-1-904670-24-7.

FRANK 2011

Frank, G.: Optimierung des Konstruktionsprozesses mittels Automatisierung. In: Schenk, M. (Hrsg.): Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Magdeburg 2011, S. 62-66.

FRIEDENTHAL ET AL. 2014

Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R.: A Practical Guide to SysML – The Systems Modeling Language.: Morgan Kaufmann 2014.

FRIEDLI ET AL. 2012

Friedli, T.; Schuh, G.: Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten. 2 Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2012. ISBN: 3642302769.

FRIEDRICH 2011

Friedrich, M.: Funktionsorientiertes Konzept zur Unterstützung früher Phasen der Produktentwicklung in der Informationstechnik. Dissertation Technische Universität München. neue Ausg. Aufl. Saarbrücken: Suedwestdeutscher Verlag fuer Hochschulschriften 2011. ISBN: 3838125436.

FRITZSCHE ET AL. 2007

Fritzsche, M.; Keil, P.: Kategorisierung etablierter Vorgehensmodelle und ihre Verbreitung in der deutschen Software-Industrie. TU München - Fakultät für Informatik. Chair IV: Software & Systems Engineering 2007.

FRITZSON 2004

Fritzson, P. A.: Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1. Piscataway, N.J., [New York]: IEEE Press; Wiley-Interscience 2004. ISBN: 978-0471471639.

FRÜHAUF 1997

Frühauf, T.: Graphisch-Interaktive Strömungsvisualisierung. Berlin, Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 978-3-540-62708-1. (Beiträge zur Graphischen Datenverarbeitung).

GAAG 2010

Gaag, A.: Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2010. ISBN: 978-3868537314. (Produktentwicklung).

GANOVELLI ET AL. 2000

Ganovelli, F.; Cignoni, P.; Montani, C.; Scopigno, R.: A Multiresolution Model for Soft Objects Supporting Interactive Cuts and Lacerations. Computer Graphics Forum 19 (2000) 3, S. 271-281.

GANSCHAR ET AL. 2013

Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. [Studie]. Stuttgart: Fraunhofer Verl. 2013. ISBN: 978-3-8396-0570-7.

GAUSEMEIER 2005

Gausemeier, J.: Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung - Herausforderungen an die domänenübergreifende Zusammenarbeit. ProduktDatenJournal (2005) 1.

GAUSEMEIER 2008

Gausemeier, J.: Domänenübergreifende Vorgehensmodelle. Paderborn: 2008.

GAUSEMEIER ET AL. 2001

Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Hanser 2001. ISBN: 9783446216310.

GAUSEMEIER ET AL. 2004

Gausemeier, J.; Berger, T.: Ideenmanagement in der strategischen Produktplanung– Identifikation der Produkte und Geschäftsfelder von morgen. Konstruktion 09-2004. <http://www.innovationswissen.de/fileadmin/spp_downloads/presseartikel/ideenmanagement.pdf>.

GAUSEMEIER ET AL. 2009

Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S.: Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. Research in Engineering Design 20 (2009) 4, S. 201-223.

GAUSEMEIER ET AL. 2011

Gausemeier, J.; Schäfer, W.; Anacker, H.; Bauer, F.; Dziwok, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme 2011, S. 7-35.

GAUSEMEIER ET AL. 2013

Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Steffen, D.; Czaja, A. M.; Tschirner, C.; Wiederkehr, O.: Systems Engineering in der industriellen Praxis: Gesellschaft für Systems Engineering e.V 2013.

GAUSEMEIER ET AL. 2014

Gausemeier, J.; Czaja, A. M.; Dumitrescu, R.; Tschirner, C.; Steffen, D.; Wiederkehr, O.: Studie: Systems Engineering in der industriellen Praxis.

GEISBERGER ET AL. 2004

Geisberger, E.; Schmidt, R.: Abschlussbericht des Projekts "ProMiS" - Projektmanagement für interdisziplinäre Systementwicklungen. Aus dem Themenfeld "Software in technischen Produkten - Anwendung von Methoden und Vorgehensweisen für eine ingenieurmässige Software-Entwicklung in der Produktion" im Rahmen des Forschungsvorhabens des BMBF "Forschung für die Produktion von Morgen" ; [Leitfaden für die Anwendung von Projektmanagement und Systemspezifikation mit einem Praxishandbuch auf CD-ROM]. Frankfurt am Main: VDMA-Verl. 2004. ISBN: 3816305032. (Software).

GEORGII 2008

Georgii, J.: Real-time Simulation and Visualization of deformable Objects: Grin Verlag GmbH 2008.

GEORGII ET AL. 2010

Georgii, J.; Lagler, D.; Dick, C.; Westermann, R.: Interactive Deformations with Multigrid Skeletal Constraints. In: Kenny Erleben et al. (Hrsg.): VRIPHYS 10: 7th Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulations. Copenhagen, Denmark: Eurographics Association 2010, S. 39-47. ISBN: 978-3-905673-78-4.

GIBSON ET AL. 1997

Gibson, S. F.; Mirtich, B.: A survey of deformable models in computer graphics. Technical Report TR-97-19, Mitsubishi (1997).

GILZ 2014

Gilz, T.: Requirements Engineering und Requirements Management. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014, S. 53-76. ISBN: 978-3-662-43815-2.

GLOGER 2011

Gloger, B.: Scrum. Produkte zuverlässig und schnell entwickeln. 3., aktualisierte Auflage Aufl. München: Hanser, Carl 2011. ISBN: 978-3-446-42524-8.

GOLDHAHN 2006

Goldhahn, H.: Entstehung und Entwicklung der Ingenieurdisziplin Verarbeitungstechnik. In: Fachtagung VVD <2006, Dresden> (Hrsg.): Vorsprung aus Tradition. Tagungsband ; [Packgut, Packmittel, Maschine]. Nichtred. Ms.-Dr Aufl. Dresden: Techn. Univ 2006. ISBN: 3-86005-510-0.

GÖPFERT 2000

Göpfert, J. S.: Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen. Harvard Business Manager (2000) 3.

GÖTZ 1991

Götz, R.: Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile. Berlin, New York: Springer 1991. ISBN: 9783540544012. (IWB Forschungsberichte, Nr. 39).

GRANDE 2011

Grande, M.: 100 Minuten für Anforderungsmanagement. Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. 1 Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2011. ISBN: 383488135X.

GRÄTZ 2006

Grätz, F. M.: Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme. München: Utz 2006. ISBN: 978-3-8316-0643-6. (Forschungsberichte IWB, Nr. 200).

GRIMSTEAD ET AL. 1995

Grimstead, I. J.; Martin, R. R.: Creating Solid Models from Single 2D Sketches. (Hrsg.): Proceedings of the Third ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York, NY, USA: ACM 1995, S. 323-337. ISBN: 0-89791-672-7.

GRINSPUN ET AL. 2002

Grinspun, E.; Krysl, P.; Schröder, P.: CHARMS: A Simple Framework for Adaptive Simulation. ACM Trans. Graph. 21 (2002) 3, S. 281-290.

GROß ET AL. 2012

Groß, J.; Rudolph, S.: Regelbasierte Analyse von Entscheidungen im Entwurf komplexer Systeme. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

GROTE ET AL. 2014

Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 24., neu bearbeitete und erw. Aufl Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 9783642388910.

GROTH 2011

Groth, A.: Führungsstark im Wandel. Change Leadership für das mittlere Management. Frankfurt am Main [u.a.]: Campus-Verl 2011. ISBN: 3593392216.

GRUNDIG 2009

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 3., neu bearb. Aufl Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-41411-2.

GRUNDKE 2000

Grundke: Neue Entwicklungen bei Packstoffen. In: Schulz, E. (Hrsg.): Aktuelle Trends in der Lebensmittel-Verpackungstechnologie "Vom Fließband in die Tüte" ; Beiträge im Rahmen des 6. Symposiums zur Lebensmitteltechnologie in Neubrandenburg. Neubrandenburg 2000, S. 48-62. ISBN: 3932227336.

GÜNTHNER 2014

Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum. fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München 2014.

GÜNTHNER ET AL. 2006

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Heinecker, M.: Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. AIF-Abschlussbericht zum Forschungsthema: Entwicklung, modular aufgebauter, skalierbar automatisierter Materialflusssysteme für flexible, wandelbare Fabrikstrukturen für den innerbetrieblichen Behältertransport. München: 2006.

HAACK 1997

Haack, J.: Interaktivität als Kennzeichen von Multimedia und Hypermedia. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Psychologie Verl. Union 1997, S. 150-166.

HABERFELLNER 2015

Haberfellner, R.: Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 13., völlig neu bearb. und erweiterte Aufl. Zürich: Orell Füssli 2015. ISBN: 978-3280040683.

HACHMÖLLER 2006

Hachmöller, R.: Methoden zur Zielkostenerreichung bei innovativen Kaufteilen. Eine theoretische und empirische Untersuchung. 1 Aufl. München: TCW Transfer-Centrum 2006. ISBN: 978-3937236339. (TCW Wissenschaft und Praxis, Nr. 37).

HACKENBERG ET AL. 2014

Hackenberg, G.; Richter, C.; Zäh, M. F.: A Multi-disciplinary Modeling Technique for Requirements Management in Mechatronic Systems Engineering. Procedia Technology 15 (2014), S. 5-16.

HAMMERS 2012

Hammers, C.: Modell für die Identifikation kritischer Informationspfade in Entwicklungsprojekten zur projektindividuellen Umsetzung der Quality-Gate-Systematik. Aachen: Apprimus-Verl 2012. ISBN: 3-86359-070-8. (Produktionsqualität und Messtechnik, Nr. Bd. 2012,14).

HAMMOND ET AL. 2003

Hammond, T.; Davis, R.: LADDER: A Language to Describe Drawing, Display, and Editing in Sketch Recognition. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). Acapulco, Mexico 2003, S. 461-467.

HAMMOND ET AL. 2005

Hammond, T.; Davis, R.: LADDER, a Sketching Language for User Interface Developers. *Comput. Graph.* 29 (2005) 4, S. 518-532.

HAMMOND ET AL. 2010

Hammond, T.; Davis, R.: Creating the Perception-based LADDER sketch recognition language. In: Halskov, K. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems. DIS 2010* ; Aarhus, Denmark, 16 - 20 August 2010. New York, NY: ACM 2010. ISBN: 978-1-4503-0103-9.

HARASHIMA ET AL. 1996

Harashima, F.; Masayoshi, T.; Toshio, F.: *Mechatronics-'what is it, why, and how? An editorial.* 1996.

HARTMANN 1998

Hartmann, E.: A marching method for the triangulation of surfaces. *The Visual Computer* 14 (1998) 3, S. 95-108.

HAUSCHKE 2010

Hauschke, T.: *Projektübergreifende Roboter-Konstruktion aus dem Baukasten.* etz S1/2010.

HAUSCHKE ET AL. 2013

Hauschke, T.; Riexinger, K.: Konfigurieren - Der nächste Schritt im Engineering. In: Happacher, M. (Hrsg.): *Benchmarkforum Intelligentes Engineering: Computer&AUTOMATION; ITQ 2013.*

HAUTH ET AL. 2004

Hauth, M.; Strasser, W.: *Corotational Simulation of Deformable Solids.* Plzen, Czech Republic: 2004.

HEHENBERGER 2011

Hehenberger, P.: *Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung.* 1 Aufl. Berlin[u.a]: Springer Berlin 2011. ISBN: 978-3-642-13474-6.

HEIMANN ET AL. 2001

Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: *Mechatronik. Komponenten - Methoden - Beispiele ; mit 25 Tabellen und 64 ausführlich durchgerechneten Beispielen.* 2 Aufl. München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. 2001. ISBN: 3446216898.

HEINRICH ET AL. 2015

Heinrich, B.; Glöckler, M.; Linke, P.: Grundlagen Automatisierung. Sensorik, Regelung, Steuerung. Aufl. 2014 Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2015. ISBN: 3658059605.

HEIßING 2009

Heißing, B.: Straßenfahrzeuge: Entwicklung und Simulation. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München. München 2009.

HELLENBRAND 2013

Hellenbrand, D.: Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse. 1 Aufl. München: Dr. Hut 2013. ISBN: 978-3843910736. (Produktentwicklung).

HENSEL 2011

Hensel, T.: Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen. München: Utz 2011.

HERGENRÖTHER 2003

Hergenröther, E.: Verformungsmodellierung durch kombinierte Simulationsverfahren. Dissertation Uni Darmstadt. 2003.

HESSE 2013

Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. Mit 25 Tabellen sowie 26 Übungsaufgaben und 115 Kontrollfragen. 3 Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43530-8.

HEUCHEMER 2012

Heuchemer, B.: Simotion, TIA Portal und Automation Designer auf dem Prüfstand. In: Happacher, M. (Hrsg.): Benchmarkforum Intelligentes Engineering. München: Computer&AUTOMATION; ITQ 2012.

HIRSCHMANN 2000

Hirschmann, K.-H.: Verpackungstechnik. In: Schulz, E. (Hrsg.): Aktuelle Trends in der Lebensmittel-Verpackungstechnologie "Vom Fließband in die Tüte" ; Beiträge im Rahmen des 6. Symposiums zur Lebensmitteltechnologie in Neubrandenburg. Neubrandenburg 2000, S. 123-130. ISBN: 3932227336.

HOFFMANN ET AL. 2010

Hoffmann, P.; Schumann, R.; Stern, O.: Fachausschusssitzung FA 6.11 CACE. Ladenburg 2010.

HOFMANN 2014

Hofmann, D.: Simulationsgestützte Auslegung von Ordnungsschikanen in Vibrationswendelförderern. Technische Universität München. München 2014.

HOHER ET AL. 2011

Hoher, S.; Röck, S.; Verl, A.: A System Dynamic Model of a Complex Material Flow System for Virtual Commissioning. Stuttgart: 2011.

HOHER ET AL. 2012

Hoher, S.; Schindler, P.; Göttlich, S.; Schleper, V.; Röck, S.: System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012, S. 316-321. ISBN: 978-3-642-23859-8.

HÖLTKEMEIER 2012

Höltkemeier, K.-U.: Neues 3D-Zeichnungsprogramm von Dassault Systèmes. 2012.

HUBER ET AL. 2013

Huber, T.; Kirig, A.: Die neuen Trendsetter. 20 Nischen, die den Konsum von morgen prägen. Frankfurt, M.: Zukunftsinst 2013. ISBN: 978-3-938284-79-7. (Trendstudie / Zukunftsinstitut).

HUMMEL 2011

Hummel, B.: Integrated Behavior Modeling of Space-Intensive Mechatronic Systems. Technische Universität München. München 2011.

HUMMEL ET AL. 2012

Hummel, J.; Wolff, R.; Stein, T.; Gerndt, A.; Kuhlen, T.: An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual Reality Assembly Simulations. In: Hutchison, D. et al. (Hrsg.): Advances in Visual Computing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012, S. 346-357. ISBN: 978-3-642-33190-9.

HUNDT ET AL. 2011

Hundt, L.; Lüder, A.; Köhlein, A.; Gewalt, N.; Böhm, B.: Allgemeine Konzepte zur Modellierung und Nutzung mechatronischer Systeme im Engineering von Fertigungssystemen. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 271-274. ISBN: 978-3-18-092143-3.

HUTTERER 2012

Hutterer, A.: Das Software-Engineering: Unkalkulierbarer Teil der Maschinenplanung. In: Happacher, M. (Hrsg.): Benchmarkforum Intelligentes Engineering. München: Computer&AUTOMATION; ITQ 2012.

HÜTTNER 2011

Hüttner, J.: Simulation des Rillschlauches eines medizinischen Robotersystems. München 2011.

IEC 60617

IEC . IEC 60617: Graphical Symbols for Diagrams: 2001.

IEEE 830

IEEE . IEEE 830: Recommended Practice for Software Requirements Specifications: 1998.

IEEE 1998

IEEE: IEEE guide for developing system requirements specifications. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998. ISBN: 978-0-7381-1723-2.

IGARASHI ET AL. 1999

Igarashi, T.; Matsuoka, S.; Tanaka, H.: Teddy: A sketching interface for 3d freeform design. Los Angeles: 1999.

IMAI 1993

Imai, M.: Kaizen. Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb. 10 Aufl. München: Wirtschaftsverl. Langen Müller 1993. ISBN: 3-7844-7287-7.

ISERMANN 2008

Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Grundlagen. 2 Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-32336-5.

JÄGER 2007

Jäger, P. W.: Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Stuttgart, Stuttgart: Univ; Inst. für Maschinenelemente 2007. ISBN: 3-936100-22-5. (Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Nr. 121).

JAMAL 2009

Jamal, R. (Hrsg.): Virtuelle Instrumente in der Praxis. Messtechnik, Automatisierung ; Begleitband zum Kongress VIP 2009. Heidelberg: Hüthig 2009. ISBN: 978-3-7785-4057-2. (Praxiswissen Elektronikindustrie).

JANSEN 2007

Jansen, S.: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 3832262520. (Schriftenreihe // Institut für Konstruktionstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Nr. 2007,3).

JANSSON ET AL. 2003

Jansson, J.; Vergeest, J. S.: Combining deformable- and rigid-body mechanics simulation. *The Visual Computer* 19 (2003) 5, S. 280-290.

JENSEN 1998

Jensen, J. F.: Interactivity. (Hrsg.): *Nordicom Review*, 19(1), 1998.

JENSEN 2007

Jensen, S.: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-Shop-Fertigung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. München: Utz 2000. ISBN: 3896758705. (Forschungsberichte IWB, Nr. 145).

JORGE ET AL. 2000

Jorge, J. A.; Fonseca, M. J.: A Simple Approach to Recognise Geometric Shapes Interactively. In: Chhabra, A. K. et al. (Hrsg.): *Graphics recognition. Recent advances : Third International Workshop, GREC'99, Jaipur, India, September 26-27, 1999 : selected papers*. Berlin, New York: Springer 2000, S. 266-274. ISBN: 978-3-540-41222-9.

JORGE ET AL. 2011

Jorge, J. A.; Samavati, F. (Hrsg.): *Sketch-based interfaces and modeling*. London, New York: Springer 2011. ISBN: 978-1-84882-812-4.

JULINEK 2011

Julinek, S.: Mechatronische Verpackungsmaschinen. In: Bender, K. et al. (Hrsg.): *SPS IPC DRIVES 2011. Elektrische Automatisierung, Systeme und Komponenten ; Fachmesse & Kongress 22. - 24. Nov. 2011, Nürnberg ; mit CD-ROM ; [Tagungsband]*. Berlin, Offenbach: VDE-Verl 2011. ISBN: 978-3800733798.

JUNG 1995

Jung, T.: Entwicklung einer Plattform zur interaktiven physikalisch basierten Animation gelenkig verbundener Systeme. Techn. Univ., Diss.--Berlin, 1995. München: Oldenbourg 1995. ISBN: 3486234579. (GMD-Berichte, Nr. 249).

JUNG 2006

Jung, C.: Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut 2006. ISBN: 978-3899633672. (Produktentwicklung).

KADACHI 2004

Kadachi, M.: Kriterien für eine simulationskonforme Abbildung von Materialflusssystemen. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München 2004.

KAGERMANN ET AL. 2012

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin: 2012.

KAIN 2011

Kain, S. F.: Effiziente Prozessüberwachung und Diagnose komplexer Fertigungsanlagen mit betriebsparalleler Simulation. 1. Aufl. Göttingen: Sierke 2011. ISBN: 978-3-86844-361-5.

KANG ET AL. 2002

Kang, Y.-M.; Cho, H.-G.: Complex Deformable Objects in Virtual Reality. (Hrsg.): Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York, NY, USA: ACM 2002, S. 49-56. ISBN: 1-58113-530-0.

KAUFMAN ET AL. 1996

Kaufman, S.; Wilson, R.; Jones, R.; Calton, T.; Ames, A.: The Archimedes 2 mechanical assembly planning system. (Hrsg.): Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE 1996, S. 3361-3368. ISBN: 0-7803-2988-0.

KAUFMANN ET AL. 2008

Kaufmann, P.; Martin, S.; Botsch, M.; Gross, M.: Flexible Simulation of Deformable Models Using Discontinuous Galerkin FEM. 2008.

KIEFER 2007

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Univ., Diss.--Saarbrücken, 2007. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik 2007. ISBN: 3-930429-72-1. (Schriftenreihe Produktionstechnik, Nr. 43).

KIEFER 2011

Kiefer, J.: Virtuelle Inbetriebnahme als mechatronische Simulationsmethode. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching 2011. ISBN: 978-3-8316-4149-9.

KIEFER ET AL. 2006

Kiefer, J.; Bergholz, W.: Virtuelle Inbetriebnahme – Hürden und Wege in die industrielle Anwendung. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006.

KIEFER ET AL. 2009

Kiefer, J.; Ollinger, L.; Bergert, M.: Virtuelle Inbetriebnahme. atp - Automatisierungstechnische Praxis 7.2009.

KIRMSE 2004

Kirmse, A.: Spieleprogrammierung Gems 4. Die Referenz für professionelle Spieleprogrammierung. München: Hanser 2004. ISBN: 3446229442.

KLEIN 2005A

Klein, R.: Algorithmische Geometrie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Algorithmische Geometrie (2005a).

KLEIN 2005B

Klein, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Paderborn 2005.

KLEIN 2016

Klein, T. P.: Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. Technische Universität München. München 2016.

KLEIN ET AL. 2013

Klein, T.; Reinhart, G.: Approaches for Integration of Agile Procedures into Mechatronic Engineering of Manufacturing Systems. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 5th Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV) 2013 2013.

KLEMM 2009

Klemm, P.: Mechatronisches Engineering und virtuelle Inbetriebnahme. Waiblingen 2009.

KNIES ET AL. 2012

Knies, W.; Schierack, K.: Elektrische Anlagentechnik. Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzeinrichtungen ; mit zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben. 6 Aufl. München [u.a.]: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43357-1. (Lernbücher der Technik).

KNOTHE ET AL. 2008

Knothe, K.; Wessels, H.: Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. 4., erw. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 3540721886.

KOÇ 2003

Koç, A.: Entscheidungsunterstützung zur Planung der Software-Qualitätssicherung in mechatronischen Produkten. München: Utz, Wiss. 2003. ISBN: 3-8316-0250-6.

KOCH ET AL. 2014

Koch, M.; Butz, A.; Schlichter, J. (Hrsg.): Mensch & Computer 2014. 14. fachübergreifende Konferenz für interaktive und kooperative Medien; Interaktiv unterwegs - Freiräume gestalten. München: Oldenbourg/De Gruyter 2014. ISBN: 3110344157.

KOMARNICKI 1980

Komarnicki, J.: Simulationstechnik. Eine Einführung im medienverbund Fernsehen - seminare - Lehrbuch. Dusseldorf: VDI Verlag 1980. ISBN: 3-18-400456-2.

KOMUS 2012

Komus, A.: Status Quo Agile Verbreitung und Nutzen agiler Methoden. Ergebnisbericht einer Studie. Koblenz: 2012.

KOREN 2010

Koren, Y.: The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems. Hoboken, N.J.: Wiley 2010. ISBN: 978-0-470-58377-7. (Wiley series in systems engineering and management).

KÖVARI 2011

Kövari, L.: Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011. ISBN: 9783866446243. (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik, Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, Nr. 35).

KRAMER ET AL. 1998

Kramer, U.; Neculau, M.: Simulationstechnik. München [u.a.]: Hanser 1998. ISBN: 3-446-19235-2.

KRAUSE ET AL. 2007

Krause, F. L.; Franke, H.-J.; Gausemeier, J.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. München [u.a.]: Hanser 2007. ISBN: 3446406670.

KRIPPNER 2010

Krippner, D.: Agentenorientierter Ansatz in Produktentwicklungsprozessen. Techn. Hochsch. Aachen, Aachen 2010.

KROTIL ET AL. 2014

Krottil, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten der Fluidsimulation in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses. In: Wittmann, J. et al. (Hrsg.): ASIM 2014, 22. Symposium Simulationstechnik, 3. bis 5. September 2014, HTW Berlin ; Tagungsband. Wien: ARGESIM / ASIM 2014, S. 259-266. ISBN: 978-3-901608-44-5.

KROTTMAIER 1995

Krottmaier, J.: Leitfaden Simultaneous Engineering. Kurze Entwicklungszeiten, niedrige Kosten, hohe Qualität. Berlin, New York: Springer-Verlag 1995. ISBN: 978-3540586364.

KRUG 2013

Krug, S.: Automatische Konfiguration von Robotersystemen (PlugetProduce). München: Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4243-4. (Forschungsberichte IWB, Nr. 270).

KUDLICH 2000

Kudlich, T.: Optimierung von Materialflußsystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Herbert Utz Verlag 2000.

KUFNER 2012

Kufner, A.: Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen. Heimsheim: Jost-Jetter 2012. ISBN: 3939890944. (ISW/IPA Forschung und Praxis, Nr. 188).

KUHN 1997

Kuhn, C.: Modellbildung und Echtzeitsimulation deformierbarer Objekte zur Entwicklung einer interaktiven Trainingsumgebung für die minimal-invasive Chirurgie. Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe: 1997.

KÜHN 2006

Kühn, W.: Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. München: Hanser 2006. ISBN: 9783446406193.

KUHN ET AL. 1998

Kuhn, A.; Rabe, M. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-540-63854-7.

KUHN ET AL. 2005

Kuhn, A.; Hellmann, A.; Ellerkmann, F.: Mehrwertdienst im Lebenszyklus von Sachanlagen in der Logistik. Logistics Journal nicht-referierte Veröffentlichungen (2005).

KÜHNAPFEL ET AL. 1995

Kühnapfel, U.; Krumm, H. G.; Kuhn, C.; Hübner, M.; Neisius, B.: Endosurgery simulations with KISMET: a flexible tool for surgical instrument design, operation room planning and VR technology based abdominal surgery training. München: Computerwoche Verlag 1995. (Virtual Reality World '95: Conference Documentation).

LACOUR 2012

Lacour, F.-F.: Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen. München: Utz 2012. ISBN: 9783831641628. (Forschungsberichte IWB, Nr. 257).

LANGERMANN 2009

Langermann, R.: Beitrag zur durchgängigen Simulationsunterstützung im Entwicklungsprozess von Flugzeugsystemen. Dissertation. Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme, TU Braunschweig. Braunschweig 2009.

LANZINGER ET AL. 2014

Lanzinger, C.; Gatterer, H.: Trend Report 2015. Global View - Unsere neue

Weltordnung in Zahlen. neue Ausg Aufl. Frankfurt am Main: Zukunftsinstitut
2014. ISBN: 978-3-938284-92-6.

LAUBER ET AL. 1999

Lauber, R.; Göhner, P.: Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer-
und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung,
Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und
Sicherheitstechnik. 3., völlig Neubearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer
1999. ISBN: 9783540653189. (Prozessautomatisierung, Nr. / Rudolf Lauber;
Peter Göhner ; 1).

LAUER 2010

Lauer, W. M.: Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in
dynamischen Produktentwicklungsprozessen. 1 Aufl. München: Verl. Dr. Hut
2010. ISBN: 978-3868535938. (Produktentwicklung).

LAW ET AL. 2000

Law, A. M.; Kelton, W. D.: Simulation modeling and analysis. 3rd ed Aufl.
Boston: McGraw-Hill 2000. ISBN: 978-0071165372. (McGraw-Hill series in
industrial engineering and management science).

LENNERZ 2002

Lennerz, C.: Impulsbasierte Dynamiksimulation starrer Körper unter
Verwendung von Hüllkörperhierarchien. 2002.

LENORD 2007

Lenord, O. B.: Maschinensimulation – Eckstein des Simultaneous Engineering
im Bereich Steuerungstechnik. In: Bender, K. et al. (Hrsg.): Elektrische
Automatisierung - Systeme und Komponenten. SPS/IPC/Drives 2007,
Fachmesse & Kongress, 27. - 29. Nov. 2007, Nürnberg ; Tagungsband, mit
Acrobat Reader 8. Berlin [u.a.]: VDE-Verl. 2007. ISBN: 978-3-8007-3069-8.

LERCHE ET AL. 2004

Lerche, M.; Pesch D.; Klemm, P.; Koraida, I.: Baukastenbasiertes Engineering
mit Föederal. Ein Leitfaden für Maschinen- und Anlagenbauer. Frankfurt am
Main: VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer 2004. ISBN:
9783816304784. (Software).

LEVET ET AL. 2006

Levet, F.; Granier, X.; Schlick, C.: 3D Sketching with Profile Curves. In:
Hutchison, D. et al. (Hrsg.): Smart Graphics. Berlin, Heidelberg: Springer
Berlin Heidelberg 2006, S. 114-125. ISBN: 978-3-540-36293-7.

LIEBERMAN ET AL. 1977

Lieberman, L. I.; Wesley, M. A.: AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly. IBM Journal of Research and Development 21 (1977) 4, S. 321-333.

LIEBL 1995

Liebl, F.: Simulation. Problemorientierte Einführung. 2., überarb. Aufl. München, Wien: Oldenbourg 1995. ISBN: 9783486233735.

LIN ET AL. 1998

Lin, M. C.; Gottschalk, S.: Collision Detection Between Geometric Models: A Survey. In: Robert, C. (Hrsg.): Information Geometers. Winchester, August 1998 1998, S. 37-56.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 3642014232. (VDI-Buch).

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, M.; Gornau, N.: Gestaltung marktorientierter Produktionssysteme. In: Specht, D. (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2009, S. 43-59. ISBN: 3834983063.

LINDWORSKY 2011

Lindworsky, A.: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest. 2011. ISBN: 3831641250. (IWB-Forschungsberichte, Nr. 249).

LINKE 2011

Linke, J.: Der SPS-Benchmark: Das Ergebnis. computer-automation.de. <<http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuerregeln/artikel/81899/>>.

LIPSON ET AL. 2007

Lipson, H.; Shpitalni, M.: Correlation-based Reconstruction of a 3D Object from a Single Freehand Sketch. (Hrsg.): ACM SIGGRAPH 2007 Courses. New York, NY, USA: ACM 2007. ISBN: 978-1-4503-1823-5.

LITZ 2013

Litz, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik. Regelungssysteme - Steuerungssysteme - Hybride Systeme. 2. Aufl Aufl. München: Oldenbourg, R 2013. ISBN: 3-486-70888-0.

LÜDER 2014

Lüder, A.: AutomationML als Datendrehscheibe für die digitale Fabrik. In: Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Braunschweig, 04./05.11.2014: Süddeutsche Verlag Veranstaltungen 2014.

LUTZ 2006

Lutz, R.: Kompetenz durch Simulation - Hilfsmittel bei Entwicklung, Inbetriebnahme und Anwendung komplexer Großpressen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006.

MAAG ET AL. 2011

Maag, T.; Krause, H. M.: Hinter anspruchsvollen Verpackungen steht Spitzentechnologie. In: Majschak, J.-P. (Hrsg.): Dresdner Verpackungstagung 2011. Dresden 2011.

MACKLIN ET AL. 2014

Macklin, M.; Müller, M.; Chentanez, N.; Kim, T.-Y.: Unified Particle Physics for Real-time Applications. ACM Trans. Graph. 33 (2014) 4, S. 153:1-153:12.

MAJSCHAK 1996

Majschak, J.-P.: Rechnerunterstützung für die Suche nach verarbeitungstechnischen Prinziplösungen. Dissertation. Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden. Dresden 1996.

MAJSCHAK 2014A

Majschak, J.-P.: Anwendung für Maschinensysteme der Stoffverarbeitung. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 24., neu bearbeitete und erw. Aufl Aufl. Berlin: Springer 2014, S. F 37 - F 47. ISBN: 9783642388910.

MAJSCHAK 2014B

Majschak, J.-P.: Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik. Dresden: 2014b.

MAJSCHAK 2015

Majschak, J.-P. (Hrsg.): Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik. Praxis trifft Wissenschaft!; Tagungsband; 12./13. März 2015 Dresden. Dresden: Selbstverl. der Techn. Univ. 2015.

MANTWILL 2012

Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Regensburg, 6./7.11.2012: Süddeutsche Zeitung 2012. (, Nr. 8. Fachkongress).

MANTWILL 2014

Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Braunschweig, 04./05.11.2014: Süddeutsche Verlag Veranstaltungen 2014. (, Nr. 10. Fachkongress).

MARTIN ET AL. 2010

Martin, S.; Kaufmann, P.; Botsch, M.; Grinspun, E.; Gross, M.: Unified Simulation of Elastic Rods, Shells, and Solids. 2010.

MÄRZ ET AL. 2011

März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-642-14535-3.

MASRY ET AL. 2005

Masry, M.; Kang, D.; Susilo, I.; Lipson, H.: A Freehand Sketching Interface for Progressive Construction and Analysis of 3D Objects. (Hrsg.): Computers & Graphics 29 2005, S. 563-575.

MAUDERER 2013

Mauderer, M.: Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen. München: Utz Verlag 2013.

MAURMAIER ET AL. 2010

Murmaier, M.; Dencovski, K.; Schmitz, E.: Engineering Challenges. In: Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. Die wichtigsten Methoden. München: Oldenbourg-Industrieverl. 2010, S. 14-22. ISBN: 978-3-8356-3210-3.

MAYER 2008

Mayer, G. S.: Lebenszyklus von Simulationsmodellen: Anforderungen und Fallbeispiele aus der Automobilindustrie. (Hrsg.): Rabe, M. (Hrsg.): Advances in simulation for production and logistics applications. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. 2008.

MEBOLDT 2008

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung: als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM): IPEK 2008. (Forschungsberichte / IPEK).

MEIßNER 2012

Meißner, D.: LEAN DEVELOPMENT. Lean Magazin.

MELCHINGER ET AL. 2003

Melchinger, A.; Schmitz, E.-U.: Schneller und effizienter in der Entwicklung durch Simulation und Optimierung. Bremen: 2003.

MENSCH & MECHATRONIK 2015

Mensch & Mechatronik: Entwicklung in der Mechatronik.
<<http://www.mensch-mechatronik.de>>.

MICHNIEWICZ ET AL. 2014

Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-physical Robotics – Automated Analysis, Programming and Configuration of Robot Cells based on Cyber-physical-systems. Procedia Technology 15 (2014), S. 567-576.

MID 2015

MID: Innovator 12 Hilfe. <<http://help.innovator.de>>.

MILBERG 1992

Milberg, J.: Werkzeugmaschinen - Grundlagen. Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen. Berlin [u.a.]: Springer 1992. ISBN: 0-387-54538-7. (Springer-Lehrbuch).

MILLER ET AL. 1998

Miller, T.; Elgård, P.: Defining Modules, Modularity and Modularization. Evolution of the Concept in a Historical Perspective. Proceedings of the 13th IPS Research Seminar; Aalborg University 1998 Fuglsoe: IKS 1998.

MILLINGTON 2010

Millington, I.: Game physics engine development. How to build a robust commercial-grade physics engine for your game. 2 Aufl. Amsterdam, Boston: Morgan Kaufmann Publishers 2010. ISBN: 978-0123819765.

MÖHRINGER 2012

Möhringer, S.: Systems Engineering im Mittelstand – ein flexibles Modell zur Rollenverteilung. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

MOORE 1965

Moore, G. E.: Cramming more components onto integrated circuits. Electronics 8.

MOORE ET AL. 2007

Moore, P.; Dublin City Univ., Dublin; Molloy, D.: A Survey of Computer-Based Deformable Models. In: McDonald, J. (Hrsg.): International Machine Vision and Image Processing Conference, 2007. IMVIP 2007 ; 5 - 7 Sept. 2007, National University of Ireland Maynooth, Maynooth, County Kildare, Ireland ; proceedings. Piscataway, NJ: IEEE 2007. ISBN: 978-0-7695-2887-8.

MORIZ ET AL. 2011

Moriz, N.; Faltinski, S.; Graeser, O.; Niggemann, O.; Barth, M.; Fay, A.: Integration und Anwendung von objektorientierten Simulationsmodellen in AutomationML. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 37-40. ISBN: 978-3-18-092143-3.

MÜLLER ET AL. 2002

Müller, M.; Dorsey, J.; McMillan, L.; Jagnow, R.; Cutler, B.: Stable Real-time Deformations. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. New York, NY, USA: ACM 2002, S. 49-54. ISBN: 1-58113-573-4.

MÜLLER ET AL. 2004

Müller, M.; Teschner, M.; Gross, M.: Physically-based simulation of objects represented by surface meshes. (Hrsg.): Computer Graphics International. Proceedings : Crete, Greece, June 16-19, 2004. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society 2004. ISBN: 0-7695-2171-1.

MÜLLER ET AL. 2006

Müller, F.; Heidelberger, B.; Hennix, M.; Ratcliff, J.: Position Based Dynamics. 2006.

MÜLLER-SOMMER ET AL. 2010

Müller-Sommer, H.; Straßburger, S.: Methoden zur Plausibilisierung von Eingangsdaten für Belieferungssimulationen in Logistik-Planungssystemen der Digitalen Fabrik. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010, S. 61-68. ISBN: 386644558X.

MVM 2015

MVM: Lager und Lagerreaktionen in der Eben.
<http://www.mvm.kit.edu/download/Bauteile_und_Lager.pdf>.

NEALEN ET AL. 2006A

Nealen, A.; Müller, M.; Keiser, R.; Boxerman, E.; Carlson, M.: Physically Based Deformable Models in Computer Graphics. Computer Graphics Forum 25 (2006a) 4, S. 809-836.

NEALEN ET AL. 2006B

Nealen, A.; Müller, M.; Keiser, R.; Boxerman, E.; Carlson, M.: Physically Based Deformable Models in Computer Graphics. Computer Graphics Forum 25 (2006b) 4, S. 809-836.

NEEF 2008

Neef, A.: Megatrends - Auf der Suche nach den Märkten von morgen. Karlsruhe 2008.

NESME ET AL. 2005

Nesme, M.; Payan, Y.; Faure, F.: Efficient, Physically Plausible Finite Elements. 2005.

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen. Aachen 2001.

NEUMANN 2009

Neumann, J.: Verfahren zur Ad-hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual-Reality-basierten Handhabungssimulationen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl 2009. ISBN: 978-3-8167-7954-4. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

NGUYEN 2008

Nguyen, H.: GPU gems 3. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley 2008. ISBN: 0321515269.

NOCHE ET AL. 1991

Noche, B.; Wenzel, S.: Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik. Köln: TÜV Rheinland 1991. ISBN: 3-88585-746-4. (Praxiswissen aktuell).

NOLLAU 2009

Nollau, R.: Modellierung und Simulation technischer Systeme. Eine praxisnahe Einführung. 1 Aufl. Berlin: Springer Berlin 2009. ISBN: 3540891218.

NUSSER ET AL. 2007

Nusser, M.; Wydra, S.; Hartig, J. G.: Forschungs- und wissensintensive Branchen: Optionen zur Stärkung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit. Innovationsreport. Berlin: 2007.

NYHUIS ET AL. 2010

Nyhuis, P.; Klemke, T.; Wagner, C.: Wandlungsfähigkeit - ein systemischer Ansatz. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Berlin: Gito 2010. ISBN: 3942183153.

OESTERSÖTEBIER ET AL. 2012

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. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

OLSEN ET AL. 2009

Olsen, L.; Samavati, F. F.; Sousa, M. C.; Jorge, J. A.: Sketch-based modeling: A survey. Computers & Graphics 33 (2009) 1, S. 85-103.

OMG 2015

OMG: Systems Modeling Language. The Official OMG SysML site. <<http://www.omgsysml.org/>>.

OTTOSSON 2004

Ottosson, S.: Dynamic Product Development – DPD. 2004.

OUYANG ET AL. 2011

Ouyang, T. Y.; Davis, R.: ChemInk: A Natural Real-Time Recognition System for Chemical Drawings. (Hrsg.): 2011 International Conference on Intelligent User Interfaces 2011, S. 267-276.

PARENT 2012

Parent, R.: Computer animation. Algorithms and techniques. 3 Aufl. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann 2012. ISBN: 978-0-12-415973-0.

PARENT 2015

Parent, R.: Computer Animation Information page. <<http://web.cse.ohio-state.edu/~parent/animation/index1.html>>.

PAWELLEK 2007

Pawellek, G.: Produktionslogistik. Planung - Steuerung - Controlling : mit 42 Übungsfragen. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-41057-2.

PFEIFER ET AL. 2014

Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 6., überarbeitete Auflage Aufl. München: Hanser, Carl 2014. ISBN: 978-3446434318.

PICHLER 2008

Pichler, R.: Srum - agiles Projektmanagement erfolgreich einsetzen. 1. Aufl Aufl. Heidelberg: Dpunkt-Verl. 2008. ISBN: 978-3898644785.

PIELOTH 2013

Pieloth, R.: Virtuelle Maschine ermöglicht schnelle Inbetriebnahme. MaschinenMarkt.

POHL ET AL. 2015

Pohl, K.; Rupp, C.: Basiswissen Requirements Engineering. Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering" ; Foundation Level nach IREB-Standard. 4., überarb. Aufl Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl 2015. ISBN: 978-3864902833.

PONN 2011

Ponn, J.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2nd Aufl Aufl. Heidelberg [Germany]: Springer 2011. ISBN: 9783642205798.

POST 2013

Post, P.: Lernfähige Systeme für die intelligente Automatisierung. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium. München: Bayern Innovativ 2013. ISBN: 978-3-8316-4009-6.

POTTMANN ET AL. 2010

Pottmann, M.; Engl, G.: Virtuelle Inbetriebnahme - Status und Anforderungen bei Linde Engineering. VDI/VDE-Workshop zur Virtuellen Inbetriebnahme. Dortmund 2010.

PREIM 1999

Preim, B.: Entwicklung interaktiver Systeme. Grundlagen, Fallbeispiele und innovative Anwendungsfelder. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 1999. ISBN: 978-3-662-07054-3. (Springer-Lehrbuch).

PRINZ ET AL. 2011

Prinz, J.; Lüder, A.; Suchold, N.; Draht, R.: Integriertes Engineering durch die standardisierte Beschreibung mechatronischer Objekte durch Merkmale. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 33-36. ISBN: 978-3-18-092143-3.

PRITSCHOW 2006

Pritschow, G.: Einführung in die Steuerungstechnik. Mit 40 Tabellen. München: Hanser 2006. ISBN: 3-446-21422-4.

PRITSCHOW ET AL. 2005

Pritschow, G.; Röck, S.; Rüdele, H.: Echtzeitfähige Simulation von Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 5.

RABE 2001

Rabe, M. (Hrsg.): Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. San Diego [u.a.]: SCS International 2001. ISBN: 1-56555-226-1.

RABE ET AL. 2008A

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: A new procedure model for verification and validation in production and logistics simulation. (Hrsg.): Winter Simulation Conference (WSC) 2008, S. 1717-1726.

RABE ET AL. 2008B

Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer 2008b. ISBN: 3-540-35281-3. (VDI-Buch).

RAUCHENBERGER 2010

Rauchenberger, J.: Reifegradmodelle als Ordnungsrahmen zur systematischen Prozessverbesserung für mechatronische Entwicklungsprozesse. Aachen: Apprimus-Verl 2010. ISBN: 978-3-86359-009-3. (Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement, Nr. Bd. 2010,30).

REINER ET AL. 2010

Reiner, J.; Schape, M.: Tackling IT complexity in product design. McKinsey & Company's Insights März 2010.
<http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/tackling_it_complexity_in_product_design>.

REINHART 1996

Reinhart, G. (Hrsg.): Durchgängige Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile. Zwischenbericht zum DFG-Vorhaben Mi 234/39-1. München: 1996.

REINHART ET AL. 1997

Reinhart, G.; Feldmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. München: Utz, Wiss. 1997. ISBN: 3-89675-034-8.

REINHART ET AL. 2006

Reinhart, G.; Wunsch, G.: Wann lohnt sich eine Virtuelle Inbetriebnahme? In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G.; Wunsch, G.: Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. Production Engineering 1 (2007) 4, S. 371-379.

REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Meling, F.; Zuber, E.; Grimmer, K.: Baukastenorientiertes und disziplinübergreifendes Engineering von Produktionsanlagen. Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge; Adaption, Selbstoptimierung und Verlässlichkeit; Integration Mechanik und Elektronik, Miniaturisierung ; 6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme, 2. und 3. April 2009, Heinz Nixdorf MuseumsForum. Paderborn: Heinz Nixdorf Inst 2009, S. 367-380. ISBN: 9783939350699.

REINHART ET AL. 2011A

Reinhart, G.; Stich, P.; Lacour, F.-F.; Hensel, T.: Digitale Fingerübungen - Virtuelle Inbetriebnahme. Montagetechnik (Hanser Verlag) (2011a) 1, S. 92-94.

REINHART ET AL. 2011B

Reinhart, G.; Stich, P.; Hensel, T.; Lacour, F.-F.: Simulationsgestützte Steuerungsentwicklung beschleunigt den Maschinenbau. B&R automation 2011/3 (2011b), S. 8-10.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Stich, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme 2011, S. 219-230.

REINHART ET AL. 2011C

Reinhart, G.; Stich, P.; Wunsch, G.: Effiziente Methoden zum digitalen Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. In: Bender, K. et al. (Hrsg.): SPS IPC DRIVES 2011. Elektrische Automatisierung, Systeme und Komponenten ; Fachmesse & Kongress 22. - 24. Nov. 2011, Nürnberg ; mit CD-ROM ; [Tagungsband]. Berlin, Offenbach: VDE-Verl 2011, S. 159-167. ISBN: 978-3800733798.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Zäh, M. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching: 2011. ISBN: 978-3-8316-4149-9. (IWB-Seminarberichte, Nr. 101).

REINHART ET AL. 2015

Reinhart, G.; Scholz-Reiter, B.; Wahlster, W.; Wittenstein, M.; Zühlke, D.:
Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für
die Praxis. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik -
IWU-, Chemnitz; Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015. ISBN: 3-8396-0930-5.

REUTER 2013

Reuter, A.: Definition eines mechatronischen Informationsmodells zur
Modellierung von Automatisierungskomponenten und Maschinen. Stuttgart:
Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart 2013. ISBN: 978-3843911375.

RICHTER 2013

Richter, C.: Reifegradmodelle für Werkzeuglandschaften zur Unterstützung
von ITSM-Prozessen. Dissertation. Informatik, Ludwig-Maximilians-
Universität. München 2013.

RÖCK 2007

Röck, S.: Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen
Steuerungselementen. Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN: 978-3-939890-24-
9. (ISW-Forschung und Praxis, Nr. 168).

RÖCK ET AL. 2007

Röck, S.; Pritschow, G.: Real-time capable Finite Element Models with
closed-loop control - a method for Hardware-in-the-Loop simulation of
flexible systems. (Hrsg.): Production Engineering Research & Development
2007.

RÖHL ET AL. 2012

Röhl, H.; Fröhlich, A.: Einsatz des JT-Formates in der Digitalen Fabrik. In:
Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Regensburg, 6./7.11.2012:
Süddeutsche Zeitung 2012.

RÖHSE ET AL. 2009

Röhse, F.; Schölzke, V.: Virtuelle Inbetriebnahme.
Computer&AUTOMATION (2009) 8, S. 68-72.

RÖHSE ET AL. 2012

Röhse, F.; Stetter, R.: Kosteneffizienz mit der richtigen
Automatisierungsplattform. A&D-Kompodium 2011/2012 (2012), S. 68-70.

ROLAND BERGER 2012

Roland Berger: Durch den verstärkten Einsatz von Baukastensystemen kann die Industrie um bis zu 30 Prozent höhere Umsatzanteile in den aufstrebenden Märkten erzielen.

RÖMISCH ET AL. 2014

Römisch, P.; Weiß, M.: Projektierungspraxis Verarbeitungsanlagen.
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014. ISBN: 978-3-658-02358-4.

ROOCK ET AL. 2015

Roock, S.; Wolf, H.: Scrum - die andere Perspektive auf Softwareentwicklung.
1. Aufl. Aufl. Heidelberg, Neckar: Dpunkt 2015. ISBN: 978-3864902611. (it-agile).

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik.
Allgemeine Technologie (2009).

ROPOHL 2012

Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie. Einführung in transdisziplinäres Denken. 1 Aufl. Berlin: edition sigma 2012. ISBN: 978-3-8360-3586-6.

ROBMANN ET AL. 2007

Roßmann, J.; Wischnewski, R.: Eine Systematik mit einem darauf abgestimmten Softwarewerkzeug zur durchgängigen Virtuellen Inbetriebnahme von Fertigungsanlagen. atp - Automatisierungstechnische Praxis 49 (2007) 7, S. 52-56.

ROBMANN ET AL. 2008

Roßmann, J.; Jung, T.: Dynamiksimulation für Virtuelle Welten: Erfahrungen, Anwendungen, Methoden. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 05.-06. Juni 2008. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn 2008. ISBN: 978-3-939350-51-4.

ROßMANN ET AL. 2009

Roßmann, J.; Jung, T.; Schluse, M.; Rast, M.: Interaktive integrierte Starrkörperdynamik- und Schüttgutsimulation. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Augmented & virtual reality in der Produktentstehung. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge - virtual prototyping, digitale Fabrik mit AR, VR - AR, VR Interaktions und Visualisierungstechniken. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst 2009, S. 31-48. ISBN: 978-3-939350-71-2.

ROßMANN ET AL. 2010

Roßmann, J.; Jung, T.; Rast, M.: Entwicklung Virtueller Testbeds mit Dynamik- und Bodenmechaniksimulation für Aufgaben in Forschung und Entwicklung. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge; Virtual Prototyping, Digitale Fabrik mit AR/VR; AR/VR Interaktions- und Visualisierungstechniken; 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 10. und 11. Juni 2010, Heinz Nixdorf MuseumsForum. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst., Univ. Paderborn 2010, S. 173-187. ISBN: 978-3-939350-93-4.

ROTHHÖFT 2012

Rothhöft, M.: Marktstudie Engineering-Prozess: Mechanik - Elektronik - Software. 2012.

ROWLEY 2007

Rowley, J.: The Wisdom Hierarchy: Representations of the DIKW Hierarchy. J. Inf. Sci. 33 (2007) 2, S. 163-180.

RUBIN 2012

Rubin, K. S.: Essential Scrum. A practical guide to the most popular agile process. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley 2012. ISBN: 978-0137043293. (The Addison-Wesley signature series).

RUPP 2007

Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management. Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Aufl. München [u.a.]: Hanser 2007. ISBN: 978-3446405097.

RUSINA ET AL. 2012

Rusina, F.; Rumiano, G.; Cultrona, P.; Putero, M.: Virtual Commissioning of Automotive Systems. Dresden 2012.

RUSSWURM 2013

Russwurm, S.: Software: Die Zukunft der Industrie. In: Sandler, U. (Hrsg.): Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 21-36. ISBN: 978-3-642-36916-2.

SABOV ET AL. 2009

Sabov, A.; Krüger, J.: Ontologiebasierte Methoden und Werkzeuge zur Modellierung von Produktionsanlagen. In: Brecher, C. et al. (Hrsg.): Effiziente Methodiken und durchgängige Werkzeuge zur Modellerstellung digitaler Produktionseinrichtungen. [Treffen der Hochschulinstitute IPK Berlin, ISW Stuttgart und dem WZL der RWTH Aachen ; Aachen 2008]. Düsseldorf: VDI-Verl. 2009, S. 101-113. ISBN: 9783183671021.

SCHACK 2008

Schack, R.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. München: Utz 2008. ISBN: 9783831607488. (IWB Forschungsberichte, Nr. 207).

SCHÄFER 2010A

Schäfer, K.: Von der digitalen Anlage zur Virtuellen Inbetriebnahme. ATZproduktion 01|2010.

SCHÄFER 2010B

Schäfer, A.: Geometrische Zerlegung. In: Fey, D. (Hrsg.): Grid-Computing: Eine Basistechnologie für Computational Science. s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2010, S. 439-465. ISBN: 978-3-540-79746-3.

SCHÄFER ET AL. 2014

Schäfer, K.; Nau, D.: Simulationsgestützte Fertigungssteuerungssysteme in variantenreichen Fabriken. In: Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Braunschweig, 04./05.11.2014: Süddeutsche Verlag Veranstaltungen 2014.

SCHAICH 2001

Schaich, C.: Informationsmodell zur fachübergreifenden Beschreibung intelligenter Produktionsmaschinen. München: Utz, Wiss. 2001. ISBN: 978-3-8316-0080-9. (Informationstechnik im Maschinenwesen, Nr. 15).

SCHÄTZ ET AL. 2000

Schätz, B.; Fahrmaier, M.; Beeck, M. von der; Jack, P.; Kespohl, H.; Koç, A.; Liccardi, B.; Scheermesser, S.; Zündorf, A.: Entwicklung, Produktion und Service von Software für eingebettete Systeme in der Produktion. Kurzfassung des Abschlußberichtes der Vordringlichen Aktion des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

SCHEDL 2009

Schedl, S.: Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess. München: Utz 2009. ISBN: 9783831608744. (Forschungsberichte IWB, Nr. 229).

SCHENK 2009

Schenk, M.: Digitale Fabrik - Realisierungsstand und Chancen. Magdeburg 2009.

SCHENK 2011

Schenk, M. (Hrsg.): Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Magdeburg: 2011. (IFF-Wissenschaftstage, Nr. 14).

SCHENK 2012

Schenk, M. (Hrsg.): Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Magdeburg: 2012. (IFF-Wissenschaftstage, Nr. 15).

SCHIELE 2012

Schiele, H.-G.: Computergrafik für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-23842-0.

SCHIERBAUM ET AL. 2012

Schierbaum, T.; Anacker, H.; Gausemeier, J.: Formalisierte Anforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

SCHILLER 2010

Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. Die wichtigsten Methoden. München: Oldenbourg-Industrieverl. 2010. ISBN: 978-3-8356-3210-3. (Atp kompakt, Nr. 1).

SCHMIDT 1993

Schmidt, M. F.: Cutting cubesvisualizing implicit surfaces by adaptive polygonization. The Visual Computer 10 (1993) 2, S. 101-115.

SCHNEIDER 1999

Schneider, B.: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile. München: Utz 1999. ISBN: 9783896755599. (Forschungsberichte IWB, Nr. 122).

SCHNIEDER 1999

Schnieder, E.: Methoden der Automatisierung. Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme ; mit 56 Tabellen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1999. ISBN: 978-3528065669. (Studium Technik).

SCHÖBERL 1997

Schöberl, J.: NETGEN An advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules. Computing and Visualization in Science 1 (1997) 1, S. 41-52.

SCHOCH 2011

Schoch, A.: Mechatronische Simulation automatisierter Anlagen des Automobilbaus. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching 2011. ISBN: 978-3-8316-4149-9.

SCHREIBER ET AL. 2011

Schreiber, S.; Jerenz, S. F.: Anforderungen an Steuerungskonzepte für moderne Fertigungsanlagen. In: Adolphs, P. et al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011. Düsseldorf: VDI-Verl 2011. ISBN: 978-3-18-092143-3.

SCHREIBER ET AL. 2012

Schreiber, W.; Zimmermann, P.: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt : Technologien und Anwendungen : mit CD-ROM. Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 3642206360.

SCHRÖN ET AL. 2000

Schrön, H.; Fux, R.: Die Technik der Tiefziehautomaten. In: Schulz, E. (Hrsg.): Aktuelle Trends in der Lebensmittel-Verpackungstechnologie "Vom Fließband in die Tüte" ; Beiträge im Rahmen des 6. Symposiums zur Lebensmitteltechnologie in Neubrandenburg. Neubrandenburg 2000, S. 131-141. ISBN: 3932227336.

SCHUBERT ET AL. 2008

Schubert, G.; Lenders, M.; Arnoscht, J.: Prozessgestaltung für die virtuelle Produktentwicklung. Konstruktion 8.

SCHUH ET AL. 2009

Schuh, G.; Lenders, M.; Maletz, L.; Uam, J.; Nussbaum, C.; Müller, J.; Schiffer, M.; Dombrowski, R. v.; Verkoyen, T.; Meuser, M.; Kamizuru, Y.: Integrative Entwicklung Fluidtechnisch-mechatronischer Systeme. Leitfaden. Aachen: 2009. ISBN: 978-3-926690-22-7.

SCHULMEISTER 2002

Schulmeister, R.: Taxonomie der Interaktivität von Multimedia – Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. 2002.

SCHULTMANN 2003

Schultmann, F.: Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement. Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme. Berlin: Erich Schmidt 2003. ISBN: 3503078037. (Technological economics, Nr. Bd. 58).

SCHWARZ 1991

Schwarz, H. R.: Methode der finiten Elemente. Eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung der Rechenpraxis. 3., neubearbeitete Auflage Aufl. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag 1991. ISBN: 978-3519223498. (Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik LAMM, Nr. 47).

SCHWENKER ET AL. 2012

Schwenker, B.; Raffel, T.: Megatrends. THOUGHTS - Roland Berger School of Strategy and Economics Juli 2012. <<http://www.rolandberger.com/media>>.

SCHWERTASSEK ET AL. 2014

Schwertassek, R.; Wallrapp, O.: Dynamik flexibler Mehrkörpersysteme. Methoden der Mechanik zum rechnergestützten Entwurf und zur Analyse mechatronischer Systeme. Aufl. 1999 Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Teubner 2014. ISBN: 978-3-322-93976-0. (Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften).

SEDCHAICHARN 2010

Sedchaicharn, K.: Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt. Dissertation. Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe 2010.

SEITZ ET AL. 2014

Seitz, J.; Schuldt, C.; Rauch, C.; Kirig, A.; Kelber, C.; Huber, T.: Mikrotrends 2014. Technologie Spezial. 1. Aufl Aufl. Frankfurt am Main: Zukunftsinstitut 2014. ISBN: 978-3-938284-83-4.

SELIG 2011

Selig, A.: Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten. Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten 180 (2011).

SENDER ET AL. 2013

Sendler, U.; Baum, G.; Borchering, H.; Broy, M.; Eigner, M.; Huber, A. S.; Kohler, H.; Rußwurm, S.; Stümpfle, Matthias; Sendler, Ulrich: Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Industrie 4.0. (2013).

SERVIN ET AL. 2011

Servin, M.; Lacoursière, C.; Nordfelth, F.; Bodin, K.: Hybrid, Multiresolution Wires with Massless Frictional Contacts. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on 17 (2011) 7, S. 970-982.

SIEDL 2008

Siedl, D. J.: Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen. München: Utz 2008. ISBN: 978-3831607792. (Forschungsberichte / IWB, Nr. Bd. 213).

SIMON 2012

Simon, H.: Hidden Champions - Aufbruch nach Globalia. Die Erfolgsstrategien unbekannter Weltmarktführer. Frankfurt am Main [u.a.]: Campus 2012. ISBN: 9783593397146. (Business 2012).

SOMIC 2015

Somic: Verpackungsmaschinen. <www.somic.de>.

SPATH ET AL. 2000

Spath, D.; Landwehr, R.: 3-D-Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. wt Werkstattstechnik online 90 (2000) 7/8, S. 292-296.

SPIEGELBERGER 2011

Spiegelberger, B.: Anwendergerechte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse für kleine und mittlere Unternehmen im Maschinenbau. 1 Aufl. Göttingen: Sierke 2011. ISBN: 3868443592.

SPITZWEG 2009

Spitzweg, M.: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen. München: Utz 2009. ISBN: 3831609314. (Forschungsberichte IWB, Nr. 233).

SPUR 1997

Spur, G.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. München: Hanser 1997. ISBN: 3446191763.

SPUR 2013

Spur, G.: Phasensprünge in der Produktionswirtschaft. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 7-8.

STACKPOLE 2011

Stackpole, B.: For Dassault, 3D Sketch Is a Natural.
<<http://www.designnews.com/>>.

STAHL ET AL. 2012

Stahl, T.; Völter, M.; Efftinge, S.; Haase, A.: Modellgetriebene Softwareentwicklung. Techniken, Engineering, Management. 1. Aufl. Aufl. s.l.: dpunkt.verlag 2012. ISBN: 3898644480.

STARK ET AL. 2014

Stark, R.; Königs, S. F. (Hrsg.): Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung. Stuttgart: Fraunhofer Verl 2014. ISBN: 978-3-8396-0652-0. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

STEINKE 2010

Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode. Rechnergestützte Einführung. 3., neu bearbeitete Auflage Aufl. Heidelberg [u.a.]: Springer 2010. ISBN: 9783642112041.

STERN 2012

Stern, O.: Probleme und Lösungsansätze bei der Modellerstellung zur Virtuellen Inbetriebnahme. Dresden 2012.

STETTER 1993

Stetter, R.: Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobotereinsatzes. Berlin, New York: Springer-Verlag 1993. ISBN: 3-540-56889-1. (IWB Forschungsberichte, Nr. 62).

STETTER 2006A

Stetter, R.: Simulationseinsätze und virtuelle Inbetriebnahme. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006.

STETTER 2006B

Stetter, R.: Wirtschaftlicher Nutzen durch simulierte Inbetriebnahme. Göppingen 2006.

STETTER 2010

Stetter, R.: Status Quo der mechatronischen Reife im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt am Main 2010.

STETTER 2011

Stetter, R.: Mechatronische Simulation kontinuierlicher Produktionssysteme. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching 2011. ISBN: 978-3-8316-4149-9.

STETTER 2012

Stetter, R.: Was müssen Engineering-Tools heute im Maschinen- und Anlagenbau leisten? In: Happacher, M. (Hrsg.): Benchmarkforum Intelligentes Engineering. München: Computer&AUTOMATION; ITQ 2012.

STETTER 2015

Stetter, R.: Voraussetzungen, um I4.0 zu überleben. 2015.

STETTER ET AL. 2010

Stetter, R.; Blum, T.: Mechatronik im Wandel begriffen. Economic Engineering 2.

STRAHILOV 2015

Strahilov, A.: Simulation des physikalischen Verhaltens bei der digitalen Absicherung von automatisierten Montageanlagen. neue Ausg Aufl. Berlin: VDE VERLAG 2015. ISBN: 978-3-8007-3889-2. (Forschungs-Report).

STRABBURGER ET AL. 2010

Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010. ISBN: 386644558X.

STRZEBKOWSKI 1995

Strzebowski, R.: Realisierung von Interaktivität und multimedialen Präsentationstechniken. In: Issing, L. J. et al. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Lehrbuch für Studium und Praxis. Weinheim: Beltz PVU 1995, S. 269-303. ISBN: 3-621-27449-9.

SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement. Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2006. ISBN: 978-3834902351.

TERZOPOULOS ET AL. 1987

Terzopoulos, D.; Platt, J.; Barr, A.; Fleischer, K.: Elastically Deformable Models. (Hrsg.): Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM 1987, S. 205-214. ISBN: 0-89791-227-6.

TIMMER ET AL. 2010

Timmer, W.; Lauscher, J.: Die Virtuelle Inbetriebnahme am Beispiel einer mechatronischen Produktionsanlage. Dortmund 2010.

TOMIZUKA 2002

Tomizuka, M.: Mechatronics: from the 20th to 21st century. Control Engineering Practice 10 (2002) 8, S. 877-886.

TRÄNKNER 1968

Tränkner, G. (Hrsg.): Taschenbuch Maschinenbau. Band 3/II Stoffumformung. Berlin: VEB Verlag Technik 1968.

TRANSMECHATRONIC 2010

TransMechatronic: Zuverlässigere Mechatronik – Forschungsergebnisse kompakt. Transfer von Forschungsergebnissen aus 11 Verbundprojekten zur Steigerung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Paderborn: 2010.

TSCHEUSCHNER 2004

Tscheuschner, H.-D.: Grundzüge der Lebensmitteltechnik. 3 Aufl. Hamburg: Behr 2004. ISBN: 978-3899470857.

ULRICH ET AL. 2008

Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D.: Concept Selection. Utah 2008.

UTHMANN 1991

Uthmann, T.: Entwicklungsmethodik für Wissensingenieure. Inst. für Informatik. Mainz 1991.

VAJNA ET AL. 2009

Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberger, P.; Weber, C.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. CAx für Ingenieure (2009).

VAN DER BERGEN 2004

van der Bergen, G.: Collision detection in interactive 3D environments. Amsterdam [etc.]: Elsevier, Morgan Kaufmann Publishers 2004. ISBN: 9781558608016.

VAN GELDER 1998

van Gelder, A.: Approximate Simulation of Elastic Membranes by Triangulated Spring Meshes. J. Graph. Tools 3 (1998) 2, S. 21-42.

VDE 2005

VDE: VDE-Ingenieurstudie 2005 - Elektrotechnik/Informationstechnik. Frankfurt: 2005.

VDI 2411

VDI . VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Düsseldorf: VDI-Verl 1970-06.

VDI 2222-Blatt 2

VDI . VDI 2222-Blatt 2: Konstruktionsmethodik - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen: 1982-02.

VDI 2235

VDI . VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen. Berlin: Beuth Verlag 1987-10.

VDI 2860

VDI . VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag 1990-05.

VDI 2221

VDI . VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag 1993-05.

VDI 3633-Blatt 1

VDI . VDI 3633-Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1993-12.

VDI 3633-Blatt 4

VDI . VDI 3633-Blatt 4: Auswahl von Simulationswerkzeugen - Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien. Berlin: Beuth Verlag GmbH 1997.

VDI 2222-Blatt 1

VDI . VDI 2222-Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth Verlag 1997-06.

VDI 3633-Blatt 3

VDI . VDI 3633-Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Experimentenplanung- und Auswertung. Berlin: Beuth Verlag 10 - 1997.

VDI 3633-Blatt 2

VDI . VDI 3633-Blatt 2: Lastenheft/Pflichtenheft und Leistungsbeschreibung für die Simulationsstudie. Berlin: Beuth Verlag 1997-12.

VDI 2219

VDI . VDI 2219: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Berlin: Beuth Verlag 2002-11.

VDI 2249

VDI . VDI 2249: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - CAD-Benutzungsfunktionen. Berlin: Beuth Verlag 2003-09.

VDI 2206

VDI . VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2004-06.

VDI 2884

VDI . VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth Verlag 2005-12.

VDI 3633-Blatt 8

VDI . VDI 3633-Blatt 8: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Maschinennahe Simulation. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2007.

VDI 4499-Blatt 1

VDI . VDI 4499-Blatt 1: Digitale Fabrik - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2008.

VDI 3633-Blatt 11

VDI . VDI 3633-Blatt 11: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Simulation und Visualisierung. Berlin: Beuth Verlag 2009-10.

VDI 4499-Blatt 2

VDI . VDI 4499-Blatt 2: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2011.

VDI 5200-Blatt 1

VDI . VDI 5200-Blatt 1: Fabrikplanung - Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag 2011-02.

VDI 3633-Blatt 1

VDI . VDI 3633-Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2014-12.

VDI/VDE 2422

VDI/VDE . VDI/VDE 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Berlin: Beuth Verlag 1994-02.

VDI/VDE 3681

VDI/VDE . VDI/VDE 3681: Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik. Berlin: Beuth Verlag 2005-10.

VDI/VDE 3695-Blatt 1

VDI/VDE . VDI/VDE 3695-Blatt 1: Engineering von Anlagen: Evaluieren und optimieren des Engineerings - Grundlagen und Vorgehensweise. Berlin: Beuth Verlag 2010.

VDI/VDE 3695-Blatt 2

VDI/VDE . VDI/VDE 3695-Blatt 2: Engineering von Anlagen: Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Prozesse. Berlin: 2010.

VDI/VDE 3695-Blatt 3

VDI/VDE . VDI/VDE 3695-Blatt 3: Engineering von Anlagen: Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Methoden. Berlin: Beuth Verlag 2010.

VDI/VDE 3695-Blatt 4

VDI/VDE . VDI/VDE 3695-Blatt 4: Engineering von Anlagen: Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Hilfsmittel. Berlin: Beuth Verlag 2010.

VDI/VDE 3690-Blatt 1

VDI/VDE . VDI/VDE 3690-Blatt 1: XML in der Automation - Klassifikation ausgewählter Anwendungen. Berlin: Beuth Verlag 2013-03.

VDI/VDE 3694

VDI/VDE . VDI/VDE 3694: Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen (Entwurf). Berlin: Beuth Verlag 2013-06.

VDI/VDE 3695-Blatt 5

VDI/VDE . VDI/VDE 3695-Blatt 5: Engineering von Anlagen: Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Aufbauorganisation. Düsseldorf: Beuth Verlag 2014-11.

VDMA 2000

VDMA: Vorlage Systemspezifikation aus der Reihe Methoden und Verfahren. [Arbeitsergebnis der Projektgruppe "Methoden & Verfahren" des Fachverbandes Software im VDMA]. Frankfurt/Main: VDMA-Verl. 2000. ISBN: 3-8163-0410-9.

VDMA-EINHEITSBLATT 34180

VDMA . VDMA-EINHEITSBLATT 34180: Datenschnittstelle für automatisierte Fertigungssysteme. Berlin: Beuth Verlag 2001-07.

VDMA 2006

VDMA: Leitfaden Softwarequalitätssicherung. Frankfurt am Main: VDMA-Verl 2006. ISBN: 978-3-8163-0521-7. (Software).

VDMA 2010

VDMA: Entwicklungsanteile mechatronischer Systeme, Zukunftsprognose von ITQ auf Basis von Marktdaten. 2010.

VDMA 2014

VDMA: Marktstudie SPS-Systeme. Ergebnisse einer bundesweiten Befragung von Unternehmen aus den Bereichen Ergebnisse einer bundesweiten Befragung von Unternehmen aus den Bereichen Maschinenbau und Ingenieurbüros. Frankfurt/Main: VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer 2014.

VDMA 2015

VDMA (Hrsg.): MEPROMA. Anforderungen und Methoden im mechatronischen Engineering : Leitfaden für Anwender im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt am Main: VDMA 2015. ISBN: 3816306780.

VERL ET AL. 2009

Verl, A.; Haubelt, A.: Der Weg zur automatischen Generierung von Simulationsmodellen aus mechatronischen Baukästen. In: Brecher, C. et al. (Hrsg.): Effiziente Methodiken und durchgängige Werkzeuge zur Modellerstellung digitaler Produktionseinrichtungen. [Treffen der Hochschulinstitute IPK Berlin, ISW Stuttgart und dem WZL der RWTH Aachen ; Aachen 2008]. Düsseldorf: VDI-Verl. 2009, S. 55-70. ISBN: 9783183671021.

VERL ET AL. 2010

Verl, A.; Müller, V.; Haubelt, A.: Baukastenbasiertes simulationsgestütztes Engineering. A&D-Kompodium 2009/2010.

VOGL 2009

Vogl, W.: Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern. Techn. Univ., Diss.--München, 2008. München: Utz 2009. ISBN: 978-3-8316-0869-0. (Forschungsberichte IWB, Nr. 228).

VOIGT 2004

Voigt, T.: Neue Methoden für den Einsatz der Informationstechnologie bei Getränkeabfüllanlagen. Düsseldorf: VDI 2004. ISBN: 978-3-18-311814-4. (Fortschritt-Berichte VDI andmaschinen. Landtechnik, Nr. Nr. 118).

VÖLKER ET AL. 2010

Völker, S.; Schmidt, P.-M.: Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistiksystemen mit Tecnomatix Plant Simulation. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010, S. 93-100. ISBN: 386644558X.

VOLKWEIN 2007

Volkwein, G.: Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation. München: Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0668-9. (Forschungsberichte IWB, Nr. 202).

VÖLLINGER 2011

Völlinger, U.: Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2011. ISBN: 3839602734. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

VOß 2012

Voß, V.: Wiederverwendbare Simulationsmodelle für die domänen- und disziplinübergreifende Produktentwicklung. Heimsheim: Jost-Jetter 2012. ISBN: 3939890987. (ISW/IPA Forschung und Praxis, Nr. 192).

WABNER ET AL. 2014

Wabner, M.; Frieß, U.; Hofmann, S.; Hellmich, A.; Quellmalz, J.: Optimierte Inbetriebnahme durch Simulation. wt Werkstattstechnik online 1/2.

WACHSMUTH 2011

Wachsmuth, I.: Wissensbasierte Methoden für Intelligente Virtuelle Realität. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme 2011.

WAGNER ET AL. 2008

Wagner, S.; Broy, M.; Deissenboeck, F.; Kläs, M.; Liggesmeyer, P.; Münch, J.; Streit, J.: Eine Forschungsagenda für Softwarequalität. (Hrsg.): Workshop-Band Software-Qualitätsmodellierung und -bewertung. Technische Universität München 2008, S. 47-59.

WALTHER 2001

Walther, C.: Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen grosser Systeme. Methoden zur Darstellung von Änderungswirkungen. München: Utz, Wiss. 2001. ISBN: 978-3-89675-816-3. (Systems engineering).

WANG ET AL. 2007

Wang, Z.; Lehmann, A.: A Framework for Verification and Validation of Simulation Models and Applications. In: Park, J.-W. et al. (Hrsg.): AsiaSim 2007. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 237-246. ISBN: 978-3-540-77599-7.

WANNENWETSCH ET AL. 2007

Wannenwetsch, H.; Comperl, P.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion ; mit 158 Tabellen und zahlreichen Fallbeispielen. 3., aktualisierte Aufl. Berlin [u.a.]: Springer 2007. ISBN: 978-3540297567. (VDI-Buch).

WEGENER 2009

Wegener, F.: Mit Simulieren sparen. IEE 09-2009.

WEGMANN 2010

Wegmann, D.: Methoden der Mechatronischen Modularisierung. In: Infoteam Software (Hrsg.): Automation Day. Nürnberg 2010.

WEILKIENS 2008

Weilkiens, T.: Systems engineering with SysML/UML. Modeling, analysis, design. Burlington, Mass: Morgan Kaufmann 2008. ISBN: 0123742749. (The OMG press).

WEILKIENS 2011

Weilkiens, T.: Zukunftsdisziplin Modellbasiertes Systems Engineering. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme 2011.

WEIB ET AL. 2011

Weiß, M.; Hennig, J.; Krug, W.: Simulative Optimierung von Verpackungsanlagen. In: März, L. et al. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 185-193. ISBN: 978-3-642-14535-3.

WEISSTEIN 2014

Weisstein, E.: Folium of Descartes.
<<http://mathworld.wolfram.com/FoliumofDescartes.html>>.

WELGE ET AL. 2012

Welge, M.; Friedrich, C.; Shair, A.: Integration von agilen Methoden in der Systementwicklung. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Zusammenhänge erkennen und gestalten; Paderborn 7. - 9. November 2012. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-43435-6.

WENZEL 2010

Wenzel, S.: VDI-Richtlinien zur Modellbildung und Simulation. In: Zülch, G. et al. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010, S. 549-550. ISBN: 386644558X.

WENZEL ET AL. 2008

Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M.:
Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und
Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
Berlin Heidelberg 2008. ISBN: 978-3-540-35272-3. (VDI-Buch).

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. 1 Aufl.
Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-26039-4. (Springer-Lehrbuch).

WETTER 2015

Wetter, A.: Handskizze. <www.wetter-grafik.ch>.

WEYRICH ET AL. 2011

Weyrich, M.; Steden, F.: Prozessintegration von Maschinensimulation zur
Steuerungsprogrammentwicklung bei Maschinenherstellern. In: Adolphs, P. et
al. (Hrsg.): Automation 2011. Der 12. Branchentreff der Mess- und
Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011.
Düsseldorf: VDI-Verl 2011, S. 339-342. ISBN: 978-3-18-092143-3.

WHITAKER ET AL. 1981

Whitaker, H.; Halas, J.: Timing for animation. 1st ed Aufl. London, New
York: Focal Press 1981. ISBN: 0-240-51714-8.

WIENDAHL ET AL. 2002

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste
Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 11/12.
<[http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data\[article_id\]=528](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=528).
Management, Produktionsmanagement.

WIENDAHL ET AL. 2009

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung.
Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten.
München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-22477-3.

WIENSS 2008

Wiens, C.: Simulation von Kabeln und Schläuchen. Anforderungen und
Einflüsse. Dissertation. Universität Koblenz Landau: 2008.

WIESINGER 2010

Wiesinger, G. F.: Prozessorientierte Konstruktionsmethode für Industrieparks
der Automobilindustrie. Dissertation. Lehrstuhl für Fabrikorganisation, Techn.
Univ. Dortmund 2010.

WILDEMANN 2010

Wildemann, H.: Distributionslogistik. Leitfaden zur Erzeugung von exzellenten Logistikleistungen am Point of Sales. 14 Aufl. München: TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologiemanagement 2010. ISBN: 3-931511-09-X. (Leitfaden / TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management, Nr. 37).

WILKE 2006

Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation, Technische Universität München 2006.

WILSON ET AL. 1994

Wilson, R. H.; Latombe, J.-C.: Geometric Reasoning about Mechanical Assembly. Artificial Intelligence 71 (1994), S. 371-396.

WINKES ET AL. 2013

Winkes, P.; Aurich, J.: Physik-Engine unterstützte, interaktive Montagesimulation in der Virtuellen Realität. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn, April 2013 2013.

WINTERSTEIGER 2015

Wintersteiger, A.: Scrum. Schnelleinstieg. 3 Aufl: entwickler.press 2015. ISBN: 978-3868021547.

WIRTSCHAFTSZITATE 2016

Wirtschaftszitate: Wirtschaftszitate. <www.wirtschaftszitate.de>.

WISCHNEWSKI 2007

Wischnewski, R.: Virtuelle Inbetriebnahme - 3D-Simulationsmodelle unterstützen Planung und Anlauf von Produktionsanlagen. Automation & Drives 10 (2007/2008) Kompendium, S. 64-66.

WISCHNEWSKI 2007

Wischnewski, R.: Transportsysteme mit Spurführung in der virtuellen Produktion. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2007. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 2007. ISBN: 9783183410200. (Fortschritt-Berichte VDIReihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 410).

WITSCH ET AL. 2010

Witsch, D.; Schünemann, U.: UML zur technologieorientierten Spezifikation von Steuerungssoftware. In: Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. Die wichtigsten Methoden. München: Oldenbourg-Industrieverl. 2010, S. 56-62. ISBN: 978-3-8356-3210-3.

WITTEL ET AL. 2009

Wittel, H.; Jannasch, D.; Muhs, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung ; mit 75 vollständig durchgerechneten Beispielen und einem Tabellenbuch mit 282 Tabellen/ von Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek. 19 Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009. ISBN: 3834899984.

WÖRN ET AL. 2005

Wörn, H.; Brinkschulte, U.: Echtzeitsysteme. Berlin [u.a.]: Springer 2005. ISBN: 3-540-20588-8. (eXamen.press).

WÖßNER 2009

Wößner, J.: Seite 1 Ist die Montage biegeschlaffer Teile prozesssicher automatisierbar. Stuttgart 2009.

WÜNSCH 2008

Wünsch, G.: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Techn. Univ., Diss.--München, 2007. München: Utz 2008. ISBN: 9783831607952. (Forschungsberichte / IWB, Nr. 215).

WÜNSCH 2010

Wünsch, G.: Testen Testen Testen. In. : Mechatronik & Engineering 5/2010 5.

WÜNSCH 2011

Wünsch, G.: Effiziente mechatronische Modellbildung für die Automatisierungstechnik. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung. Garching 2011. ISBN: 978-3-8316-4149-9.

WÜNSCH 2012

Wünsch, G.: Physiksimulation für die Automation. In: Mantwill, F. (Hrsg.): Digitale Fabrik@Produktion. Regensburg, 6./7.11.2012: Süddeutsche Zeitung 2012.

WÜNSCH 2014

Wünsch, G.: Virtual commissioning of production plants for semi-finished products. *EconomicPlant* 3.

WÜNSCH ET AL. 2005

Wünsch, G.; Zäh, M. F.: *A New Method for Fast Plant Start-Up*. München: Utz 2005. ISBN: 3-8316-0540-8.

WÜRSLIN ET AL. 2008

Würslin, R.; Wascher, F.: *Mechatronischer Baukasten: Vorgehensmodell und Modellierungsmethodik für ein mechatronisches Entwicklungswerkzeug*. (Hrsg.): *Kompetenznetzwerk Mechatronik BW e.V.* (Hrsg.): *Internationales Forum Mechatronik*. Stuttgart 2008, S. 330-343.

XU 2003

Xu, L.: *Wiederverwendbare Modelle zur Maschinensimulation für den Steuerungstest*. München: Utz, Wiss. 2003. ISBN: 978-3-8316-0281-0. (*Informationstechnik im Maschinenwesen*, Nr. [21]).

YI-LUEN DO 2005

Yi-Luen Do, E.: *Design Sketches and Sketch Design Tools*. *Know.-Based Syst.* 18 (2005) 8, S. 383-405.

YOON ET AL. 2010

Yoon, S. M.; Scherer, M.; Schreck, T.; Kuijper, A.: *Sketch-based 3D Model Retrieval Using Diffusion Tensor Fields of Suggestive Contours*. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Multimedia*. New York, NY, USA: ACM 2010, S. 193-200. ISBN: 978-1-60558-933-6.

ZÄH ET AL. 2004A

Zäh, M. F.; Ehrenstraßer, M.; Pörnbacher, C.; Wünsch, G.: *Simulation von Maschinenabläufen an virtuellen Werkzeugmaschinen*. Frankfurt am Main: *Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V.* 2004a.

ZÄH ET AL. 2004B

Zäh, M. F.; Munzert, U.; Wünsch G.: *Simulation von Montageanlagen in der Automobilindustrie - Hardware-in-the-Loop-Technologie für den Virtual Ramp Up*. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 1/2/2004 (2004b).

ZÄH ET AL. 2004C

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Wunsch, G.; Munzert, U.: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus. München: Utz 2004c. ISBN: 3-89675-074-7.

ZÄH ET AL. 2004D

Zäh, M. F.; Menzel, T.; Wunsch, G.: Virtuelle Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen - Qualitätssicherung von Steuerungssoftware. Augsburg: 2004d.

ZÄH ET AL. 2004E

Zäh, M. F.; Menzel, T.; Wunsch, G.; Pörnbacher, C.: Virtuelle Inbetriebnahme von Werkzeugmaschinen - Qualitätssicherung von Steuerungssoftware. Augsburg: 2004e.

ZÄH ET AL. 2004F

Zäh, M. F.; Petzold, B.; Spitzweg, M.; Egermeier, H.: Realitätsnahe Einbausimulation mit Ve. wt Werkstattstechnik online 94 (2004f) 9, S. 410-413.

ZÄH ET AL. 2004B

Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Virtuelle Produktionssystem-Planung : Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. Seminarberichte IWB ; 74. München: Utz 2004b.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Wunsch, G.: Schnelle Inbetriebnahme von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 09.

ZÄH ET AL. 2006A

Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A.: Feldstudie Virtuelle Inbetriebnahme. wt Werkstattstechnik online 96 (2006a) 10, S. 767-771.

ZÄH ET AL. 2006B

Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A.: Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein Experiment. ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006b) 10, S. 595-599.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht? München: Utz 2006. (iwb Seminarberichte, Nr. 84).

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M. F.; Lindworsky, A.; Wunsch, G.; Hensel, T.: Mechatronische Standards in der Maschinenentwicklung - Frühzeitige Inbetriebnahme durch Systematik und konsistente Entwicklungsdaten. *Industrie Management* 23 (2007) 3.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M. F.; Botaschanjan, J.; Hensel, T.; Hummel, B.; Lindworsky, A.: Automatische Generierung von Verhaltensmodellen aus CAD-Daten für die qualitätsorientierte Virtuelle Inbetriebnahme. *ATZproduktion* 2 (2009) 06, S. 18-22.

ZELEZNIK ET AL. 1996

Zeleznik, R. C.; Herndon, K. P.; Hughes, J. F.: SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM 1996, S. 163-170. ISBN: 0-89791-746-4.

ZITATE-ONLINE 2016

Zitate-Online, O.: Zitate - Sprüche - Wissenschaftler. <www.zitate-online.de>.

ZÜLCH ET AL. 2010

Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010 = *Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ 2010. ISBN: 386644558X. (ASIM-Mitteilung, Nr. 131).