

**Forschungsbericht
Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme**

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Valentin Stegmaier

**Automatisierte Erstellung von
Verhaltensmodellen für Digitale
Zwillinge: Neue Ansätze und
Modelle am Beispiel der
Vakuum-Handhabungstechnik**

Band 1/2025

Universität Stuttgart

Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Digitale Zwillinge: Neue Ansätze und Modelle am Beispiel der Vakuum-Handhabungstechnik

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Valentin Andreas Stegmaier
aus Wendlingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler

Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 2024

Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme
der Universität Stuttgart

2024

IAS-Forschungsberichte

Band 1/2025

Valentin Stegmaier

**Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen
für Digitale Zwillinge: Neue Ansätze und Modelle
am Beispiel der Vakuum-Handhabungstechnik**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2025

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8440-9767-2
PDF-ISBN	978-3-8440-9862-4
ISSN	1610-4781
eISSN	2944-8417

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in Kooperation mit dem Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart und der J. Schmalz GmbH.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich, für die Übernahme des Hauptberichts, die vielen fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, die Übernahme des Mitberichts und die Mitarbeit im Thesis-Committee sowie für die interessanten und fruchtbaren fachlichen Anregungen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Nasser Jazdi für seine kontinuierliche und wertvolle Unterstützung während der Arbeit, für die gemeinsamen Veröffentlichungen und die weisen Ratschläge. Mein herzlicher Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen am IAS für die gute Zusammenarbeit und die vielen guten und konstruktiven Gespräche. Ein ebenfalls gebührender Dank gilt den Studierenden, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Ich danke Herrn Dr. Kurt Schmalz für die Möglichkeit, diese Arbeit in seinem Unternehmen zu verfassen. Mein Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen bei der J. Schmalz GmbH für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich Herrn Dr.-Ing. Walter Schaaf für die stetige und zielführende Diskussionsbereitschaft, die vielen Anregungen, die wertvolle Unterstützung und die intensiven Fachgespräche, die diese Promotion erst möglich gemacht haben. Herrn Dr.-Ing. Harald Kuolt danke ich für die organisatorische Unterstützung, die Durchsicht der Arbeit und die hilfreichen Rückmeldungen. Weiterer Dank gilt M.Sc. Tobias Eberhardt und M.Eng. Jan Gauß für die stete Bereitschaft zu konstruktiven Diskussionen über das Thema meiner Dissertation, die Durchsicht der Arbeit und die wertvollen Rückmeldungen.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Judith und Thomas, danke ich für ihre kontinuierliche Förderung und Unterstützung, die die Voraussetzung für meinen Werdegang waren. Ein besonderer Dank gilt zudem meiner Freundin Daniela, für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr geduldiges Verständnis. Ihre Liebe und Vertrauen haben mir die Kraft und Ausdauer gegeben, diese Arbeit fertigzustellen.

Stuttgart, im Dezember 2024

Valentin Stegmaier

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis	X
Zusammenfassung	XII
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Der Digitale Zwilling und seine Mehrwerte in der Automatisierungstechnik	1
1.2 Problemstellung und Abgrenzung	2
1.3 Herausforderungen	3
1.4 Anforderungen	4
1.5 Zielsetzung	5
1.6 Wissenschaftliche Vorgehensweise	5
1.7 Aufbau der Arbeit	6
2 Ausgangssituation	8
2.1 Grundlagen	8
2.1.1 Digitale Zwillinge und deren Bestandteile	8
2.1.2 Vakuum-Handhabungstechnik	9
2.2 Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.2.1 Domänenübergreifender Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.2.2 Domänenspezifischer Stand der Wissenschaft und Technik	15
2.3 Analyse der Randbedingungen	17
2.3.1 Einordnung von Komponentenherstellern in die industrielle Wertschöpfungskette	18
2.3.2 Anlagenlebenszyklus	20
2.3.3 Relevante Standards für Digitale Zwillinge	20
2.3.4 Verhaltensmodelle in Automatisierungssystemen	21
2.3.5 Grundlegende Ansätze zur Erstellung von Verhaltensmodellen	23
2.3.6 Systemmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen	26
2.3.7 Grundbausteine unterschiedlicher Detaillierung	27
2.3.8 Schaltpläne als Quelle von Primärinformationen	27
2.3.9 Ansätze zur Digitalisierung von Schaltplänen	30
2.3.10 Typischer Handhabungszyklus einer Automatisierungskomponente	32
2.3.11 Abstraktion der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen	34
2.4 Schlussfolgerungen und Aufzeigen einer Forschungslücke	34

3	Konzept zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen	37
3.1	Grundlegende Konzeptentscheidungen	37
3.2	Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme.....	38
3.3	Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe	43
3.4	Assistierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek	46
3.4.1	Graph aus Expertenwissen.....	49
3.4.2	Graph aus Informationsquelle mit passender Schnittstelle.....	49
3.4.3	Graph aus Informationsquelle ohne passende Schnittstelle.....	50
4	Entwicklung von domänenspezifischen Verhaltensmodellen	55
4.1	Modellbildung und Evaluierung für Vakuumerzeuger.....	55
4.2	Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer.....	61
5	Realisierung des Konzepts mithilfe eines Assistenzsystems	71
5.1	Automatisierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek	71
5.1.1	Nicht strukturierte Informationsquelle.....	71
5.1.2	Strukturierte Informationsquelle mit passender Schnittstelle.....	71
5.1.3	Strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle.....	72
5.1.4	Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus dem Graph.....	75
5.2	Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen.....	77
5.3	Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe	79
5.4	Benutzeroberfläche.....	82
6	Evaluierung.....	84
6.1	Aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek.....	84
6.1.1	Strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle.....	84
6.1.2	Weitere Informationsquellen	91
6.1.3	Verhaltensmodell des pneumatischen Vakuumerzeugers.....	91
6.2	Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen.....	92
6.2.1	Evaluierungsfall 1: Vakuum-Greifsystem für den automobilen Karosserierohbau	92
6.2.2	Evaluierungsfall 2: Be- und Entladeeinheit einer Laserschneidmaschine	101
6.3	Experten-Benchmark	107
6.3.1	Versuchsdurchführung	107
6.3.2	Ergebnisse	110
6.4	Abgleich mit Anforderungen und Zielsetzungen der Arbeit	116
6.5	Fazit und abschließende Diskussion.....	118
7	Schlussbetrachtung	120
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	120
7.2	Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten	121
	Literaturverzeichnis.....	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Der Digitale Zwilling und seine Eigenschaften angelehnt an [86] (links) sowie eine mögliche Architektur des Digitalen Zwillings angelehnt an [86] (rechts)	8
Abbildung 2:	Vakuum-Greifsystem und dessen Komponenten (Bildquelle: [98])	10
Abbildung 3:	Volumenstrom über Vakuum unterschiedlicher Vakuumerzeuger (links) und 3D-Datenkennfeld eines pneumatischen Vakuumerzeugers (rechts)	12
Abbildung 4:	Einordnung von Unternehmensgruppen der industriellen Wertschöpfungskette anhand der klassischen Automatisierungspyramide angelehnt an [44]	18
Abbildung 5:	Generische (oben) und detailliertere (unten) Phasen des Anlagenlebenszyklus angelehnt an [131]	20
Abbildung 6:	Strukturierung von Verhaltensmodellen angelehnt an [69]	23
Abbildung 7:	Einordnung von Komponenten, Systemen und deren Bestandteile über dem Modellierungsumfang	24
Abbildung 8:	Versuchsaufbau mit zwei Varianten für ein identisches Systemvolumen	26
Abbildung 9:	Grundbaustein eines 3/2-Wegeventils in vereinfachter (links) und detaillierter (rechts) Ausführung für Modellierungstiefe 4	27
Abbildung 10:	Mögliche Symbole für unterschiedliche Ausprägungen eines Bausteins am Beispiel eines 2/2-Wegeventils	28
Abbildung 11:	Zwei Optionen für die Beschriftung der Symbole am Beispiel eines 2/2-Wegeventils	28
Abbildung 12:	Acht mögliche Ausrichtungen eines Symbols am Beispiel eines 2/2-Wegeventils	29
Abbildung 13:	Phasen eines typischen Handhabungsprozesses eines Vakuum-Greifsystems angelehnt an [94]	32
Abbildung 14:	Typischer Vakuumverlauf mit gängigen Kenngrößen	33
Abbildung 15:	Makroskopische Verortung des Konzepts in der industriellen Wertschöpfungskette	37
Abbildung 16:	Konzept zur automatisierten Erstellung Digitaler Zwillinge	38
Abbildung 17:	Aufbau eines Graphen zur Beschreibung der Anforderungen an ein zu erstellendes Verhaltensmodell	40
Abbildung 18:	Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen	41
Abbildung 19:	Zwei mögliche Varianten zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen in unterschiedlicher Modellierungstiefe	42
Abbildung 20:	Struktur der Zustandsmaschinen für die unterschiedlichen Modellierungstiefen	44
Abbildung 21:	Methode für die Extraktion der Informationen zur automatisierten Abstraktion der Modellierungstiefe	45
Abbildung 22:	Einordnung der Verhaltensmodellbibliothek und der Bibliothek für Grundbausteine über dem Modellierungsumfang (Bilderquellen: [98, 184–186])	47
Abbildung 23:	Konzept zur aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek (Bildquelle: [98])	49
Abbildung 24:	Transformation des Informationsmodells aus Stückliste und Netzliste in Knoten und Kanten eines Graphen	50
Abbildung 25:	Vorgehen zur Extraktion von Informationen aus Quellen ohne passende Schnittstellen	51
Abbildung 26:	Ablauf zur Erkennung von Symbolen in Schaltplänen	51

Abbildung 27: Ablauf zur Detektion der Verbindung zwischen zwei erkannten Symbolen in einem Schaltplan.....	52
Abbildung 28: Beschriftung von beispielhaften Bausteinen	53
Abbildung 29: Funktionsstruktur für das Verhaltensmodell eines Vakuumerzeugers	56
Abbildung 30: Funktionsstruktur für das Verhaltensmodell eines Vakuumerzeugers mit zusätzlichen Einflussgrößen	56
Abbildung 31: Modellbildung einer Venturidüse (rechts) und daraus erstellter Grundbaustein (links)	57
Abbildung 32: Versuchsaufbau (oben) und Verhaltensmodell (unten) zur Evaluierung des Vakuumerzeuger-Verhaltensmodells am Beispiel eines SCPSi 10 (Bilderquelle: [98])	59
Abbildung 33: Vakuum über Zeit für Messung, Simulation und Ansätze aus dem Stand der Technik am Beispiel eines SCPSi 10	59
Abbildung 34: Zeit über Vakuum für verschiedene Vakuumerzeuger - Messung (links), Simulation (mittig) und absolute Abweichung (rechts).....	61
Abbildung 35: Ausgangsmodell des Vakuumsauggreifers (links) und Ausschnitt des CAD-Modells für die FEM-Simulation (rechts)	63
Abbildung 36: Ausschnitt der FEM-Simulation des Vakuumsauggreifers bei einer Hubhöhen-Komprimierung von 0 mm (links), 7,2 mm (mittig) und 14,28 mm (rechts).....	63
Abbildung 37: Inneres Volumen der unterschiedlichen Vakuumsauggreifer über die Hubhöhen-Komprimierung (oben) sowie deren prozentuale Abweichung zu einer linearen Funktion als Annäherung (unten)	64
Abbildung 38: Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie eines SAB 60 Vakuumsauggreifers	65
Abbildung 39: Funktionsstruktur für Vakuumsauggreifer	65
Abbildung 40: Modellbildung für Vakuumsauggreifer (rechts) und daraus erstellter Grundbaustein (links)	66
Abbildung 41: Versuchsaufbau (links) und Verhaltensmodell (rechts) zur Evaluierung des Vakuumsauggreifer Grundbausteins am Beispiel eines SAB 60 (Bilderquelle: [98])	68
Abbildung 42: Vakuum über Zeit für Messung und Simulation am Beispiel eines SAB 60	68
Abbildung 43: Zeit über Vakuum für verschiedene Vakuumsauggreifer - Messung (links), Simulation (mittig) und absolute Abweichung (rechts).....	70
Abbildung 44: Beispielhafter Schaltplan (links) und die erkannten und lokalisierten Symbole unter Verwendung des FASTER R-CNN mit dem trainierten Netz (rechts) (Bildquelle: [193])	73
Abbildung 45: Originaler (links), ausgeschnittener (mittig-links), morphologisch geschlossener (mittig-rechts) und invertierter (rechts) Schaltplan (Bildquelle: [193])	73
Abbildung 46: Normale Verbindung (links), keine Verbindung (mittig) und Verbindung durch Überlappung (rechts), dargestellt für zwei beispielhafte Symbole.....	74
Abbildung 47: Beschriftetes Referenzsymbol (links), entsprechend der Ausrichtung des Symbols im Schaltplan angepasstes Symbol (mittig) und Erkennung der Anschlussbezeichnungen (rechts) (Bildquelle: [147]).....	74
Abbildung 48: Beispielhafte Erstellung eines Verhaltensmodells für die Verhaltensmodellbibliothek am Beispiel eines SCPSi 10 (Bildquelle: [205])	75
Abbildung 49: Beispielhafte Darstellung eines Grundbausteins (mittig), der darunter liegenden physikalischen Grundprinzipien (links) und der Parametermaske (rechts)	76

Abbildung 50: Erstellung eines Graphen aus einer Tabelle.....	78
Abbildung 51: Teilschritte zur Erstellung des Verhaltensmodells eines Systems (Bilderquelle: [98])	78
Abbildung 52: Beispielhafter Verlauf von Eingangssignalen (oben) und Ausgangssignalen (mittig sowie unten) zur Detektion von Zuständen und Übergängen.....	80
Abbildung 53: Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 (oben), 2 (mittig) und 3 (unten) des Verhaltensmodells aus Abbildung 51	82
Abbildung 54: Benutzeroberfläche zur Bedienung des Assistenzsystems	83
Abbildung 55: Beispielhafte Schaltpläne aus dem Testdatensatz (Bilderquellen: [193, 208–210]).....	85
Abbildung 56: Konfusionsmatrix ohne überlappende Symbole der gleichen Kategorie	85
Abbildung 57: Wert für „F1“ verschiedener Schwellenwerte für die Erkennung von Überschneidungen und die Entfernung von Dopplungen.....	86
Abbildung 58: Specification, Accuracy, Precision und Recall für verschiedene Schwellenwerte für die Erkennung von Überschneidungen und die Entfernung von Dopplungen.....	87
Abbildung 59: Schaltplan der Nummer 8 aus verschiedenen Quellen (Bildquelle: [213]) ...	89
Abbildung 60: Anzahl der Symbole im Trainings- und Testdatensatz für die verschiedenen Klassen.....	90
Abbildung 61: Ein- und Ausgangssignale des automatisierten Verhaltensmodell aus der Bibliothek im Vergleich mit gemessenen Verläufen.....	92
Abbildung 62: Beispielhaftes Vakuum-Greifsystem im Automobil-Karosserierohbau (Bildquelle: [98])	93
Abbildung 63: Ausprägung der drei Konfigurationen für Evaluierungsfall 1	93
Abbildung 64: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 1a.....	94
Abbildung 65: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 1b (links) und 1c (rechts)	95
Abbildung 66: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Signal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben)	96
Abbildung 67: Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für das Verhaltensmodell der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 1a	97
Abbildung 68: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Ausgangssignal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 1b (links) und 1c (rechts)	98
Abbildung 69: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Vakuum in Vakuumsauggreifer 1 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 1c	99
Abbildung 70: Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für das Verhaltensmodell der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 1b und 1c	99
Abbildung 71: Be- und Entladeeinheit mit Peripherie zur Vermessung.....	101
Abbildung 72: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 2a mit Vakuumverlauf (oben) und Ausgangssignal des PDI Byte 5 (unten).....	102

Abbildung 73:	Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Signal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 2a	104
Abbildung 74:	Schematische Darstellung des Aufbaus für Evaluierungsfall 2b.....	104
Abbildung 75:	Signalverläufe der unterschiedlichen Modellierungstiefen für die Achsen 1 (links) und 2 (rechts).....	105
Abbildung 76:	Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 2a und 2b	106
Abbildung 77:	Systemplan von Versuch 1a für die Experten-Benchmarks	108
Abbildung 78:	Detaillierter Vergleich der Zeiten von Experten und AutoBMC Methode für Evaluierungsfall 1a	111
Abbildung 79:	Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung der Modelle der Evaluierungsfälle 1a (links), 1b (mittig) und 1c (rechts).....	112
Abbildung 80:	Zeiten von AutoBMC Methode und Experten für die Anpassung von vier (links) und 16 (rechts) Parametern	113
Abbildung 81:	Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung eines Systemmodells mit (links) und ohne (rechts) Verhaltensmodellbibliothek .	114
Abbildung 82:	Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung der Evaluierungsfälle 2a (links) und 2b (rechts).....	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen und zur Abstraktion der Modellierungstiefe.....	15
Tabelle 2:	Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze für Komponenten von Vakuum-Greifsystemen.....	17
Tabelle 3:	Möglichkeiten zur Erstellung von Verhaltensmodellen und deren Bewertung.....	23
Tabelle 4:	Analyse des Produktportfolios eines Komponentenherstellers über dessen Homepage.....	25
Tabelle 5:	Analyse von pneumatischen Vakuumerzeugern.....	26
Tabelle 6:	Klassifizierung von Symbolen für die Relevanz der Orientierung des Symbols.....	29
Tabelle 7:	Untersuchte Vakuumerzeuger inklusive deren Eigenschaften.....	60
Tabelle 8:	Untersuchte Vakuumsauggreifer inklusive deren Eigenschaften.....	69
Tabelle 9:	Verwendete Trainingsoptionen für den Faster R-CNN-Detektor.....	72
Tabelle 10:	Zustände und Übergänge am Beispiel des Verhaltensmodells aus Abbildung 51.....	81
Tabelle 11:	KPIs der Konfusionsmatrix mit und ohne Dopplungen.....	86
Tabelle 12:	Endgültige KPIs der Konfusionsmatrix.....	87
Tabelle 13:	Detaillierte Ergebnisse für die Bewertung der Schritte 2, 3 und 4.....	88
Tabelle 14:	Ergebnisse für die Erkennung von Symbolen (Schritt 2), Verbindungen (Schritt 3) und Anschlussbezeichnungen (Schritt 4) für den Schaltplan Nummer 8 aus den drei Schaltplanquellen.....	89
Tabelle 15:	Werte der Schaltschwellen und Hysterese des SCPSi 10 [205].....	94
Tabelle 16:	Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 des Evaluierungsfalls 1a.....	97
Tabelle 17:	Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 der Evaluierungsfälle 1b und 1c.....	100
Tabelle 18:	Gegenüberstellung der gewählten KPIs für die drei Systemkonfigurationen.....	106
Tabelle 19:	Werte der Schaltschwellen für die Be- und Entladeinheit.....	102
Tabelle 20:	Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 2a und 2b.....	106
Tabelle 21:	Allgemeine Informationen über die Experten des Experten-Benchmarks ...	107
Tabelle 22:	Übersicht über die Aufgaben des Experten-Benchmarks.....	108
Tabelle 23:	Parameter von Versuch 1a des Experten-Benchmarks.....	109
Tabelle 24:	Informationen über die Bausteine von Versuch 1a des Experten-Benchmarks.....	110
Tabelle 25:	Lineares Modell und Bestimmtheitsmaß für die benötigte Zeit zur Erstellung der Verhaltensmodelle der Evaluierungsfälle 1a, 1b und 1c mit der AutoBMC Methode.....	112

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Asset Administration Shell
AutoBMC	A utomatic B ehavior M odel C reator
BOM	B ill O f M aterials
CPU	C entral P rocessing U nit
CSV	C omma S eparated V alues
DSR	D esign S cience R esearch
EDA	E lectronic D esign A utomation
ERP	E nterprise R esource P lanning
ESB	E nterprise S ervice B us
FEM	F inite- E lemente- M ethode
FMU/FMI	F unctional M ock-up U nit / F unctional M ock-up I nterface
GND	G round
GPU	G raphics P rocessing U nit
GUI	G raphical U ser I nterface
ID	I dentifikationsnummer
IEC	I nternational E lectrotechnical C ommission
IRDI	I nternational R egistration D ata I dentifier
ISO	I nternational O rganization for S tandardization
IT	I nformationstechnik
KPI	K ey- P erformance- I ndicator
MDT	M odellierungstiefe
MES	M anufacturing E xecution S ystem
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
NC	Normally Closed
NO	Normally Open
OCR	O ptical C haracter R ecognition
ODE	O rdinary D ifferential E quation
PC	P ersonal C omputer
PDF	P ortable D ocument F ormat
PDI	P rocess D ata I n
PIM	P roduct I nformation M anagement
PLM	P roduct- L ifecycle- M anagement
RAM	R andom- A ccess M emory

RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
R-CNN	R egion-based C onvolutional N eural N etworks
SPS	S peicher p rogrammierbare S teuerung
SSD	S ingle S hot M ulti- B ox D etector
UML	U nified M odeling L anguage
VIBN	V irtuelle I nbetriebnahme
VML	V erhaltens m odell
XML	E xtensible M arkup L anguage
YOLO	Y ou O nly L ook O nce
1D	1 -dimensional
2D	2 -dimensional
3D	3 -dimensional
nD	n -dimensional

Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
A_L	m^2	Fläche relevant für die Leckage durch die Empfängerdüse
$A_{min,ED}$	m^2	Minimale Fläche der Empfängerdüse
$c_{p,m}$	$J/kg \cdot K$	Mittlere isobare Wärmekapazität
E_{kin}	J	Kinetische Energie
E_{pot}	J	Potentielle Energie
F_N	N	Normalkraft
H	J	Enthalpie
h_a	J/kg	Spezifische Enthalpie der zufließenden Masseteilchen
h_b	J/kg	Spezifische Enthalpie der abfließenden Masseteilchen
i	-	Anzahl zu analysierende Bilder
L	$mbar/s/L$	Leckage als Messgröße von Druckabfall oder Druckerhöhung pro Sekunde pro Liter
l_{symb}	-	Anzahl erkannter unabhängiger Linien
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
\dot{m}_a	kg/s	Zufluss an Masseteilchen zum Vakuumherzeuger
\dot{m}_b	kg/s	Abfluss an Masseteilchen aus dem Vakuumherzeuger
\dot{m}_{res}	kg/s	Resultierender Massenstrom
n	mol	Stoffmenge
n_{symb}	-	Anzahl erkannter Symbole
P_{zu}	W	Zugeführte Leistung des Vakuumherzeugers
p	Pa	Physikalischer Druck als Kraft pro Fläche
p_{amb}	$mbar, abs$	Umgebungsdruck
p_{abs}	$mbar, abs$	Absolutdruck
p_{rel}	$mbar, rel$	Relativdruck (relativ zur Umgebung)
p_s	$mbar, abs$	Umgebungsdruck bei Standardbedingungen
p_v	$mbar, abs$	Zielvakuum
p_0	$mbar, abs$	Umgebungsdruck
p_{10}	$mbar, abs$	Absolutdruck an Anschluss 10
p_{12}	$mbar, abs$	Absolutdruck an Anschluss 12
$p(t)$	$mbar, abs$	Absolutdruck zum aktuellen Zeitpunkt
Δp	$mbar, rel$	Druckdifferenz

Q	J	Wärmemenge
\dot{Q}_H	W	Wärmestrom
$R_{s,L}$	$J/mol \cdot K$	Spezifische Gaskonstante für trockene Luft
R	$J/mol \cdot K$	Universelle Gaskonstante
S	Pa	Druckdifferenz für Schaltschwelle
S_N	m^3/s	Saugvermögen des Vakuumerzeugers
T	K	Absolute Temperatur
T_s	K	Absolute Temperatur bei Standardbedingungen
t	s	Zeit
Δt	s	Zeitspanne
U	J	Innere Energie
V	m^3	Volumen
V_{max}	m^3	Maximales Volumen des betrachteten Objekts
V_{min}	m^3	Minimales Volumen des betrachteten Objekts
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
W	J	Physikalische Arbeit
w_a	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der zufließenden Masseteilchen
w_b	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der abfließenden Masseteilchen
x	m	Verschiebung entlang der x-Koordinate
x_{max}	m	Maximale Verschiebung entlang der x-Koordinate
Z	-	Kompressibilitätsfaktor, auch Realgasfaktor genannt
ρ	kg/m^3	Dichte
Φ	W	Energiefluss

Zusammenfassung

Produktionsstandorte in Hochlohnregionen wie Europa oder Nordamerika geraten durch verschiedene Faktoren der Weltwirtschaft zunehmend unter Druck. Eine Möglichkeit, diesem Druck entgegenzuwirken und solche Produktionsstandorte weiterhin wirtschaftlich betreiben zu können, ist die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung. Der Digitale Zwilling ist eine Schlüsselkomponente auf dem Weg zu digitalen und hochautomatisierten Produktionssystemen. Eine durchgängig verfügbare digitale Repräsentation physischer Assets kann Kosten und Zeit sparen, sowohl bei Design, Entwicklung und Inbetriebnahme als auch beim Betrieb von Produktionsanlagen. Dies gilt auch für Komponentenhersteller, die häufig hochspezialisierte Komponenten und Systeme für Produktionsanlagen entwickeln, herstellen und vertreiben. Für Komponentenhersteller sind dabei die Verhaltensmodelle in prozessrelevanter Modellierungstiefe aus dem Digitalen Zwilling von zentraler Bedeutung.

Die Erstellung dieser Verhaltensmodelle ist jedoch sehr zeitintensiv und erfordert häufig die Expertise von langjährig ausgebildeten Simulationsexperten. Dies stellt eine wesentliche Hürde für den durchgängigen Einsatz von Verhaltensmodellen und Digitalen Zwillingen bei Komponentenherstellern dar. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Konzepts zur durchgängig automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme in prozessrelevanter Modellierungstiefe.

Das entwickelte Konzept ermöglicht die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme auf Basis geeigneter Eingangsinformationen. Die Verhaltensmodelle können entweder sehr detailliert oder in einer geringeren Modellierungstiefe vollautomatisiert erstellt werden. Hierfür wird eine Verhaltensmodellbibliothek mit Verhaltensmodellen der relevanten Komponenten in großer Modellierungstiefe verwendet. Um die Erstellung dieser zu vereinfachen, wurde das Konzept um eine Möglichkeit zur assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus Grundbausteinen erweitert. Die Strukturinformationen können aus verschiedenen Quellen stammen, einschließlich Fluidschaltplänen wahlweise in Papier- oder digitaler Form.

Das Konzept wird zunächst in der Domäne Vakuum-Handhabungstechnik realisiert. Für eine vollständige Realisierung und Evaluierung des Konzepts sind Grundbausteine aller relevanten Komponenten der Domäne erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden die noch nicht verfügbaren Verhaltensmodelle der Basiskomponenten Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer entwickelt und abschließend mit Messdaten evaluiert. Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem simulierten und gemessenen Verhalten der entwickelten Grundbausteine festgestellt werden.

Die vorgestellten Artefakte des Konzepts werden in Form eines Assistenzsystems realisiert. Dieses ermöglicht die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek sowie die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen von Komponenten und Systemen in prozessrelevanter Modellierungstiefe. Zudem ermöglicht es die automatisierte Ausführung der Verhaltensmodelle. Eine Evaluierung konnte anhand von zwei Evaluierungsfällen aus der Vakuum-Handhabungstechnik durchgeführt werden, in denen Verhaltensmodelle unter anderem in der virtuelle Produktauslegung und Optimierung sowie für die virtuelle Inbetriebnahme genutzt werden, um bessere und effizientere Systeme kostengünstiger und schneller zu entwerfen. Die Ergebnisse zeigen, dass die automatisiert erstellten Verhaltensmodelle je nach Modellierungstiefe sehr genau mit den gemessenen Verläufen übereinstimmen. Um die Zeitersparnis zu quantifizieren, ist ein Experten-Benchmark auf Basis der Systeme der beiden Evaluierungsfälle durchgeführt worden. Verglichen mit den Zeiten zur Erstellung, Parametrierung und Abstraktion aus dem Experten-Benchmark ermöglicht das Assistenzsystem eine Zeitersparnis von bis zu einem Faktor von 54.

Abstract

Production sites in high-wage regions such as Europe or North America are coming under increasing pressure from various factors in the global economy. One way of counteracting this pressure and continuing to operate such production sites economically is through increasing automation and digitalization. The Digital Twin is a key component on the way to digital and highly automated production systems. A consistently available digital representation of physical assets can save costs and time in the design, development, commissioning, and operation of production facilities. This also applies to component manufacturers, who often develop, manufacture, and sell highly specialized components and systems for production facilities. For component manufacturers, the behavior models in process-relevant modeling depth from the Digital Twin are of central importance.

However, the creation of behavior models is very time-consuming and often requires the expertise of simulation experts with many years of training. This represents a major obstacle to the consistent use of behavior models and Digital Twins by component manufacturers. The aim of this work is to develop a concept for the consistent automated creation of behavior models for components and systems in process-relevant modeling depth.

The developed concept enables the automated creation of behavior models for components and systems based on suitable input information. The behavior models can either be created in detail or at a lower modeling depth in a fully automated process. For this purpose, a behavior model library with behavior models of the relevant components in great modeling depth is used. To simplify the creation of these, the concept has been expanded to include the option of assisted creation of the behavior model library from basic building blocks. The structural information can come from various sources, including fluid circuit diagrams in either paper or digital form.

The concept will initially be implemented in the vacuum handling technology domain. For a complete realization and evaluation of the concept, basic building blocks of all relevant components of the domain are required. As part of this work, the not yet available behavior models of the basic components vacuum generator and vacuum suction cup are developed and finally evaluated with measurement data. A very good agreement was found between the simulated and measured behavior of the developed basic building blocks.

The presented artifacts of the concept are implemented in the form of an assistance system. This enables the low-effort creation of the behavior model library and the automated creation of behavior models of components and systems in process-relevant modeling depth. It also enables the automated execution of the behavior models. An evaluation was conducted using two case studies from vacuum handling technology. These case studies demonstrate the use of behavior models in virtual product design and optimization, as well as virtual commissioning. The objective is to design better and more efficient systems in a faster and more cost-effective way. The results indicate that, depending on the modeling depth, the automatically generated behavior models match the measured curves with high accuracy. To quantify the time savings, an expert benchmark was conducted based on the systems of the two case studies. In comparison to the times required for the creation, parameterization, and abstraction processes as outlined in the expert benchmark, the assistance system is capable of delivering time savings of up to a factor of 54.

1 Einleitung

Im folgenden Kapitel wird die Motivation für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling erläutert. Anschließend werden die daraus abgeleitete Problemstellung und Abgrenzungen beschrieben, bevor die Herausforderungen, Anforderungen, Zielsetzung und Forschungsmethodik dieser Arbeit vorgestellt werden.

1.1 Der Digitale Zwilling und seine Mehrwerte in der Automatisierungstechnik

Aktuelle Trends wie der demographische Wandel, der Fachkräftemangel, fragile Lieferketten, steigende Nachhaltigkeitsanforderungen sowie der weiter ansteigende Druck durch globalisierte Märkte stellen Produktionsstandorte in Hochlohnregionen wie Europa oder Nordamerika zunehmend vor Herausforderungen [1–5]. Die Vernetzung von Maschinen, die Integration von cyber-physischen Systemen, das Internet der Dinge und die Nutzung von Big Data haben die Grundlage für die Optimierung von Produktionsprozessen und die Entwicklung intelligenter, adaptiver Fabriken geschaffen [6, 7]. Die aufgeführten Ansätze können mit zunehmender Automatisierung und Digitalisierung zusammengefasst werden und stellen eine Möglichkeit dar, den genannten Herausforderungen zu begegnen und Produktionsstandorte weiterhin wirtschaftlich betreiben zu können [8]. In diesem Kontext hat sich der Digitale Zwilling als eine Schlüsselkomponente für die erfolgreiche Implementierung aufgeführter Ansätze herauskristallisiert [8–11].

Der Digitale Zwilling als virtuelles Abbild eines physischen Produktes, einer Anlage oder eines Prozesses, ermöglicht es Unternehmen realitätsnahe Simulationen durchzuführen [12, 13]. Ebenso können Analysen und Optimierungen in Echtzeit durchgeführt werden, ohne dabei auf die physische Welt angewiesen zu sein [14, 15]. Der physische Gegenpart eines Digitalen Zwillings wird üblicherweise als Asset bezeichnet [12, 16]. Der Digitale Zwilling befähigt seinen Anwender eine realitätsnahe Verhaltensvorhersage in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes des Assets durchzuführen. Somit können unterschiedliche Szenarien auf einer digitalen Spielwiese untersucht werden, ohne dabei ein reales Asset zu benötigen oder zu beeinflussen [17–19]. Dieses Konzept hat in verschiedenen Industriezweigen bereits große Beachtung gefunden und bietet vielfältige Anwendungsfälle, die von der Produktentwicklung über die Produktion bis hin zur Wartung und Instandhaltung reichen [20–22]. Beispielsweise ermöglicht die Verwendung eines Digitalen Zwillings in der Automatisierungstechnik die Anlaufphase zu verkürzen und das System schneller in Betrieb zu nehmen [23, 24]. Zudem fördert der Digitale Zwilling die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bei reduziertem Ausfallrisiko [14, 25]. Die genannten Vorteile werden dazu führen, dass die Verbreitung des Digitalen Zwillings in Zukunft weiter stark zunimmt [26, 27].

Um die genannten Vorteile nutzen zu können, muss ein Digitaler Zwilling jedoch zuerst erstellt werden [28, 29]. Diese Aufgabe betrifft vor allem jene Unternehmen ganz vorne in der industriellen Wertschöpfungskette, die Komponentenhersteller, da diese die entsprechenden Assets herstellen [23, 30]. Von ihnen wird zunehmend gefordert Digitale Zwillinge bereitzustellen, die unternehmensübergreifend eingesetzt werden können [28, 31–33]. Das Fehlen eines Digitalen Zwillings einer entsprechenden Komponente kann zukünftig ein Wettbewerbsnachteil sein [23, 28, 34]. Darüber hinaus können auch Komponentenhersteller von der Verwendung eines Digitalen Zwillings profitieren. Vor allem die Verwendung von detaillierten Verhaltensmodellen aus dem Digitalen Zwilling ermöglicht es Komponentenherstellern ihre Komponenten effizienter entwickeln, testen und anpassen zu können [35].

1.2 Problemstellung und Abgrenzung

Im Rahmen zunehmender Automatisierung und Digitalisierung haben sich in den letzten Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle für Produktionsprozesse entwickelt. Durch den Einsatz digitaler Tools konnten Mehrwerte geschaffen und aufgekommene Probleme abgestellt werden [9, 36]. Beispiele für solche Anwendungsfälle sind die virtuelle Auslegung von Anlagenkomponenten, die virtuelle Inbetriebnahme und die vorausschauende Wartung [37, 38]. Mehrwerte ergeben sich unter anderem durch Kosteneinsparungen, höhere Verfügbarkeit und geringeren Ressourcenverbrauch [6, 39]. Um diese Mehrwerte realisieren zu können, werden jedoch Daten und Modelle von Komponenten, Systemen und Maschinen benötigt [40]. Werden diese Daten und Modelle individuell und manuell für den jeweiligen Anwendungsfall bereitgestellt, schränkt dies den geschaffenen Mehrwert signifikant ein, da eine manuelle Bereitstellung sehr kosten- und zeitaufwändig ist [29]. Deutlich aufwandsärmer ist die Verwendung der entsprechenden Daten und Modelle aus dem Digitalen Zwilling [41]. Dadurch müssen diese nicht mehr explizit für jeden Anwendungsfall manuell erstellt werden, was zu signifikanten wirtschaftlichen Einsparungen führt [9, 21]. Die zentrale Bereitstellung der Daten und Modelle durch den Digitalen Zwilling sorgt zwar für eine gewisse Reduktion des Aufwands, das Problem der Bereitstellung verlagert sich jedoch durch die Verwendung eines Digitalen Zwillings hin zu dessen Erstellung. Dabei bestehen Digitale Zwillinge aus unterschiedlichen Daten und Modellen [40, 42, 43]. Einige liegen in Unternehmen in nutzbarer Form bereits vor, andere hingegen müssen explizit für die Verwendung im Digitalen Zwilling erstellt werden [29, 44]. Eine Gruppe der Modelle, die häufig nicht entsprechend der Anforderungen vorliegen und daher explizit erstellt werden müssen, sind Verhaltensmodelle [29, 45]. Die Erstellung solcher Verhaltensmodelle für die Verwendung im Digitalen Zwilling ist oft mit erheblichen manuellen Aufwänden verbunden [45, 46].

Für Komponenten und Systeme gibt es jedoch nicht nur ein spezifisches Verhaltensmodell, vielmehr gibt es, abhängig vom konkreten Anwendungsfall und den daraus resultierenden Anforderungen, unterschiedliche Ausprägungen der Verhaltensmodelle für eine Komponente oder ein System [47]. Für ein Verhaltensmodell ist es wichtig, dass es passend modelliert wird, sowohl in Bezug auf den Umfang als auch auf den Detailgrad. Ein Verhaltensmodell, das zu detailliert und umfangreich modelliert ist, bindet überproportional viele Ressourcen bei der Ausführung [48, 49]. Ist es hingegen zu abstrakt und nicht umfangreich genug modelliert, leidet die Übereinstimmung zwischen modelliertem und realem Verhalten [50].

Für eine effiziente und automatisierte Bereitstellung der Verhaltensmodelle ist es wichtig den gesamten Prozess für die Erstellung zu betrachten. Werden bestimmte Vorarbeiten für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen benötigt, stellt dies ein ebenso großes Hemmnis für die Bereitstellung von Digitalen Zwillingen dar. Aus diesem Grund ist eine durchgängig aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodelle für die Verwendung im Digitalen Zwilling von zentraler Bedeutung.

Neben dieser domänenübergreifenden Problemstellung wird in dieser Arbeit eine domänenspezifische Problemstellung bearbeitet. Für die Realisierung und Evaluierung wird die Domäne der Vakuum-Handhabungstechnik herangezogen. Um die Realisierung und Evaluierung des domänenübergreifenden Konzepts am Beispiel der Vakuum-Handhabungstechnik realitätsnah durchführen zu können, werden hinreichend genaue Verhaltensmodelle aller relevanten Vakuumkomponenten benötigt. Viele dieser Verhaltensmodelle liegen bereits in Bibliotheken entsprechender Simulationsprogramme vor. Es gibt jedoch einige domänenspezifische Komponenten, die nicht öffentlich verfügbar in gängigen Simulationsprogrammen vorliegen und daher im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden müssen [51, 52].

Die beschriebene Problemstellung kann in zwei Gruppen unterteilt werden:

- *Domänenübergreifend*: Fehlende Möglichkeiten für eine durchgängig aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling in der geeigneten Modellierungstiefe.

- *Domänenspezifisch*: Unvollständige Abbildung des Produktportfolios von Vakuumkomponenten als Verhaltensmodelle.

Die Betrachtungen im Folgenden werden aus Sicht eines Komponentenherstellers ausgeführt. Dieser ist typischerweise früh in der industriellen Wertschöpfungskette aktiv [53, 54]. Seine Komponenten werden häufig von Maschinen- und Anlagenbauern oder Integratoren in größeren Gesamtsystemen verwendet, die anschließend von produzierenden Unternehmen zur Herstellung verschiedenster Güter, wie Fahrzeugen, Holz- oder Elektronikprodukten und vielen weiteren Enderzeugnissen verwendet werden [53, 54]. Dabei fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf Automatisierungstechnische Prozesse in der diskreten Fertigung.

1.3 Herausforderungen

Die aufwandsarme Bereitstellung von Verhaltensmodellen ist eine zentrale Herausforderung für die großflächige Anwendung von Digitalen Zwillingen [33, 46, 55–57]. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Konzept für ein System zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen erarbeitet werden. Abgeleitet aus der in Kapitel 1.2 aufgezeigten Problemstellung ergeben sich nachfolgende Herausforderungen für ein solches System:

(H1) Berücksichtigung eines heterogenen Produktportfolios über den gesamten Anlagenlebenszyklus und über unterschiedliche Organisationseinheiten hinweg

Das Produktportfolio eines Komponentenherstellers ist häufig sehr heterogen. Es reicht von rein mechanischen und fluidführenden Elementen bis hin zu komplexen mechatronischen Komponenten [29, 58]. Diese mechatronischen Komponenten bestehen häufig aus der Kombination anderer Komponenten aus dem jeweiligen Produktportfolio und können daher als Systeme oder Teilsysteme größerer Einheiten bezeichnet werden. Die Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge für solche heterogenen Komponenten erstrecken sich über den gesamten Anlagenlebenszyklus [20, 31, 40, 53, 59, 60]. In diesen unterschiedlichen Phasen des Anlagenlebenszyklus sind verschiedene Abteilungen in einem Unternehmen sowie auch mehrere Unternehmen beteiligt [53, 61, 62]. Eine durchgängige Nutzung der Verhaltensmodelle des Digitalen Zwillinges über Organisationseinheiten hinweg ist aus diesem Grund besonders wichtig [31, 63–65].

(H2) Relevanz von physikalisch-technischem Verhalten aufgrund physischer Interaktion mit dem Handhabungsobjekt und Wechselwirkung mit dem Prozess

Die Kernkompetenz von Komponentenherstellern liegt hauptsächlich auf der Feldgeräteebene und in der Interaktion mit dem Produkt oder dem Prozess [46]. Logische Verhaltensmodelle sind in den meisten Fällen für typische Anwendungsfälle des Maschinen- und Anlagenbauers, wie die virtuelle Inbetriebnahme (VIBN), detailliert genug [56, 66, 67]. Für viele Anwendungsfälle von Komponentenherstellern, wie beispielsweise der Optimierung eines Systems, sind solche logischen Verhaltensmodelle jedoch nicht ausreichend detailliert [23, 68, 69]. Diese Anwendungsfälle benötigen die Modellierung der technisch-physikalischen Interaktion zwischen einzelnen Komponenten sowie zwischen Komponenten und dem Handhabungsobjekt [23, 68, 69].

(H3) Berücksichtigung der technisch-wirtschaftlichen Begrenzung in Zeit und Ressourcen wie z. B. Übertragungsgeschwindigkeit, Speicher und Rechenleistung für den Betrieb von Verhaltensmodellen

Während früher Phasen des Anlagenlebenszyklus, beispielsweise in der Entwicklungs-Phase, stehen häufig verhältnismäßig großzügige Übertragungs-, Rechen- und Speicherressourcen zur Verfügung [23, 70, 71]. Sobald Komponenten jedoch über die Inbetriebnahmephase in die Betriebsphase übergehen, ist die Verfügbarkeit dieser Ressourcen stark eingeschränkt [23, 70–72]. Neben den

1.4 Anforderungen

verfügbaren Ressourcen stellt auch teilweise die Zeit für die Ausführung eine Herausforderung dar. Einige Verhaltensmodelle, überwiegend in späteren Phasen des Anlagenlebenszyklus, müssen in Echtzeit ausführbar sein [73, 74].

(H4) Hoher Arbeitsaufwand und große Fehleranfälligkeit bei der manuellen Erstellung von Verhaltensmodellen mit entsprechendem Detaillierungsgrad

Die manuelle Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling ist sehr zeitaufwändig [55, 75–77]. Die Experten, welche über das entsprechende Wissen zur Erstellung solcher Verhaltensmodelle verfügen, verursachen große personelle Aufwände und sind in ihrer Verfügbarkeit stark begrenzt [17, 62, 78]. Detaillierte Auswertungen zeigen, dass über 50% der benötigten Zeit einer Simulationsstudie für die Zieldefinition, Datenerfassung und Erstellung der Verhaltensmodelle aufgewendet wird [55]. Darüber hinaus ist eine manuelle Erstellung von Verhaltensmodellen sehr fehleranfällig, was zu umfangreichen weiteren Aufwänden führt um Fehlerkorrekturen durchzuführen [46, 76, 78]. Zusätzlich vervielfachen sich die genannten Aufwände, wenn Verhaltensmodelle in verschiedenen Anwendungsfällen mit unterschiedlichem Umfang und unterschiedlicher Modellierungstiefe benötigt werden.

1.4 Anforderungen

Aus den aufgezeigten Herausforderungen lassen sich Anforderungen ableiten, die das in dieser Arbeit entwickelte Konzept erfüllen muss, um die beschriebene Problemstellung zu lösen. Analog zu den Herausforderungen werden diese im Folgenden dargestellt.

(A1) Konsistenz in Modellen und Formaten über das gesamte Produktportfolio hinweg

Für eine gesamtheitliche Systembetrachtung ist es von zentraler Bedeutung, eine konsistente Modellierung für unterschiedliche Komponenten und Systeme über das gesamte Produktportfolio hinweg zu realisieren. Durch eine konsistente Modellierung können unterschiedliche Komponenten aufwandsarm zu Systemen zusammengefügt werden. Wichtig ist neben der Konsistenz auch das Datenformat der entsprechenden Modelle. Werden Verhaltensmodelle unternehmensübergreifend verwendet, ist es zudem wichtig einheitliche Formate zu verwenden. Hierfür eignen sich insbesondere existierende Standards, da verschiedene Unternehmen damit in einfacher Weise auf dieselben Formate setzen können.

(A2) Hinreichend genaue Verhaltensmodellierung von Komponenten und Systemen in entsprechender Modellierungstiefe und unter Berücksichtigung zur Verfügung stehender Rechenzeit und Ressourcen

Ein zentraler Aspekt des Digitalen Zwillings ist die möglichst realitätsnahe Abbildung des physischen Assets durch Verhaltensmodelle. Hierbei gilt es die Abbildung entsprechend dem Anwendungsfall hinreichend genau umzusetzen. Dabei kommt es auch auf die zur Verfügung stehenden Rechenzeit und Ressourcen an. So kann es für bestimmte Anwendungsfälle sinnvoll sein, abstrahierte Verhaltensmodelle geringerer Modellierungstiefe zu verwenden, die deutlich weniger Rechenzeit bzw. Speicherbedarf, Rechenbedarf oder Übertragungsgeschwindigkeit benötigen. Stehen der nutzenden Person eines Digitalen Zwillings Verhaltensmodelle verschiedener Modellierungstiefen zur Verfügung kann diese das für den Anwendungsfall passende Verhaltensmodell auswählen. Dazu sollen Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefe mit entsprechender Genauigkeit durch den Digitalen Zwilling bereitgestellt werden.

(A3) Vollumfänglich aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen mithilfe automatisierter oder assistierter Methoden

Die manuelle Erstellung der Verhaltensmodelle im Digitalen Zwilling sind mit großen zeitlichen Aufwänden verbunden. Ziel ist es, diese Verhaltensmodelle mithilfe des in dieser Arbeit konzipierten Systems möglichst aufwandsarm zu erstellen. Verglichen wird der Aufwand mit dem Status quo. Dabei sind nicht nur die Verhaltensmodelle, sondern auch mögliche Vorarbeiten soweit möglich und sinnvoll zu automatisieren bzw. zu assistieren, um den manuellen Aufwand gesamtheitlich betrachtet so gering wie möglich zu halten. Für die Reduzierung des manuellen Aufwands kann zusätzlicher Rechenbedarf in Kauf genommen werden. Zudem ist auch die absolut benötigte Zeit für die Erstellung der Verhaltensmodelle von untergeordneter Bedeutung, sofern während dieser Zeit kein manueller Aufwand anfällt.

(A4) Modellbildung und Bereitstellung von hinreichend genauen digitalen Bausteinen für relevante Vakuumkomponenten

Für die Applikation von Methoden zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling werden hinreichend genaue Verhaltensmodelle für die Grundbausteine aller relevanten Komponenten im Produktportfolio benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Vakuum-Greifsysteme als Anwendungsbeispiel herangezogen. Für diese Domäne liegen viele Verhaltensmodelle von Grundbausteinen noch nicht öffentlich zugänglich vor. Es müssen daher zunächst alle fehlenden, nicht öffentlich zugänglichen Verhaltensmodelle im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden.

1.5 Zielsetzung

Der manuelle Aufwand für die Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe für eine durchgängige Verwendung im Digitalen Zwilling ist hoch und bildet einen der Ausgangspunkte für diese Arbeit. Außerdem fehlen Verhaltensmodelle relevanter Komponenten von Vakuum-Greifsystemen. Die Ziele dieser Arbeit ergeben sich daher wie folgt:

- Entwicklung und Realisierung eines Konzepts zur automatisierten Erstellung von hinreichend genauen Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe für die Verwendung in Digitalen Zwillingen unter Berücksichtigung nicht-zyklischer Vorarbeiten.
- Herleitung und Modellbildung von hinreichend genauen Grundbausteinen für Verhaltensmodelle fehlender und relevanter Komponenten von Vakuum-Greifsystemen.

Das realisierte Konzept wird auf Basis zweier Anwendungsfälle mit unterschiedlichem Fokus evaluiert und anhand von Experten-Benchmarks auf die Funktionsfähigkeit überprüft.

1.6 Wissenschaftliche Vorgehensweise

Für die wissenschaftliche Vorgehensweise wird die Design Science Research (DSR) Methode nach Hevner verwendet [79]. Diese beschreibt im Spannungsfeld bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse ein Vorgehen, um neue Artefakte aufzubauen und diese zu evaluieren. Dabei beachtet die Methode insbesondere auch Meta-Artefakte in der Wissensbasis und Probleme sowie Möglichkeiten aus der Domäne und der Umwelt. Die Methode eignet sich vor allem durch deren Fokus auf eine artefaktbasierte Erforschung konkreter Ingenieurwissenschaftlicher Problemstellungen, um daraus allgemeingültige und übertragbare Erkenntnisse zu erlangen [80–82]. Angelehnt an [80] wird ein Design Cycle der Methode zum Entwurf von Lösungsartefakten in drei Phasen unterteilt:

1.7 Aufbau der Arbeit

- Durch die Untersuchung der Problemstellung (engl.: Problem Investigation) wird der Anwendungskontext festgelegt, die Herausforderungen werden beschrieben und Anforderungen an das Lösungsartefakt werden abgeleitet. Jeder nachfolgende Lösungsansatz muss sich an der abgeleiteten Zielsetzung messen lassen.
- Für den Entwurf des Lösungsansatzes (engl.: Treatment Design) werden zum einen vorhandene Ansätze für Lösungsartefakte recherchiert und untersucht und zum anderen auf Basis vorhandener Ansätze ein konkretes Lösungsartefakt entworfen.
- Dieses Lösungsartefakt wird anschließend in der Validierung der Lösung (engl.: Treatment Validation) hinsichtlich der Eignung zur Problemlösung untersucht.

Dabei handelt es sich bei dem beschriebenen Entwurfszyklus um ein iteratives Vorgehen. Dadurch gibt es die Möglichkeit den Lösungsansatz durchgängig zu überprüfen und bei Bedarf die Problemstellung und Zielsetzung nachzuschärfen. Um die Übersichtlichkeit dieser Arbeit sicherzustellen, werden nur die Artefakte aus den drei relevanten Iterationen ausführlich dargestellt. Diese umfassen:

- Entwurf eines abstrakten Artefakt-Konzepts und dessen analytische Evaluierung anhand der formulierten Anforderungen sowie der Entwurf und die prototypische Realisierung eines Artefaktes zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Digitale Zwillinge und dessen empirische Evaluierung in der Domäne Vakuum-Handhabungstechnik.
- Entwurf und prototypische Realisierung eines Artefaktes zur automatisierten Abstraktion der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen und dessen empirische Evaluierung in der Domäne Vakuum-Handhabungstechnik.
- Entwurf und prototypische Realisierung eines Artefaktes zur assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek und dessen empirische Evaluierung in der Domäne Vakuum-Handhabungstechnik.

Da es sich bei dieser Arbeit um eine Arbeit im Forschungsumfeld handelt, werden die in [80] beschriebenen Phasen zur Implementierung und Evaluierung des Lösungsansatzes mit höherem Technologiereifegrad in der breiten Serienanwendung nicht durchgeführt.

1.7 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung inklusive Problemstellung, Herausforderungen, Anforderungen und Zielsetzung werden im Kapitel 2 die relevanten Grundlagen dargestellt und erläutert. Dies beinhaltet Grundlagen zum Digitalen Zwilling, relevante Standards in diesem Kontext und eine kurze Einführung in die Vakuum-Handhabungstechnik. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird auf den Stand der Technik zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling, sowie auf Ansätze zur domänenspezifischen Modellierung eingegangen. Zudem wird in Kapitel 2 eine Analyse der Randbedingungen dieser Arbeit durchgeführt und mit Schlussfolgerungen sowie dem Aufzeigen einer Forschungslücke abgeschlossen.

Kapitel 3 stellt das Konzept zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling vor. Zu Beginn wird eine makroskopische Einordnung des Konzepts in die industrielle Wertschöpfungskette und bestehenden Infrastrukturen von Unternehmen gegeben. Darauf aufbauend wird detaillierter auf die aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling eingegangen. Die hierfür benötigte Verhaltensmodellbibliothek und deren aufwandsarme Erstellung wird ebenso detailliert betrachtet wie auch die Abstraktion der erstellten Verhaltensmodelle in geringere Modellierungstiefen.

Im betrachteten Bereich der Vakuum-Handhabungstechnik sind Verhaltensmodelle für Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer weitestgehend nicht öffentlich verfügbar. Für diese zwei Grundbausteine werden in Kapitel 4 die entsprechenden Verhaltensmodelle umfangreich hergeleitet, aufgebaut und mithilfe von Messungen evaluiert.

In Kapitel 5 wird das in Kapitel 3 vorgestellte Konzept, welches in Form eines Assistenzsystems realisiert wird, mit dessen Aufbau, Funktionsweise und Bedienoberfläche beschrieben. Dabei wird zunächst auf die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek mit den dafür möglichen Informationsquellen eingegangen. Anschließend wird die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen von Komponenten und Systemen näher beschrieben, bevor die Realisierung der Methode zur automatisierten Abstraktion der Modellierungstiefen vorgestellt wird. Darauf folgend wird in Kapitel 5 die Benutzeroberfläche vorgestellt, welche es dem Bediener ermöglicht die implementierten Funktionalitäten möglichst einfach einzusetzen.

Kapitel 6 stellt zunächst die Ergebnisse für die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek am Beispiel eines Kompaktejektors vor. Im Anschluss werden die Ergebnisse für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodelllein in prozessrelevanter Modellierungstiefe am Beispiel von zwei Evaluierungsfällen präsentiert. Dabei liegt der Fokus auf der Übereinstimmung zwischen den mit der Methode erstellten Verhaltensmodellen und dem mit echten Systemen erzielten Verhalten. Um die Anforderungen, welche sich auf den Aufwand für die Erstellung und Anpassung der Verhaltensmodelle beziehen, zu evaluieren, wird anschließend die Methodik für ein Experten-Benchmark vorgestellt. Die damit erzielten Ergebnisse werden mit denen der Methode dieser Arbeit verglichen. Zum Abschluss von Kapitel 6 werden die Anforderungen dieser Arbeit mit den erzielten Resultaten abgeglichen.

Abschließend fasst Kapitel 7 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und schließt diese mit einem Ausblick über potenzielle weiterführende Forschungsaktivitäten ab.

2 Ausgangssituation

Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst auf die Grundlagen für diese Arbeit eingegangen, gefolgt vom Stand der Wissenschaft und Technik und einer Analyse der Randbedingungen. Abschließend werden Schlussfolgerungen aufgeführt und eine Forschungslücke aufgezeigt.

2.1 Grundlagen

Nach den Grundlagen und Bestandteilen von Digitalen Zwillingen werden Grundlagen zur Vakuum-Handhabungstechnik als Anwendungsdomäne dieser Arbeit erläutert.

2.1.1 Digitale Zwillinge und deren Bestandteile

Der Begriff eines technischen Zwillings geht auf das Apollo-Programm der National Aeronautics and Space Administration (NASA) zurück, das durch den Bau mindestens zweier identischer Raumfahrzeuge Bedingungen und Reaktionen dieser vor und während der Mission am Zwilling auf der Erde permanent widerspiegeln konnte [14, 83]. Der Begriff Digitaler Zwilling wurde erstmals 2012 in der integrierten Technologie-Strategieplan der NASA verwendet [84]. Demnach wird ein Digitaler Zwilling als ein integriertes Simulationsmodell eines Fahrzeuges oder eines Systems bezeichnet, welches verfügbare physikalische Modelle, Sensoraktualisierungen, Flottenhistorie und weitere Informationsquellen verwendet, um die Lebensdauer des realen Zwillings widerzuspiegeln [83, 84]. Seither hat sich das Konzept auf die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche ausgebreitet und angepasst. Für den betrachteten Bereich dieser Arbeit, die diskrete Fertigung, existieren zahlreiche Definitionen [20, 22, 85]. Für diese Arbeit werden Digitale Zwillinge als virtuelle Repräsentation einer realen Komponente oder eines realen Systems mit der Fähigkeit zur Abbildung des statischen und dynamischen Verhaltens bezeichnet [12, 86]. Dabei besteht ein Digitaler Zwilling im Kern aus unterschiedlichen Daten und Modellen. Diese werden ergänzt um die drei Eigenschaften der Simulierbarkeit, der Synchronität, sowie der aktiven Datenerfassung. Diese Bestandteile sind links in Abbildung 1 dargestellt. Darin wird die Einordnung des Digitalen Zwillings im sogenannten Cyber Layer als Repräsentation eines realen Assets aus dem physischen Layer ersichtlich.

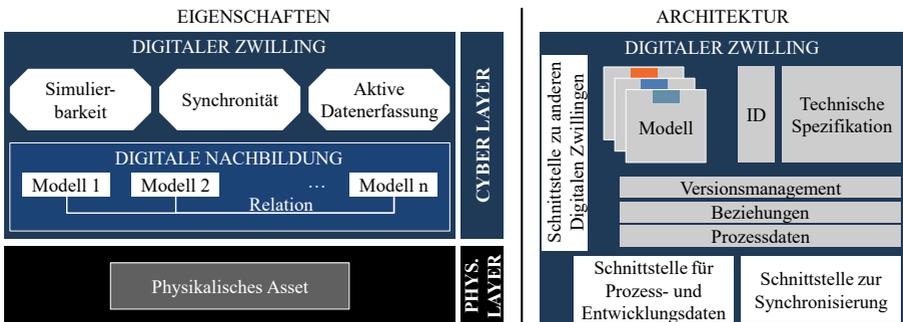


Abbildung 1: Der Digitale Zwilling und seine Eigenschaften angelehnt an [86] (links) sowie eine mögliche Architektur des Digitalen Zwillings angelehnt an [86] (rechts)

Um einen Digitalen Zwilling realisieren zu können, muss dieser bestimmte Bestandteile beinhalten. Eine mögliche Architektur, welche die erläuterten Eigenschaften des Digitalen Zwillings realisieren kann, ist rechts in Abbildung 1 dargestellt. Darin sind die Hauptbestandteile eines Digitalen Zwillings, wie Modelle unterschiedlicher Art und Disziplin sowie Daten, periphere Aspekte, wie eine

eindeutige Identifikationsnummer (ID) oder ein Versionsmanagement und die Beziehungen zu anderen Digitalen Zwillingen berücksichtigt. Zudem weist die Architektur Schnittstellen zur Erfassung von Daten und zur Synchronisierung mit dem realen Asset sowie zur Interaktion mit anderen Digitalen Zwillingen auf. Die Daten werden in der vorgestellten Architektur in technische Spezifikationen sowie Prozessdaten unterteilt. Die technischen Spezifikationen entsprechen dabei jenen Daten, die früh im Lebenszyklus eines Assets anfallen. Die Prozessdaten wiederum sind jene Daten, die während der späteren Lebenszyklusphasen eines Assets anfallen, vor allem in der Betriebsphase.

Wichtig für die Verwendung von Daten und Modellen im Digitalen Zwilling ist deren semantische Eindeutigkeit [75]. Die Semantik ermöglicht dabei, dass zwei unterschiedliche Programme ausgetauschte Informationen gleich interpretieren und verstehen [87].

Modelle als weiterer zentraler Bestandteil des Digitalen Zwillings beschreiben ein vereinfachtes Abbild eines geplanten oder bestehenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen konzeptionellen oder konkreten System [88, 89]. Im Bereich intelligenter mechatronischer Systeme können die Modelle in folgende Klassen eingeteilt werden: Vorgehensmodell, Systemmodell, Anforderungsmodell, Funktionsmodell, Strukturmodell, Gestaltmodell und Verhaltensmodell [69, 90]. Dabei beschreiben Verhaltensmodelle das statische oder dynamische Verhalten einer Komponente oder eines Systems in quantitativer Form [90]. Verhaltensmodelle, die hauptsächlich für Simulationen eingesetzt werden, sind für einen Großteil der Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings von zentraler Bedeutung [31]. Unter Simulation versteht man häufig die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Experimenten, die mit einem Verhaltensmodell durchgeführt werden [48]. Verhaltensmodelle werden daher oft als Simulationsmodelle bezeichnet [91, 92].

Ein Digitaler Zwilling kann entweder ein Objekt oder eine Instanz repräsentieren. Digitale Zwillinge eines Objekts werden häufig in den frühen Phasen des Anlagenlebenszyklus eingesetzt, in denen das Asset noch nicht physisch existiert. Sobald ein physisches Asset besteht, können Digitale Zwillinge für jede Instanz eines Assets erstellt werden. Ein instanzspezifischer Digitaler Zwilling enthält neben den objektspezifischen Daten auch instanzspezifische Daten, wie beispielsweise spezifische Messdaten. [14, 22, 64]

2.1.2 Vakuum-Handhabungstechnik

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Anwendungsdomäne die Vakuum-Handhabungstechnik verwendet. Hierfür werden nachfolgend notwendige Informationen dieser Domäne erläutert. Vakuum ist der Bereich, in dem der Absolutdruck in einem abgeschlossenen Raum niedriger als der umgebende Atmosphärendruck ist [93]. Der physikalische Druck ist definiert als der Quotient aus der wirkenden Normalkraft der an der Oberfläche anliegenden Fluidteilchen und der zugehörigen Fläche. Die Druckkraft wirkt dabei immer als Normalkraft senkrecht zur Fläche [94]:

$$p = \frac{F_N}{A} \quad (2.1)$$

Der Druck kann als Absolutdruck (p_{abs}) gegenüber dem absoluten Vakuum im luftleeren Raum oder bezogen auf den absoluten Umgebungsdruck (p_{amb}) angegeben werden, dann spricht man von einem Relativdruck (p_{rel}). Dieser errechnet sich als Differenz zwischen p_{abs} und p_{amb} nach folgender Formel [95]:

$$p_{rel} = p_{abs} - p_{amb} \quad (2.2)$$

Diese Definition bedeutet, dass eine positive, resultierende Kraftwirkung auf eine Fläche als positiver Relativdruck angegeben wird. Im Vakuumbereich ist die resultierende Kraftwirkung an der Grenzfläche durch den wirkenden Unterdruck hingegen negativ. Die Gleichung (2.2) liefert negative Werte, sprich relative Vakuumwerte, die mit einem negativen Vorzeichen versehen sind. Angegeben

2.1 Grundlagen

wird der Druck in den Einheiten Pascal oder in Bar [94, 96]. In der Vakuumtechnik ist Millibar als Einheit verbreitet [96]. Da sich der Umgebungsdruck je nach Standort und Wetterlage sehr unterschiedlich auswirken kann, wird dieser in der technischen Anwendung häufig auf einen standardisierten Referenzzustand normalisiert. Die Standardtemperatur der Umgebung wird aufgrund der guten Praktikabilität dabei typischerweise auf 20°C ($T_s = 293,15\text{ K}$) und der Standarddruck auf $p_s = 1.000\text{ mbar}$, abs festgesetzt [97].

Um Vakuum zur Handhabung von Objekten zu verwenden, kommen Vakuum-Greifsysteme zum Einsatz. Ein Vakuum-Greifsystem beschreibt dabei ein System, welches aus Komponenten unterschiedlicher Gruppen zusammengesetzt ist. Dazu setzt das Vakuum-Greifsystem auf die resultierende Kraft aus der Druckdifferenz, die zwischen dem abgeschlossenen Raum des Greifers mit dem Werkstück und der Umgebung entsteht. Die explizite Komponente, um diesen abgeschlossenen Raum zu erzeugen, nennt sich Vakuumsauggreifer, wird in anderen Ausarbeitungen auch als einfacher Sauger oder Saugnapf bezeichnet. Die Minimalausprägung eines Vakuum-Greifsystems besteht neben einem Vakuumsauggreifer aus einem Vakuumerzeuger und einer dazwischen befindlichen fluidischen Verbindung. Darüber hinaus gibt es weitere Komponenten, aus denen ein Vakuum-Greifsystem bestehen kann. Diese können in sechs Gruppen unterteilt werden: Vakuumerzeuger, Filter und Verbindungen, Traversen und Befestigungselemente, Schalter und Systemüberwachung, Ventiltechnik und Vakuumsauggreifer [58]. Die Komponenten dieser sechs Gruppen sind in Abbildung 2 am Beispiel eines Vakuum-Greifsystems für ein typisches Einsatzgebiet, dem automobilen Karosserierohbau, exemplarisch dargestellt. Zu der jeweiligen Gruppe sind die Disziplinen abgebildet, die das Verhalten der jeweiligen Komponenten in den Gruppen beeinflussen. Während Vakuumsauggreifer hauptsächlich durch mechanische und fluidische Effekte beeinflusst werden, können bei Vakuumerzeugern zusätzlich die Disziplinen Elektrik und Software hinzukommen. Die Komponenten solcher Vakuum-Greifsysteme stellen ein typisches Beispiel für mechatronische Komponenten und Systeme dar.

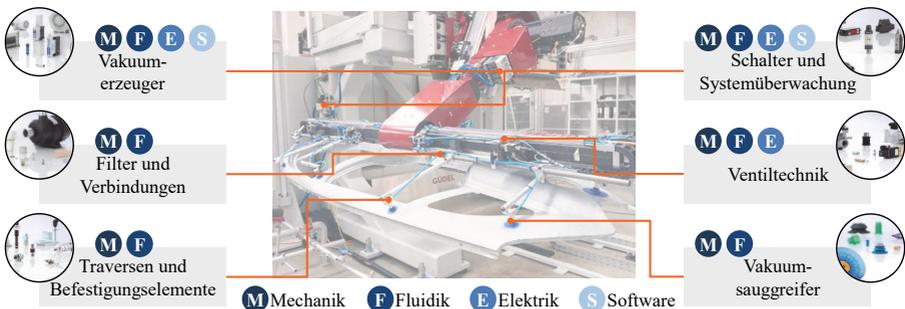


Abbildung 2: Vakuum-Greifsystem und dessen Komponenten (Bildquelle: [98])

Einige der Komponenten wie Schläuche, Filter oder Ventile kommen in der gesamten Pneumatik und anderen Domänen, wie beispielsweise der Hydraulik, zum Einsatz. Spezifisch für Vakuum-Greifsysteme sind hingegen Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer. Auf diese beiden für Vakuum-Greifsysteme elementaren Komponentengruppen wird nachfolgend näher eingegangen.

2.1.2.1 Vakuumerzeuger

Als Wirkprinzip verwenden Vakuum-Greifsysteme eine Druckdifferenz zwischen dem inneren Volumen des Vakuumsauggreifers und der Umgebung. Positioniert man ein Objekt entsprechend am Vakuumsauggreifer, sodass häufig mithilfe einer speziellen Dichtlippe eine dichte Verbindung entsteht und der Sauger wird mit Vakuum beaufschlagt, entsteht ein Kraftschluss durch das anpressen

des Objekts gegen die Dichtlippe [94, 99]. Dieses Vakuum kann prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten bereitgestellt werden [100]. Zum einen kann ein Vakuum in einem geschlossenen System erzeugt werden. In diesem Fall bleibt die Luftmasse im Sauger konstant. Das Vakuum wird hierbei durch eine Volumenvergrößerung generiert. Dieser Effekt kommt in der Natur beispielsweise bei Miesmuscheln, Tintenfischen oder Nafpschnecken vor [101–103].

Zum anderen kann Vakuum in einem offenen System durch die Verwendung von elektrischen oder pneumatischen Vakuumerzeugern erzeugt werden [104]. Durch diese Vakuumerzeuger wird die Luftmasse innerhalb des inneren Volumens des Vakuumsauggreifers reduziert und über den Vakuumerzeuger in Richtung Atmosphäre ausgestoßen, wodurch der Druck innerhalb des Vakuumsauggreifers abfällt. Für die Erzeugung eines Vakuums in offenen Systemen gibt es unterschiedliche Prinzipien. Die gängigsten Prinzipien für Vakuumerzeuger, die in Vakuumsaugsystemen eingesetzt werden, sind Treibmittelvakuumpumpen (im Folgenden pneumatische Vakuumerzeuger genannt), rotatorische oder oszillierende Verdrängerpumpen (im Folgenden Vakuumpumpe genannt) und Radialgebläse oder Seitenkanalverdichter (im Folgenden Vakuumbergebläse genannt) [94]. Weitere Erzeuger-Varianten und detailliertere Informationen sind in einschlägiger Literatur zu finden [68, 94, 105].

Von zentraler Bedeutung für das Verhalten von Vakuumerzeugern ist deren Saugvermögen. Dieses beschreibt die Fähigkeit eines Vakuumerzeugers eine bestimmte Menge an Teilchen in einer bestimmten Zeiteinheit abzusaugen. Dabei wird das Saugvermögen in der Vakuumsaug-Handhabungstechnik häufig nicht als Massenstrom (Luftmasse pro Zeiteinheit) angegeben, sondern als standardisierter Volumenstrom (standardisiertes Luftvolumen pro Zeiteinheit). Hierfür kann die geförderte Masse mithilfe der betreffenden Gaseigenschaften über die Dichte des Gases bei Standardbedingungen in ein standardisiertes Volumen umgerechnet werden [105]:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{\dot{m}}{\frac{p_s}{R_{s,L} \cdot T_s}} \quad (2.3)$$

Hierfür werden neben den Werten der Standardbedingung für Druck ($p_s = 1.000 \text{ mbar, abs}$) und Temperatur ($T_s = 293,15 \text{ K}$) die spezifische Gaskonstante $R_{s,L}$ mit $287,05 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ für trockene Luft angenommen.

Das Saugvermögen von Vakuumerzeugern ist neben einigen weiteren Faktoren stark vom aktuell anliegenden Vakuum abhängig. Dabei nimmt das Saugvermögen in der Regel mit zunehmendem Vakuumwert ab. Für die unterschiedlichen Prinzipien von Vakuumerzeugern ergeben sich jedoch spezifische Verläufe im Diagramm für Volumenstrom über Vakuum. Ein solches ist beispielhaft für ausgewählte Vakuumerzeuger links in Abbildung 3 dargestellt.

Anhand der Kennlinien wird deutlich, dass Vakuumbergebläse sehr große Volumenströme bei geringen Vakuumwerten treiben können. Diese großen Volumenströme nehmen jedoch stark ab, sobald das Vakuum zunimmt. Die mit Vakuumbergebläsen erzielten Maximalwerte für das Vakuum können bei ca. 400 mbar, rel liegen. Vakuumpumpen fördern bei Umgebungsdruck typischerweise deutlich geringere Volumenströme als Vakuumbergebläse, erreichen dafür aber deutlich höhere Vakuumwerte. Ähnlich hohe Werte für das Vakuum erreichen pneumatische Vakuumerzeuger. Diese haben grundlegend einen ähnlichen Verlauf der Kennlinie für Volumenstrom über Vakuum wie die Vakuumpumpen, sofern es sich um pneumatische Vakuumerzeuger mit einer einstufigen Venturidüse handelt. Es gibt jedoch auch pneumatische Vakuumerzeuger mit mehrstufigen Venturidüsen. Dadurch erhöht sich die Kennlinie des Volumenstroms über Vakuum insbesondere im Bereich niedriger Vakuumwerte, da hier eine oder mehrere zusätzliche Saugdüsen aktiv geschaltet sind.

Erreichbares Vakuum und förderbarer Volumenstrom sind häufig noch von weiteren Einflussfaktoren abhängig. Bei pneumatischen Vakuumerzeugern beispielsweise sind diese Werte stark vom anliegenden Betriebsdruck des Treibmediums, insbesondere Druckluft, abhängig. Aufgrund der hochdynamischen und supersonischen Strömungsprozesse innerhalb der Venturidüse handelt es sich bei diesen Abhängigkeiten um komplexe Zusammenhänge, die nur schwer analytisch beschrieben

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

werden können [58]. Dies wird im rechten Teil von Abbildung 3 deutlich. Darin ist das 3-dimensionale (3D)-Datenkennfeld eines pneumatischen Vakuumerzeugers mit dem Saugvermögen in Abhängigkeit des Betriebsdruckes und des anliegenden Vakuums aufgetragen. Auffällig sind die unterschiedlich ausgeprägten Bereiche im Diagramm. Für große Betriebsdrücke gibt es einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Saugvermögen und Vakuum, für geringere Betriebsdrücke ist dies nicht mehr der Fall. Solche Datenkennfelder werden typischerweise während der Entwicklung neuer Vakuumerzeuger erfasst.

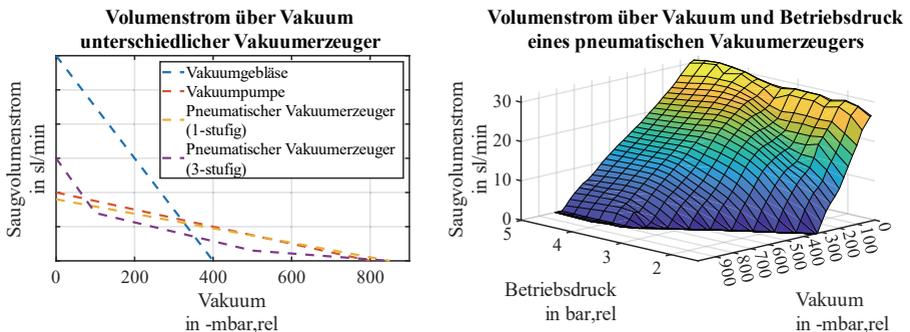


Abbildung 3: Volumenstrom über Vakuum unterschiedlicher Vakuumerzeuger (links) und 3D-Datenkennfeld eines pneumatischen Vakuumerzeugers (rechts)

2.1.2.2 Vakuumsauggreifer

Eine weitere zentrale Komponente für Vakuum-Greifsysteme sind Vakuumsauggreifer, da diese für die Abgrenzung eines Druckraums sorgen, in dem ein Vakuum erzeugt werden kann. Durch ihren jeweiligen Aufbau passen sich die Vakuumsauggreifer an die Oberfläche und Kontur des Handhabungsobjekts an [106]. Vakuumsauggreifer können grundlegend in Flach- und Balgsauger eingeteilt werden [99]. Flachsauger können durch ihren fehlenden Balg kaum bis keinen Höhenausgleich liefern, während Balgsauger mit ihren flexiblen Bälgen, auch Falten genannt, die Möglichkeit zum Höhenausgleich bieten [99]. Die Ausführung und insbesondere die Faltenanzahl hat neben der Größe des Vakuumsauggreifers einen Einfluss auf dessen inneres Volumen. Bei Berechnungen, z. B. zur Ermittlung der Evakuierungszeit, werden Vakuumsauggreifer derzeit häufig als konstantes Volumen angenommen, was insbesondere bei den stark komprimierbaren Balgsauggreifern zu einer stark unzureichenden Genauigkeit führt [51]. Weiterführende Informationen zu Vakuumsauggreifern sind in einschlägiger Literatur zu finden [68, 94, 105].

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Nachfolgend sollen Ansätze aus Wissenschaft und Technik für die domänenübergreifende aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe sowie domänenspezifische Verhaltensmodelle von Vakuumkomponenten vorgestellt werden.

2.2.1 Domänenübergreifender Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird auf den Stand der Wissenschaft und Technik für die aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe eingegangen. Die vorgestellten Ansätze werden zum Abschluss mit den Anforderungen dieser Arbeit abgeglichen. Trotz

umfangreicher Recherche konnte kein technisch realisierter und direkt einsetzbarer Ansatz zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen gefunden werden.

Im wissenschaftlichen Bereich hingegen gibt es einige Ansätze, die häufig aus dem Bereich der VIBN stammen. Ein erstes Konzept kommt von Kufner [46]. Sie stellt drei allgemeine Ansätze zur Erstellung von Verhaltensmodellen vor: Das Wachsen der Modelle während der Entwicklung, die Zusammenstellung aus einem Baukasten und die automatisierte Modellierung auf Basis von technischen Dokumenten. Nach einer Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile konzentriert sich Kufner auf die automatisierte Erstellung von Modellen auf der Grundlage von technischen Dokumenten. Diese Dokumente werden in einer Methode verwendet, um die Grundfunktionalität für Verhaltensmodelle von Produktionsmaschinen zu erstellen. Die Einschränkung liegt in der Fokussierung auf Grundfunktionen, da für erweiterte Funktionen Informationsdefizite bestehen. Dadurch werden nur geringe Modellierungstiefen erreicht, die für Anwendungsfälle wie z.B. die Materialflussplanung ausreichend, für einige Anwendungsfälle der Komponentenhersteller wie z.B. die virtuelle Auslegung oder die virtuelle Validierung jedoch zu oberflächlich sind. [46]

Thongnuch [34] stellt ebenfalls ein Konzept für die VIBN vor. Der MCAD2Sim genannte Ansatz ist ein strukturiertes, datengetriebenes Konzept, das hauptsächlich auf 3D-MCAD-Modellen basiert. Unter 3D-MCAD-Modellen werden 3D mechanische CAD-Modelle (Computer-Aided Design) verstanden. Aus diesen 3D-MCAD-Modellen extrahieren verschiedene Algorithmen Informationen über Kinematik, Komponentenart und Geometrie sowie die Orientierung im 3D-Raum. Auf der Grundlage dieser Informationen können Modelle für die VIBN erstellt werden, die hauptsächlich aus einem Verhaltensmodell in Verbindung mit einem 3D-Visualisierungsmodell bestehen. Schließlich werden diese Modelle in ein standardisiertes Austauschformat überführt. Der Ansatz konzentriert sich stark auf spezialisierte Produktionsmaschinen mit Schwerpunkt auf dem kinematischen Verhalten und der VIBN. Dieser Fokus ist für die Anwendungsfälle von Digitalen Zwillingen aus Sicht eines Komponentenherstellers zu spezifisch auf die VIBN ausgelegt, insbesondere in Bezug auf unterschiedliche Disziplinen und Modellierungstiefen. [34]

Auch der Ansatz von Scheifele [107] ist stark auf die Perspektive eines Maschinenherstellers ausgerichtet. Sein Fokus liegt auf der Betrachtung einer großen Variantenvielfalt im Bereich der Sondermaschinen. Zum einen beschreibt er dabei einen Prozess zur Erstellung modularer Komponenten, zum anderen einen Prozess, der parallel zum üblichen Engineering-Prozess abläuft. In diesem Parallelprozess werden aus Verhaltensbausteinen und grafischen Bausteinen virtuelle Bausteine erstellt, die dann nach den Anforderungen des Kunden zu einer virtuellen Maschine zusammengesetzt werden. Diese virtuelle Maschine kann anschließend für Hardware-in-the-Loop-Simulationen verwendet werden. Ähnlich den bereits beschriebenen Ansätzen konzentriert sich auch das Konzept von Scheifele auf den Maschinenhersteller und vor allem auf die Phase der VIBN. Aus den genannten Gründen sind solche Ansätze für die Anforderungen an Verhaltensmodelle aus Sicht der Komponentenhersteller nicht ausreichend. [107]

Sommer et al. [59] präsentieren einen Ansatz zur Erstellung eines Digitalen Zwillinges für eine komplette Fabrik. Diese basieren auf 3D-Scans und Analysen unter anderem mittels Objekterkennung und Deep Learning. Aus den erkannten Objekten werden mit weiteren Informationen aus externen Datenbanken die Modelle für den Digitalen Zwilling erstellt. Dieser Ansatz konzentriert sich vor allem auf ganze Fabriken und allgemeine funktionale Zusammenhänge zwischen einzelnen Maschinen und Produktionslinien. Ähnlich wie bei den oben genannten Ansätzen ist dies zu generisch für Verhaltensmodelle, die bei Komponentenherstellern eingesetzt werden. [59]

Barth und Fay [108] stellen einen Ansatz zur automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen vor, die für Steuercode-Tests verwendet werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf vorgegebenen computergestützten Planungsunterlagen, insbesondere auf Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen. Für die Erstellung ihres Verhaltensmodells verwenden sie das Simulationsprogramm „Modelica“ mit den darin enthaltenen Bibliotheken. Die benötigten Parameter stammen aus Simulationen mit größerer Modellierungstiefe und anderen Programmen zur rechnergestützten Entwicklung. Dabei ist teilweise großer manueller Aufwand erforderlich. Neben diesem manuellen

Aufwand ist auch die Konsistenz der Parameter in der Regel von der manuellen Zuordnung abhängig. Zudem liegt der Fokus im Bereich der Prozessautomatisierung, was sich in der sehr spezifischen Modellierungstiefe widerspiegelt. [108]

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Hoernicke et al. [109], die sich ebenfalls mit der VIBN in kontinuierlichen Prozessen beschäftigen. Auch sie verwenden „Modelica“ als Programm zur Realisierung. Diese Ähnlichkeiten führen zu den bereits erwähnten Einschränkungen. [109]

Oppelt et al. [110] stellen einen Ansatz zur automatisierten Erstellung von Modellen aus dem Bereich der VIBN auf Basis des Anlagenbaus vor. Das Wissen für die Modelle wird in einer von einem Simulationsexperten erstellten Simulationsbibliothek hinterlegt, die anschließend vom Erstellungsalgorithmus genutzt werden kann. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung ganzer Anlagen speziell für die VIBN, wobei unterschiedliche Modellierungstiefen und eine werkzeugübergreifende Verwendbarkeit der Modelle nicht berücksichtigt werden. [110]

Lugaresi und Matta [111] stellen einen Ansatz zur automatisierten Erstellung von Simulationsmodellen für den Digitalen Zwilling vor. Dabei verwenden sie einen Ansatz, der aus Daten einer Maschine oder eines Produktionssystems automatisiert Simulationsmodelle erstellt. Diese Simulationsmodelle sind für Echtzeitanwendungen optimiert und basieren daher auf diskreten Zuständen. Sofern der Methode Echtzeitdaten zur Verfügung stehen, ist es möglich die erstellten Simulationsmodelle auf die Realität anzupassen. Durch die Verwendung von diskreten Zuständen für die Simulationen ist die Modellierungstiefe gering, was die Nutzbarkeit der Methode für Komponentenhersteller und deren Anwendungsfälle stark einschränkt. [111]

Ansätze aus dem Bereich der Prozessindustrie werden von Santillan Martinez et al. [60, 112] vorgeschlagen. In den beschriebenen Methoden wird ein simulationsbasierter Digitaler Zwilling parallel zum Lebenszyklus der Prozessanlage erstellt. Dazu werden verschiedene Informationsquellen, wie vorläufige Prozessplanung, Ausrüstungsdatenblätter, Rohrleitungs- und Instrumentierungspläne sowie 3D-Anlagenmodelle verwendet, um mit der vorgestellten automatisierten Modellerstellungsmethode Verhaltensmodelle zu erstellen. Die Informationen aus den technischen Unterlagen und Schemata werden mit Hilfe von vordefinierten Bausteinen aus einem speziellen Simulationswerkzeug umgesetzt. Nach der Erstellung der Modelle werden diese in die Anlage integriert, optimiert und anschließend für Online-Parameterschätzungen freigegeben. Aus der vorgestellten Literatur kommt dieser Ansatz den Anforderungen in dieser Arbeit am nächsten. Einschränkend ist jedoch die Fokussierung auf die kontinuierliche Fertigung und die Konzentration auf eine Disziplin in einer hohen Modellierungstiefe. [60, 112]

Bewertung der Ansätze aus dem domänenübergreifenden Stand der Wissenschaft und Technik

Für eine zusammenfassende Bewertung der vorgestellten domänenübergreifenden Ansätze für eine aufwandsarme und konsistente Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe werden diese in Tabelle 1 gegenüber den Anforderungen aus Kapitel 1 aufgetragen. Für jeden der Ansätze ist aufgeführt, ob er Wissenschaft oder Technik zugeordnet werden kann.

Tabelle 1: Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen und zur Abstraktion der Modellierungstiefe

	Wissenschaft (W) oder Technik (T)	A1	A2	A3
Kufner [46]	W	●	○	●
Thongnuch [34]	W	○	○	○
Scheifele [107]	W	●	○	●
Sommer et al. [59]	W	○	○	●
Barth und Fay [108]	W	○	○	○
Hoernicke et al. [109]	W	○	○	○
Oppelt et al. [110]	W	○	○	●
Lugaresi und Matta [111]	W	●	○	●
Santillan Martinez et al. [60, 112]	W	○	○	○

A1: Konsistenz in Modellen und Formaten über das gesamte Produktportfolio hinweg

A2: Hinreichend genaue Verhaltensmodellierung von Komponenten und Systemen in entsprechender Modellierungstiefe und unter Berücksichtigung zur Verfügung stehender Rechenzeit und Ressourcen

A3: Vollumfänglich aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen mithilfe automatisierter oder assistierter Methoden

2.2.2 Domänenspezifischer Stand der Wissenschaft und Technik

Für die Realisierung und Evaluierung des domänenübergreifenden Ansatzes zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen in entsprechender Modellierungstiefe werden relevante Verhaltensmodelle aller Komponenten in der Zieldomäne Vakuum-Handhabungstechnik benötigt. Nachfolgend werden Verhaltensmodelle aus dem Stand der Wissenschaft und Technik für die relevanten Vakuumkomponenten vorgestellt und anschließend bewertet.

Für Vakuumkomponenten liegen bereits einige Grundbausteine in Bibliotheken gängiger Simulationsprogramme wie z.B. „MATLAB“ und dessen Erweiterungen vor. Aber auch andere gängige Simulationsprogramme wie „SimulationX“, „Modelica“, „Siemens Simcenter“, „Modelon“ oder „MapleSim“ enthalten Verhaltensmodelle und Grundbausteine für Vakuumkomponenten. Verhaltensmodelle für Vakuumerzeuger liegen in solchen Simulationsprogrammen jedoch nicht vor. Gleiches gilt für Vakuumsauggreifer. Auch hierfür fehlt in gängigen Simulationsprogrammen ein entsprechender Baustein.

Eine Ausnahme hierfür stellt „FluidSIM“ dar. Dieses Tool ermöglicht die Erstellung und Simulationen von Schaltplänen in der Pneumatik, Elektrotechnik und Hydraulik. Ein großer Fokus von „FluidSIM“ liegt auf der Verwendung für Ausbildung, Lehre und Training. Neben der Berechnung von Zustandsänderungen und Schaltvorgängen kann der Anwender interaktiv in die Simulation eingreifen. In „FluidSIM“ ist eine Bibliothek für Vakuumkomponenten verfügbar, speziell mit pneumatischen Vakuumerzeugern und Vakuumsauggreifern. Eine detaillierte Erläuterung zu hinterlegten Gleichungen und Logik konnte nicht gefunden werden. Bei Betrachtung der Einstellmöglichkeiten für Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer fällt jedoch schnell die geringe Anzahl an Einstellmöglichkeiten auf. Bei Vakuumerzeugern ist dies beispielsweise das maximale Vakuum, der betriebsdruck für maximales Vakuum, der Luftverbrauch bei 600 kPa und der maximale Saugvolumenstrom. Ob es sich jedoch beispielsweise um eine einstufige oder mehrstufige Düse handelt oder um eine auf Volumenstrom oder Vakuum optimierte Düse kann nicht direkt eingestellt werden. Eine umfangreiche Simulation aller relevanten Effekte von Vakuumerzeugern

und Vakuumsauggreifern in Kombination mit Simulationsmodellen anderer Komponenten auch in anderen Disziplinen ist nur eingeschränkt möglich. Weiterhin weist „FluidSIM“ keine standardisierten Schnittstellen für den Austausch von Verhaltensmodellen mit anderen Simulationsprogrammen auf. [113, 114]

Neben gängigen Simulationsprogrammen aus der Technik gibt es auch wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der Verhaltensmodellierung von Bausteinen für Vakuumkomponenten befassen. Krichel [115] befasst sich mit der Komponentenmodellierung in industriellen Druckluftnetzen. Relevante Komponenten dieser Arbeit sind pneumatische Widerstände, Volumina und Schlauchleitungen. Zur Beschreibung des Verhaltens stellt sie komplexe Differentialgleichungen auf, die in Simulationsexperimenten ausgeführt und mit Messungen abgeglichen werden. Dabei ergeben sich gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation.

Eine weitere Arbeit, die sich mit relevanten Verhaltensmodellen für Vakuumkomponenten befasst, ist die von Fritz [68]. Er stellt Ansätze für Vakuumerzeuger, Schlauchleitungen und Vakuumsauggreifer vor. Dabei basieren seine Verhaltensmodelle auf einem Black-Box-Ansatz, da analytische Berechnungen in Voruntersuchungen für unzureichend befunden wurden. Für die Black-Box werden einige gemessene Kurven als Basis verwendet. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Aspekte der jeweiligen Komponente als Messkurven im Verhaltensmodell hinterlegt. Ausgeführt werden die Verhaltensmodelle als Lookup-Tabellen. Mit diesen werden gute Übereinstimmungen mit gemessenen Verläufen erzielt. Die Verhaltensmodelle können jedoch nur eingeschränkt eingesetzt werden, da Vermessungen spezifisch für alle Komponenten und diverse Effekte explizit ausgeführt werden müssen. Zudem folgen aus dem Black-Box-Ansatz starke Vereinfachungen, die mit gängigen Simulationsprogrammen nur eingeschränkt kompatibel sind.

Ein analytischer Ansatz zur Berechnung der Evakuierungszeit von Vakuumerzeugern mit angeschlossenem Systemvolumen wird in [116] vorgestellt. Unter der vereinfachenden Annahme eines Vakuum-Greifsystems ohne Leckage und einem konstanten thermodynamischen Saugvermögen des Vakuumerzeugers bezogen auf das anliegende Vakuum, kann die Evakuierungszeit des Vakuum-Greifsystems folgendermaßen berechnet werden [105, 116]:

$$t = \frac{V}{S_N} \cdot \ln \left(\frac{p_0}{p_v} \right) \quad (2.4)$$

Dabei hängt die Evakuierungszeit neben dem Systemvolumen V , dem Saugvermögen des Vakuumerzeugers bei Umgebungsdruck S_N und dem absoluten Umgebungsdruck p_0 zusätzlich vom gewünschten absoluten Zieldruck p_v ab. Aufgrund nicht beachteter Faktoren wie Leckage, veränderlicher Temperatur und Saugvermögen des Vakuumerzeugers werden in industriellen Anwendungen für die Evakuierungszeiten typischerweise Sicherheitsfaktoren von 1,2 oder höher verwendet [94].

Ein ähnlicher Ansatz wird von Jousten vorgestellt [105]. Auch dieser geht von einem System ohne Leckage aus. Er nimmt jedoch das Saugvermögen des Vakuumerzeugers nicht als konstant, sondern mit zunehmendem Vakuum linear abnehmend an. Dadurch ergibt sich der in Gleichung (2.5) aufgeführte Zusammenhang [105]. Dabei hängt der aktuell im System vorliegende Druck vom absoluten Umgebungsdruck p_0 , dem absoluten Zieldruck p_v , dem Saugvermögen des Vakuumerzeugers bei Umgebungsdruck S_N , dem Systemvolumen V und der verstrichenen Zeit t ab.

$$p(t) = [p_0 - p_v] \cdot \exp \left(-\frac{S_N}{V} \cdot t \right) + p_v \quad (2.5)$$

Speziell auf die Verhaltensmodellierung von Vakuumsauggreifern konzentriert sich Griebel [117]. Der Fokus seiner Arbeit liegt hierbei auf der Entwicklung und der Charakterisierung von fluidmechanischen nachgiebigen Aktoren, nicht aber auf der Modellierung des Verhaltens von Vakuumsauggreifern. Für die Verhaltensmodellierung von Vakuumsauggreifern ist vor allem die Betrachtung des Kraft-Weg-Verhaltens relevant.

Die Arbeit von Liu et al. [118] beschäftigt sich ebenso mit der Modellierung von Vakuumsauggreifern, die für Fensterreinigungsroboter eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Modellierung der Haltekraft in Abhängigkeit vom Vakuum und der Kontaktfläche. Allerdings wird das Verhalten eines Saugers während dem Evakuierungsvorgang nicht modelliert. Novotny und Horak [119] konzentrieren sich in ihrer Arbeit auf die Modellierung von Vakuumsauggreifern zum Greifen von Glas. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Modellierung der radialen und axialen Krafteinleitung für die Auslegung von Greifvorgängen auf Glas. Es werden verschiedene Vakuumniveaus berücksichtigt, nicht aber der eigentliche Evakuierungsprozess.

Bewertung der Ansätze aus dem domänenspezifischen Stand der Technik

Für eine zusammenfassende Bewertung der vorgestellten domänenspezifischen Ansätze für Verhaltensmodelle von Vakuumkomponenten werden diese in Tabelle 2 gegenüber den Anforderungen aus Kapitel 1 aufgetragen. Zudem ist aufgeführt, ob ein Ansatz der Wissenschaft oder Technik zugeordnet werden kann. Als Subkategorien für die Anforderung A4 werden die Komponentengruppen von Vakuum-Greifsystemen aus Abbildung 2 verwendet.

Tabelle 2: Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze für Komponenten von Vakuum-Greifsystemen

	Wissenschaft (W) oder Technik (T)	Vakuumerzeuger	Vakuumsauggreifer	Schalter und Systemüberwachung	Ventiltechnik	Filter und Verbindungen	Traversen und Befestigungselemente
„MATLAB“ [120]	T	○	○	●	○	○	○
„MATLAB“ [121]	T	○	○	●	○	○	○
„MATLAB“ [122]	T	○	○	○	●	○	○
„MATLAB“ [123]	T	○	○	○	○	●	●
„MATLAB“ [124]	T	○	○	○	○	●	●
„MATLAB“ [125]	T	○	○	○	●	○	○
„FluidSIM“ [113, 114]	T	●	●	●	●	●	○
Krichel [115]	W	○	○	○	○	●	○
Fritz [68]	W	●	●	○	○	●	○
Pfeiffer [116]	W	●	○	○	○	○	○
Jousten [105]	W	●	○	○	○	○	○
Griebel [117]	W	○	●	○	○	○	○
Liu et al. [118]	W	○	●	○	○	○	○
Novotny und Horak [119]	W	○	●	○	○	○	○

A4: Modellbildung und Bereitstellung von hinreichend genauen digitalen Bausteinen für relevante Vakuumkomponenten

2.3 Analyse der Randbedingungen

Für ein Konzept zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe und für eine domänenspezifische Modellbildung für die Vakuum-

2.3 Analyse der Randbedingungen

Handhabungstechnik bedarf es einer Analyse der Randbedingungen. Diese wird nachfolgend durchgeführt.

2.3.1 Einordnung von Komponentenherstellern in die industrielle Wertschöpfungskette

Unternehmen in der Automatisierungstechnik lassen sich grundsätzlich in drei Gruppen einteilen [53, 61]:

- *Produzierende Unternehmen:* Unternehmen, die Maschinen und Anlagen zur Herstellung von Produkten einsetzen.
- *Anlagenhersteller:* Unternehmen, die Maschinen und Anlagen zum Einsatz bei produzierenden Unternehmen herstellen.
- *Komponentenhersteller:* Unternehmen, die Komponenten und Subsysteme herstellen, die von den Anlagenherstellern in deren Maschinen und Anlagen verwendet werden.

Die Kombination dieser Gruppen wird auch als industrielle Wertschöpfungskette bezeichnet, wobei es sich bei der Einordnung um eine übergeordnete Gruppierung handelt. Auch Unternehmen der Gruppe der Komponentenhersteller stellen nicht alle Teile ihrer Produkte komplett selbstständig aus Primärrohstoffen her. Häufig kommen hier noch Lieferanten ins Spiel, welche Teilkomponenten wie Schrauben, oder Sensoren bereitstellen. Generell sind solche Konstrukte unter dem Begriff der Komponentenhersteller zusammengefasst. Ähnliches gibt es auch in der Gruppe der Anlagenhersteller. Teilweise liefern diese ihre Maschinen und Anlagen an die produzierenden Unternehmen. Teilweise gibt es jedoch auch Integratoren, die mehrere Maschinen unterschiedlicher Hersteller zu einer großen Anlage kombinieren und diese dann dem produzierenden Unternehmen übergeben. Auch solche Konstrukte sind in der Gruppe der Anlagenhersteller zusammengefasst. Die Gruppen der industriellen Wertschöpfungskette sind in Abbildung 4 links dargestellt.

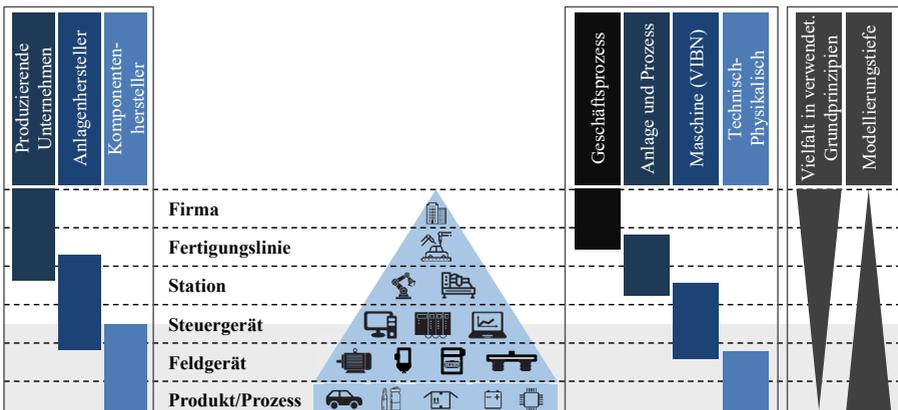


Abbildung 4: Einordnung von Unternehmensgruppen der industriellen Wertschöpfungskette anhand der klassischen Automatisierungspyramide angelehnt an [44]

Dabei wird über den Balken der jeweiligen Unternehmensgruppe deren Kernkompetenz entlang der Automatisierungspyramide aufgetragen [12, 126]. Dies verdeutlicht, dass die Kernkompetenz von produzierenden Unternehmen vorzugsweise in den oberen Ebenen der Automatisierungspyramide

verortet werden kann. Die Kernkompetenz von Komponentenherstellern liegt hingegen meist auf den unteren Ebenen der Automatisierungspyramide, bevorzugt der Steuergeräte- und Feldgeräteebene sowie der Interaktion mit dem Produkt oder Prozess.

Im rechten Bereich von Abbildung 4 sind unterschiedliche Gruppen von Simulationen sowie die allgemeine Vielfalt der verwendeten physikalischen Grundprinzipien und die relevante Modellierungstiefe dargestellt. Die unterschiedlichen Ansätze zur Simulation für verschiedene Anwendungsfälle lassen sich folgenden vier Gruppen zuordnen [46, 127, 128]:

- *Geschäftsprozess*: Simulationen mit sehr hoher Abstraktion und einer Vielzahl modellierter Prozesse, die bei der Betrachtung ganzer Geschäftsprozesse einzelne Komponenten und teilweise ganze Maschinen zu größeren Systemen abstrahieren. Der Fokus liegt auf einer makroskopischen Analyse ganzer Unternehmen.
- *Anlage und Prozess*: Simulationen dieser Gruppe betrachten viele Komponenten sehr abstrahiert. Der Fokus liegt jedoch nicht auf ganzen Unternehmen, sondern auf Produktionsanlagen oder deren Verbund zu Produktionsprozessen.
- *Maschine (VIBN)*: Allgemein fokussiert sich die Gruppe der Maschinensimulationen zwar auf das Zusammenspiel einzelner Komponenten hin zur Funktionsweise einer Maschine, die detaillierte Funktionalität der einzelnen Komponenten ist jedoch nicht Kernaspekt dieser Gruppe.
- *Technisch-Physikalisch*: Die vierte Gruppe fokussiert sich auf die einzelnen Komponenten oder einzelnen Funktionsprinzipien. Dabei ist die abgebildete Vielfalt an Funktionen oder Prozessen einer solchen Simulation zumeist stark eingeschränkt. Ein Beispiel ist die Strömungssimulation der Venturidüse eines pneumatischen Vakuumerzeugers. Diese betrachtet das technisch-physikalische Verhalten der Venturidüse, bildet jedoch keinerlei weitere Funktionalität des pneumatischen Vakuumerzeugers ab.

Der rechte Abschnitt in Abbildung 4 hebt die soeben beschriebene Einordnung anhand zweier Kriterien hervor [23, 92]:

- *Vielfalt in verwendeten Grundprinzipien*: Der nach unten abnehmende Balken, veranschaulicht die Quantität unterschiedlicher Funktionalitäten der einzelnen Ebenen. Betrachtet man ein gesamtes Produktionsunternehmen mit diversen Produktionslinien, werden in den unterschiedlichsten Anlagen und Maschinen viele verschiedene Grundprinzipien eingesetzt. Beispiel hierfür ist ein Unternehmen oder eine Produktionslinie, in denen u. a. Roboter mit Schweißzangen, Roboter mit Greifsystemen, Bearbeitungszentren und Lackierstationen eingesetzt werden. Es werden also unterschiedlichste Komponenten und Prozesse mit sehr vielfältigen Funktionsweisen verwendet. Zum Vergleich kommt bei der Betrachtung einer einzelnen Komponente oder eines einzelnen Prozesses auf der Feldgeräte- oder Produkt-/Prozessebene eine deutlich geringere Anzahl an Grundprinzipien zum Einsatz.
- *Modellierungstiefe (MDT)*: Diese beschreibt, wie detailliert ein Effekt und seine Wechselwirkungen in einem Verhaltensmodell abgebildet ist. Auf den oberen Ebenen der Automatisierungspyramide wird häufig eine makroskopische Betrachtung der Assets durchgeführt. Die entsprechende Modellierungstiefe der einzelnen Betrachtungsgegenstände, wie Fertigungslinien oder Anlagen, ist gering. Am unteren Ende der Pyramide ist die Quantität der betrachteten Grundprinzipien hingegen stark verringert, dafür werden jedoch sehr detaillierte Betrachtungen einzelner Vorgänge durchgeführt. Die entsprechende Modellierungstiefe ist hier sehr hoch.

Ein alternativer Begriff, der teilweise synonym zur Modellierungstiefe verwendet wird, ist der Detaillierungsgrad [48]. Dabei wird der Begriff Detaillierungsgrad in dieser Arbeit als verfeinerte Unterscheidung zur Modellierungstiefe verwendet. Der Detaillierungsgrad beschreibt die detaillierte

2.3 Analyse der Randbedingungen

Ausprägung einzelner physikalischer Effekte im Rahmen der jeweiligen Modellierungstiefe. Komplementär zur Modellierungstiefe ist der Abstraktionsgrad [48].

Die Überdeckung der Einordnung des Komponentenherstellers mit den allgemeinen Kriterien zur Einordnung von Modellen in Abbildung 4 ist grau hinterlegt. Der Fokus für Komponentenhersteller liegt demnach auf einigen wenigen Grundprinzipien in großer Modellierungstiefe, die sich hauptsächlich durch technisch-physikalische Simulationen und Maschinensimulationen abbilden lassen.

2.3.2 Anlagenlebenszyklus

Neben einer vertikalen Einordnung des Komponentenherstellers in die industrielle Wertschöpfungskette kann dieser auch horizontal eingeordnet werden. Für eine solche Einordnung wird häufig der zeitliche Ablauf zur Beschreibung von Maschinen und Anlagen in der Automatisierungstechnik herangezogen, der sogenannte Anlagenlebenszyklus. Dieser stellt ein idealisiertes Phasenmodell zur Beschreibung der typischen aufeinanderfolgenden Phasen im Leben einer solchen Maschine oder Anlage dar. [129, 130]

Für die genauen Phasen des Anlagenlebenszyklus gibt es in der Literatur viele verschiedene Ansätze. Um ein möglichst allgemeingültiges Phasenmodell heranziehen zu können, wurde eine detaillierte Literaturrecherche zum Anlagenlebenszyklus durchgeführt. Hierbei wurden mithilfe von sechs Suchbegriffen insgesamt 859 Fachartikel betrachtet und 175 relevante Artikel identifiziert. Als bestmögliche Schnittmenge dieser Analyse konnte das in Abbildung 5 oben dargestellte Phasenmodell identifiziert werden.

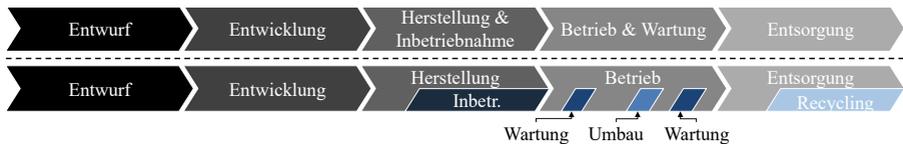


Abbildung 5: Generische (oben) und detailliertere (unten) Phasen des Anlagenlebenszyklus angelehnt an [131]

Im oberen Bereich von Abbildung 5 sind die fünf identifizierten Überphasen, welche als gute Schnittmenge aus der Literatur extrahiert werden konnten, dargestellt. Dabei umfassen die Namen mancher Phasen auch mehr als einen Begriff, wie beispielsweise Herstellung und Inbetriebnahme um die Anzahl der Überphasen so gering wie möglich zu halten. Die fünf Überphasen dienen hauptsächlich der makroskopischen Einordnung unterschiedlicher Abschnitte eines solchen Zyklus. Wird hingegen eine detailliertere Betrachtung bestimmter Abschnitte des Zyklus benötigt, können Unterphasen in der jeweiligen Überphase eingeführt werden, wie im unteren Bereich von Abbildung 5 dargestellt. Hierdurch können eine oder mehrere Detaillierungen in eine solche Überphase eingefügt werden. In diesem Kontext sei darauf verwiesen, dass nicht nur die Namen der Überphase in Unterphasen unterteilt werden können, wie dies bei der Darstellung von Herstellung und Inbetriebnahme erfolgt ist. Es können zusätzliche Unterphasen eingefügt werden, wie dies für Betrieb und Wartung ausgeführt ist. Für weiterführende Informationen und dem detaillierten Prozess der Literaturrecherche sei auf [131] verwiesen.

2.3.3 Relevante Standards für Digitale Zwillinge

Ein möglicher Standard für Digitale Zwillinge, der aktuell im Forschungsumfeld entwickelt wird und einen industrieübergreifenden Ansatz verfolgt, ist die Verwaltungsschale (engl.: Asset Administration Shell, AAS) [5, 132, 133]. Sie wurde vom Konsortium „Plattform Industrie 4.0“ eingeführt und wird zum aktuellen Zeitpunkt kontinuierlich weiterentwickelt [64]. Die AAS ist eine

standardisierte digitale Darstellung eines Assets. Diese kann Modelle und Daten verschiedener Aspekte eines Assets enthalten und über standardisierte Schnittstellen zur Verfügung stellen. Jede Instanz eines Assets verfügt in der Regel über ihre eigene AAS. Dabei kann eine AAS viele verschiedene Teilmodelle enthalten. Diese Teilmodelle werden verwendet, um unterschiedliche Informationen bereitzustellen, z. B. technische Daten, Herstellerinformationen oder Prozessdaten. Zu diesem Zweck gibt es verschiedene Teilmodellelemente, wie Eigenschaften, Referenzelemente oder Dateien, die dort gespeichert werden können. Für detailliertere Informationen sei auf weiterführende Literatur verwiesen. [21, 33, 64, 134]

Ein zentraler Punkt im Kontext der AAS ist die semantisch eindeutige Bereitstellung von Informationen. Hierfür kann neben weiteren Standards auch „ECLASS“ verwendet werden. „ECLASS“ ist ein in der Industrie weit verbreiteter Standard. Er ist ISO/IEC-normkonform (International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission) und kann durch 45.000 Produktklassen und über 19.000 eindeutige Merkmale einen Großteil möglicher Waren und Dienstleistungen abbilden. Dabei verfügt jedes Element des Standards über einen global eindeutigen Bezeichner, auch International Registration Data Identifier (IRDI) genannt. Durch die semantisch eindeutige Klassifizierung in der AAS mithilfe von „ECLASS“ wird eine eindeutige Informationsübertragung über Unternehmensgrenzen hinweg möglich [21]. Dies ermöglicht das automatisierte Einlesen von Daten in Anwendungen und Maschinen. Um neben Merkmalen auch die Einheiten der Merkmale maschinenlesbar zu beschreiben, kann der Standard Units Markup Language (UnitsML) eingesetzt werden [135]. In diesem Standard sind relevante Maßeinheiten in einem Schema des Standards XML (eXtensible Markup Language) abgebildet. Dies ermöglicht sowohl die eindeutige Darstellung als auch ein einfaches Umrechnen von Werten in andere Maßeinheiten. [21, 33, 136]

Darüber hinaus gibt es weitere Standards im Kontext des Digitalen Zwillinges, wie beispielsweise Automation Markup-Language (AML), Product-Lifecycle-Management (PLM) Systeme oder Ähnliche [137]. Jedoch werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet, da die AAS insbesondere für die unternehmensübergreifende Verwendung von Digitalen Zwillingen sehr vielversprechend ist. [138].

2.3.4 Verhaltensmodelle in Automatisierungssystemen

Verhaltensmodelle sind elementare Bestandteile von Digitalen Zwillingen und von zentraler Bedeutung für Komponentenhersteller. Dabei gibt es eine große Zahl verschiedener Arten von Verhaltensmodellen [69]. Deren Unterscheidung ist vor allem für die durchgängige Verwendung von Verhaltensmodellen im Digitalen Zwilling ausschlaggebend. Eine mögliche Einordnung kann anhand der folgenden Kriterien vorgenommen werden [69, 91]:

- *Modellierungsumfang*: Beschreibt den Umfang der Assets in einem Verhaltensmodell. Dieser kann von der individuellen Komponente bis hin zu einer gesamten Produktionsstraße reichen.
- *Modellierungsbreite*: Beschreibt die Anzahl der Disziplinen, die in einem Verhaltensmodell modelliert sind. Verhaltensmodelle können Assets in einer einzelnen oder in mehreren Disziplinen modellieren.
- *Modellierungstiefe*: Definiert das Abstraktionslevel der Modellierung eines Verhaltensmodells. Die Beschreibung eines Assets durch ein Verhaltensmodell kann von sehr abstrahiert oder idealisiert bis zu spezifisch und präzise variieren.
- *Art des Verhaltens*: Umfasst die Eigenschaft einer möglichen Fehlermodellierung. Dabei kann das Verhalten in einem Verhaltensmodell rein fehlerfrei oder fehlerbehaftet modelliert sein.

Für die Einordnung von Verhaltensmodellen auf Basis der genannten Kriterien werden Ansätze aus der Literatur verwendet. Der Modellierungsumfang kann nach dem Referenzarchitekturmodell

2.3 Analyse der Randbedingungen

Industrie 4.0 (RAMI 4.0) in die Stufen Produkt, Feldgerät, Steuerungseinheit, Station (Maschine), technische Anlage, Unternehmen und vernetzte Welt eingeteilt werden [139]. Für die Einordnung der Modellierungsbreite kann die typische Einteilung für mechatronische Systeme verwendet werden. Diese umfasst neben den Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software eine Kategorie für weitere Disziplinen, welche je nach Anwendungsfall auch Fluidik oder Magnetismus umfassen kann [140]. Weniger gängig ist die Einteilung von Verhaltensmodellen nach deren Modellierungstiefe. Hierfür wird in dieser Arbeit die Einteilung aus [69] verwendet, welche Ergebnis einer ausführlichen Literaturrecherche ist. Diese verwendet nachfolgende fünf Stufen:

- *Diskretes Verhalten (MDT 1)*: Abstraktion auf das logische Verhalten des Systems ohne Berücksichtigung des zeitlichen Verhaltens. Das Verhaltensmodell reagiert auf Eingangssignale ohne Zeitverzögerung auf die gleiche Weise gleich wie das System in der Realität, nach etwaigen transienten Vorgängen.
- *Diskretes zeitliches Verhalten (MDT 2)*: Abstraktion auf das logische Verhalten des Systems unter Berücksichtigung des zeitlichen Verhaltens. Das Verhaltensmodell reagiert auf Eingangssignale mit der entsprechenden Zeitverzögerung auf die gleiche Weise wie das System in der Realität nach etwaigen transienten Vorgängen.
- *Kontinuierliches vereinfachtes physikalisches Verhalten (MDT 3)*: Angleichung durch kontinuierliche Funktionen, die Zwischenzustände modellieren, aber ohne die Verwendung von Differentialgleichungen.
- *Physikalisch nicht-räumliches Verhalten (MDT 4)*: Kontinuierliche Modellierung von physikalischem Verhalten mit gewöhnlichen Differentialgleichungen (engl.: ordinary differential equation, ODE) ohne Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung.
- *Physikalisch räumliches Verhalten (MDT 5)*: Kontinuierliche Modellierung des physikalischen Verhaltens im 3D-Raum mittels partieller Differentialgleichungen von Mehrkörpersimulationen oder Finite Elemente Methoden (FEM)-Simulationen.

Ebenso kann die Art des Verhaltens eines Verhaltensmodells in Stufen klassifiziert werden. Auch hierfür wird die in [69] vorgeschlagene Einteilung verwendet:

- *Normalverhalten*: Modellierung des Normalverhaltens ohne Berücksichtigung von Fehlereinflüssen oder Fehlerfällen.
- *Fehlerverhalten*: Modellierung des Verhaltens einer Anlage inklusive möglicher auftretender Anlagenfehler. Diese können auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden. Auslöser kann ein manueller Eingriff, z. B. über zusätzliche Eingänge oder eine Benutzerschnittstelle sein. Alternativ sind Fehlerwahrscheinlichkeiten für verschiedene Betriebszustände möglich.

Auf Basis der vier vorgestellten Kriterien mit den entsprechenden Stufen kann eine Klassifikation der Verhaltensmodelle durchgeführt werden. Visualisiert sind die Kriterien und deren Stufen in Abbildung 6.

Grundsätzlich sind Verhaltensmodelle aller möglichen Kombinationen aus Modellierungstiefe, Modellierungsbreite, Modellierungsumfang und Art des Verhaltens möglich. Dabei gibt es jedoch Kombinationen, die weniger sinnvoll sind als andere. Vor allem bei großen Modellierungstiefen mehrerer Disziplinen mit einem großen Modellierungsumfang kann der Modellierungsaufwand sowie die Simulationszeit schnell unverhältnismäßig ansteigen. Besonders herausfordernd ist die Modellierungstiefe physikalisches räumliches Verhalten (MDT 5). Diese Modellierungstiefe kommt beispielsweise bei FEM-Simulationen zum Einsatz. Dabei werden jedoch häufig nur geringe Umfänge und eine begrenzte Anzahl an Disziplinen betrachtet, um Modellierungsaufwand und Simulationszeit möglichst gering zu halten. Für die Betrachtung ganzer Komponenten, Systeme oder

Anlagen eignet sich aus diesem Grund vor allem die Modellierungstiefen diskretes Verhalten (MDT 1), diskretes zeitliches Verhalten (MDT 2), kontinuierliches vereinfachtes physikalisches Verhalten (MDT 3) und physikalisch nicht-räumliches Verhalten (MDT 4). [69]

Nachfolgend werden die Zahlen der jeweiligen Modellierungstiefen anstatt deren Namen verwendet.

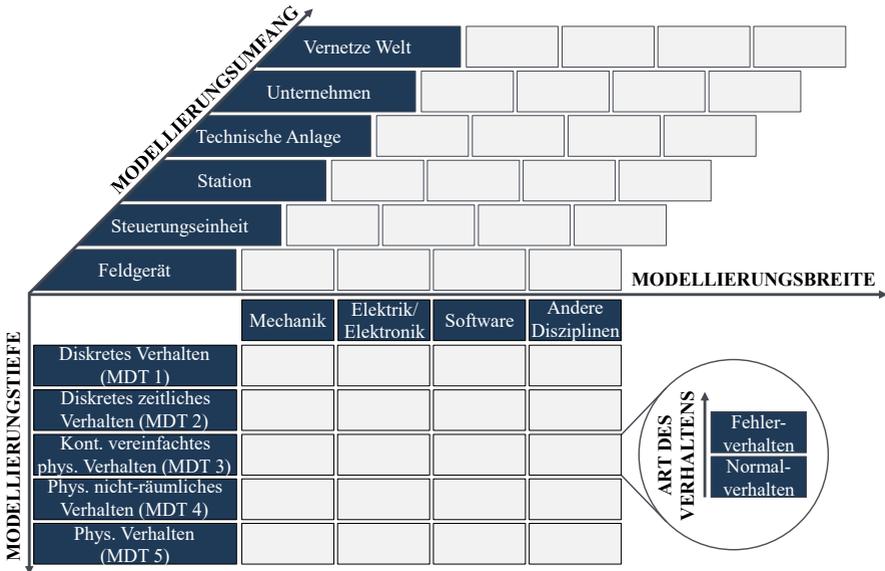


Abbildung 6: Strukturierung von Verhaltensmodellen angelehnt an [69]

2.3.5 Grundlegende Ansätze zur Erstellung von Verhaltensmodellen

Zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Erstellung von Verhaltensmodellen. Für eine automatisierte Erstellung solcher Verhaltensmodelle gibt es nach Kufner [141] grundlegend drei mögliche Vorgehensweisen: Simulationsgestütztes Engineering, Verwendung einer Bibliothek und die Verwendung von Engineeringdokumenten. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Möglichkeiten zur Erstellung von Verhaltensmodellen und deren Bewertung

	Simulations- gestütztes Engineering	Verwendung einer Bibliothek	Verwendung von Engineering- dokumenten
Integrationsfähigkeit in bestehende Entwicklungsprozesse	○	●	●
Maximal mögliche Modellierungstiefe der Verhaltensmodelle	●	●	○
Initialer Aufwand	○	○	●

2.3 Analyse der Randbedingungen

Beim simulationsgestützten Engineering werden konstruktionsbegleitend Simulationsmodelle der entwickelten Komponenten erstellt und durchgängig im Entwicklungsprozess integriert. Die zweite Möglichkeit verwendet zur Erstellung der Verhaltensmodelle eine Bibliothek. Aus einer oder mehreren Bibliotheken können die Verhaltensmodelle manuell, assistiert oder automatisiert erstellt werden. Ebenso automatisiert erstellt werden die Modelle bei der dritten Möglichkeit. Quelle hierfür ist jedoch keine Verhaltensmodellbibliothek, sondern bestehende Engineeringdokumente aus dem Entwicklungsprozess.

Zur Bewertung der drei Möglichkeiten werden drei Kriterien herangezogen. Das erste Kriterium ist die Integrationsfähigkeit in den bestehenden Entwicklungsprozess. Je einfacher eine Methodik in bestehende Prozesse integriert werden kann, desto höher ist die Akzeptanz der Methode im Unternehmen. Das zweite Kriterium ist die maximal erreichbare Modellierungstiefe. Dies ist vor allem für Komponentenhersteller relevant, da diese für einige Anwendungsfälle Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 benötigen. Als drittes Kriterium wird der initiale Aufwand für die Realisierung der jeweiligen Möglichkeit bewertet.

Die unterschiedlichen Kriterien veranschaulichen gut, dass es bei allen drei Möglichkeiten Vor- und Nachteile gibt. Insbesondere Möglichkeit eins hat durch potenzielle Änderungen im Entwicklungsprozess Probleme mit der Akzeptanz und dem Initialen Aufwand. Diese Möglichkeit wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet. Von zentraler Relevanz für Komponentenhersteller ist zudem die Möglichkeit, Verhaltensmodelle mit großer Modellierungstiefe erstellen zu können. Dies schließt Möglichkeit drei aus. Eine Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling bei Komponentenherstellern baut daher im Idealfall auf einer Verhaltensmodellbibliothek auf.

Dabei stellt die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek einen signifikanten Anteil des initialen Aufwands dar. Dieser initiale Aufwand ist stark von der Variantenvielfalt der abgebildeten Komponenten abhängig. Bei geringer Variantenvielfalt hält sich der initiale Aufwand in Grenzen. Sobald diese jedoch steigt, kann der initiale Aufwand schnell unbeherrschbar werden [33, 46]. Eine nähere Betrachtung für die Abschätzung dieses initialen Aufwands erfolgt auf Basis der Betrachtung des Produktportfolios eines Komponentenherstellers. Dieses besteht häufig aus unterschiedlichsten Komponenten, die entweder direkt oder als Kombination mehrerer Komponenten in Form von Subsystemen vertrieben werden. Die vertriebenen Komponenten und Subsysteme können über der Achse des Modellierungsumfangs in Abbildung 6 auf den untersten beiden Ebenen eingeordnet werden. Diese Einordnung ist in Abbildung 7 dargestellt.

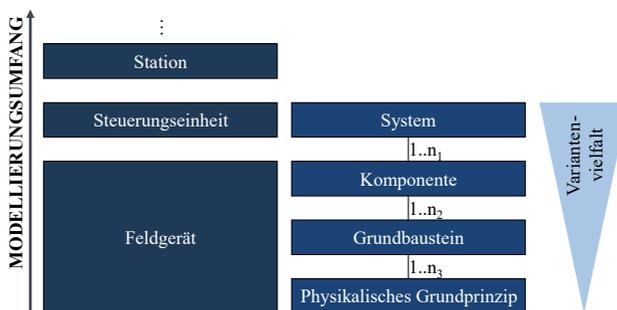


Abbildung 7: Einordnung von Komponenten, Systemen und deren Bestandteile über dem Modellierungsumfang

Betrachtet man die Komponenten noch detaillierter, lässt sich feststellen, dass diese aus vielen ähnlichen Grundbausteinen bestehen. Diese Grundbausteine, teilweise selbst entwickelt, teilweise

von Lieferanten bezogen, basieren für einzelne Unternehmen häufig auf ähnlichen physikalischen Grundprinzipien. Der Vorteil durch die Analyse bis auf die physikalischen Grundprinzipien wird im rechten Bereich der Abbildung 7 ersichtlich. Eine Variantenvielfalt, die bei der betrachteten Anzahl von Komponenten vierstellige Werte erreichen kann, ermöglicht nahezu unendlich viele Kombinationsmöglichkeiten, wenn aus diesen Komponenten Systeme zusammengestellt werden. Die große Anzahl an Komponenten hingegen besteht aus einer deutlich geringeren Anzahl an Grundbausteinen, da ähnliche und gleiche Grundbausteine häufig in mehreren Komponenten wiederverwendet werden. Noch geringer wird die Variantenvielfalt, wenn man auf die Ebene der physikalischen Grundprinzipien wechselt.

Zur Veranschaulichung wird dieser Zusammenhang mit konkreten Zahlen aus dem über die Internetseite recherchierbaren Produktportfolio eines repräsentativen Komponentenherstellers (Stand 01.03.2022) untermauert [142]. Die Anzahl der einzelnen Komponentengruppen ist in Tabelle 4 angegeben. Die Gesamtzahl der öffentlich zugänglichen Komponenten des betrachteten Produktportfolios liegt im vierstelligen Bereich. Die Anzahl möglicher unterschiedlicher Systeme, die aus diesen Komponenten erstellt werden können, erreicht den sechsstelligen Variantenbereich oder darüber hinaus.

Tabelle 4: Analyse des Produktportfolios eines Komponentenherstellers über dessen Homepage

Komponentengruppe	Anzahl an Komponenten
Vakuumerzeuger	667
Schalter und Systemüberwachung	69
Ventiltechnik	116
Filter und Verbindungen	274
Traversen und Befestigungselemente	575
Vakuumsauggreifer	1.700
Gesamt	3.401

Zentrale Komponenten eines Vakuum-Greifsystems sind Vakuumerzeuger [68]. Insbesondere pneumatische Vakuumerzeuger werden aufgrund zahlreicher Vorteile wie schneller Regelbarkeit und verschleißfreiem Betrieb sowie geringem Komponentengewicht (im Vergleich zu elektrischen Vakuumerzeugern) häufig eingesetzt [143, 144]. Pneumatische Vakuumerzeuger machen mit insgesamt 416 Stück 62% der Komponenten aus der Kategorie Vakuumerzeuger und 12% der Gesamtmenge der Komponenten des analysierten Produktportfolios aus. Solche pneumatischen Vakuumerzeuger werden für die weitere Analyse ausgewählt, da sie eine Besonderheit im Produktportfolio darstellen. Die Komplexität dieser Komponenten variiert von einer rein mechanischen und fluidischen Struktur, die nur aus einer Venturidüse besteht, bis hin zu einer komplizierten mechatronischen Struktur mit mechanischen, fluidischen, elektrischen und softwaretechnischen Aspekten. Der hohe Anteil der pneumatischen Vakuumerzeuger am gesamten Produktportfolio, ihre besonderen Merkmale und ihre besondere Relevanz für Vakuum-Greifsysteme, machen diese Unterkategorie zu einem idealen Beispiel für eine eingehendere Untersuchung.

Da die Fluidik eine der bestimmenden Disziplinen der pneumatischen Vakuumerzeuger ist, wird das fluidische Verhalten, insbesondere mittels Fluidschaltplan, näher untersucht. Die Anzahl der verschiedenen Fluidschaltpläne und die Anzahl der verschiedenen Elemente hinsichtlich ihrer Unter- und Hauptkategorien werden analysiert, was zu den in Tabelle 5 aufgeführten Zahlen führt.

Die betrachteten pneumatischen Vakuumerzeuger haben insgesamt 92 unterschiedliche Fluidschaltpläne. Die in diesen Schaltplänen verwendeten Elemente können in Grundbausteine und physikalische Grundprinzipien unterteilt werden. Grundbausteine beschreiben dabei die grundlegende Funktionalität eines Bausteins. Beispielsweise wird ein 2/2-Wegeventil als ein Grundbaustein gezählt. Dieser kommt in den Fluidschaltplänen in unterschiedlichen Konfigurationen zum Einsatz, beispielsweise mit elektrischer oder pneumatischer Ansteuerung, mit oder ohne

2.3 Analyse der Randbedingungen

Federrückstellung. Die beschriebenen 92 Fluidschaltpläne können durch 14 dieser Grundbausteine aufgebaut werden. Betrachtet man die Grundbausteine detaillierter, sieht man, dass einige auf ähnlichen Grundprinzipien basieren. Ein Beispiel hierfür sind Ventile. Diese kommen beispielsweise in der Ausführung 2/2-Wegeventil, 3/2-Wegeventil und 5/3-Wegeventil in den Fluidschaltplänen zum Einsatz. Grundlegend basieren all diese Ventile auf dem gleichen Prinzip und werden nur durch periphere Bausteine ergänzt. Durch diesen Zusammenhang lassen sich die 92 Fluidschaltpläne und damit die 416 pneumatischen Vakuumerzeuger auf nur sieben physikalische Grundprinzipien zurückführen.

Tabelle 5: Analyse von pneumatischen Vakuumerzeugern

Komponentengruppe	Anzahl an Komponenten
Pneumatische Vakuumerzeuger	416
Fluidschaltpläne	92
Grundbausteine	14
Physikalische Grundprinzipien	7

Dieser Zusammenhang lässt sich in ähnlicher Größenordnung auch für andere Produktkategorien des betrachteten Produktportfolios beobachten. Es kann festgehalten werden, dass der betrachtete Komponentenhersteller ein breites Produktportfolio auf einer geringen Anzahl von Grundbausteinen und physikalischen Grundprinzipien aufbaut.

2.3.6 Systemmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen

Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 haben neben vielen Vorteilen auch Nachteile. Ein Nachteil sind die getroffenen Vereinfachungen während der Abstraktion. Allerdings haben diese nur begrenzten Einfluss auf die Verhaltensmodelle der jeweiligen Komponenten. Sobald jedoch mehrere vereinfachte Verhaltensmodelle einzelner Komponenten zu einem Verhaltensmodell eines Systems zusammengefügt werden, ändert sich dies.

Verdeutlicht werden soll dieser Zusammenhang mit zwei verschiedenen Versuchsaufbauten. Variante 1 besteht aus einem pneumatischen Vakuumerzeuger, einem Tank und einem Drucksensor. Variante 2 hat den identischen Versuchsaufbau, der Tank wird jedoch durch einen Schlauch ersetzt. Der Tank beziehungsweise Schlauch repräsentieren hierbei das innere Volumen eines Vakuum-Greifsystems. Beide Varianten sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Der Tank hat ein Volumen von 0,4l, der Schlauch, mit einem Innendurchmesser von 4 mm, hat eine Länge von 31,83 m. Damit sind die inneren Volumina von Schlauch und Tank identisch.

Bei gleichem pneumatischem Vakuumerzeuger errechnet Gleichung (2.4) die identische Evakuierungszeit für beide Varianten. Gleichung (2.4) kann der Modellierungstiefe 2 zugeordnet werden, da diese stark vereinfacht lediglich ein zeitliches Verhalten beschreibt.

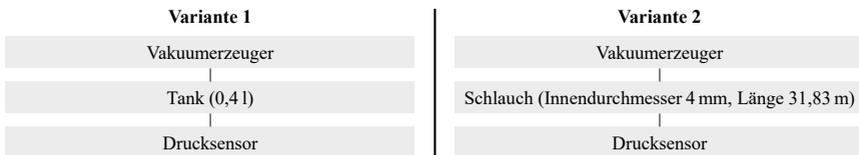


Abbildung 8: Versuchsaufbau mit zwei Varianten für ein identisches Systemvolumen

Im Gegensatz zur Gleichung (2.4) besteht in der Realität jedoch eine große Diskrepanz zwischen den zwei Evakuierungszeiten. Für einen Evakuierungsvorgang bis 300 mbar, abs bei Umgebungsdruck 1000 mbar, abs dauert es bei dem gewählten Vakuumerzeuger (SBP 20 [145]) für den Tank 0,36 s.

Für den Schlauch hingegen 2,32 s, rund 6,4-mal länger. Diese Diskrepanz wird hauptsächlich durch den Strömungswiderstand des Schlauchs, der in der abstrahierten Gleichung (2.4) nicht berücksichtigt wird, hervorgerufen.

Neben dem Strömungswiderstand gibt es viele weitere Effekte, die in den unterschiedlichen Modellierungstiefen 1 bis 3 nicht berücksichtigt sind. Für hinreichend genaue Verhaltensmodelle von Systemen ist die Modellierung in Modellierungstiefe 4 zu empfehlen und bei Bedarf erst vom Verhaltensmodellen des Gesamtsystems eine Abstraktion vorzunehmen.

2.3.7 Grundbausteine unterschiedlicher Detaillierung

Liegen die Bausteine für die Erstellung von Systemmodellen in Modellierungstiefe 4 vor, stellt diese eine grobe Einordnung für die hinterlegten Gleichungen im Verhaltensmodell dar. Es gibt jedoch auch in der Modellierungstiefe 4 einen Spielraum, wie detailliert ein bestimmter Aspekt modelliert werden soll. Zur Veranschaulichung wird Abbildung 9 herangezogen, welches die Modellierung eines 3/2-Wegeventils mit elektrischer Ansteuerung in zwei möglichen Varianten beschreibt. Beide Modellierungen sind dabei der Modellierungstiefe 4 zugeordnet. Die linke Modellierung konzentriert sich stark auf das fluidische Verhalten. Dabei ist die Ansteuerung vereinfacht durch einen Spannungssensor modelliert. Liegen beispielsweise +24 V gegenüber GND an, schaltet das 3/2-Wegeventil und schließt bzw. öffnet die Verbindungen.

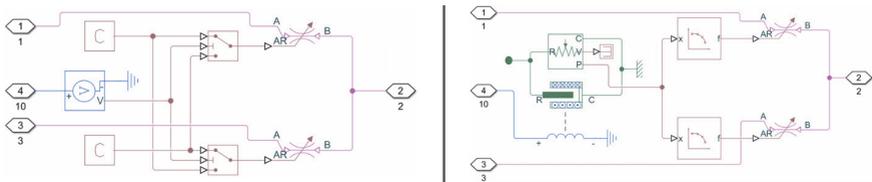


Abbildung 9: Grundbaustein eines 3/2-Wegeventils in vereinfachter (links) und detaillierter (rechts) Ausführung für Modellierungstiefe 4

Anders verhält sich die detaillierte Ausführung, rechts in Abbildung 9 dargestellt. Hier sorgt ein Stromfluss, hervorgerufen durch eine Spannung, für ein magnetisches Feld in der Spule, welches wiederum für eine Bewegung des Ankers sorgt, der dadurch die fluidischen Kanäle öffnet bzw. schließt. Je nach Anforderungen im Unternehmen können Grundbausteine durch solche Details in der gleichen Modellierungstiefe unterschiedlich ausgeführt sein.

2.3.8 Schaltpläne als Quelle von Primärinformationen

Der Aufbau von Komponenten in den einzelnen Disziplinen kann in unterschiedlicher Form beschrieben werden. Eine häufig verwendete Beschreibungsform sind Schaltpläne. Diese kommen typischerweise in den Disziplinen Elektrik und Fluidik zum Einsatz.

Es gibt viele Schaltpläne, die mit Symbolen nach bestimmten Normen erstellt wurden. Ein Beispiel für eine solche Normen ist die DIN ISO 1219 für Fluidschaltpläne [146]. Teilweise werden in Unternehmen jedoch auch unternehmensspezifische Symbole in den Schaltplänen verwendet.

Die Symbole in solchen Schaltplänen beschreiben neben dem Typ des Bausteins auch detaillierte Merkmale über dessen Ausführung. Solche Merkmale können beispielsweise die Art der Ansteuerung oder die Ruhestellung des Fluidelements sein. Bei Ventilen wird allen voran zwischen der Ruhestellung normal geschlossen (NC) und normal geöffnet (NO) unterschieden. Mögliche Merkmale und die Vielfalt der Symbole eines Bausteins sind in Abbildung 10 am Beispiel eines 2/2-Wegeventils dargestellt. In dieser Abbildung wird die Art der Ansteuerung variiert. Diese kann elektrisch, mechanisch oder pneumatisch betätigt sein. Darüber hinaus kann das Ventil pneumatisch

2.3 Analyse der Randbedingungen

vorgesteuert, mit oder ohne manuelle Zusatzbetätigung, sowie federrückgestellt sein. Dies zeigt, wie groß die Varianz bei einem einfachen Baustein allein durch unterschiedliche Ansteuerungsmethoden sein kann. Dabei kommen die Details solcher Bausteine nicht nur bei einem Typ zum Einsatz. Einige der Merkmale werden in dieser Art bei vielen unterschiedlichen Bausteinen verwendet. Die beschriebenen möglichen Merkmale eines Bausteins, die in Abbildung 10 für ein 2/2-Wegeventil aufgeführt sind, können so beispielsweise auch bei 3/2-Wegeventilen, 4/2-Wegeventilen oder 5/2-Wegeventilen auftreten.

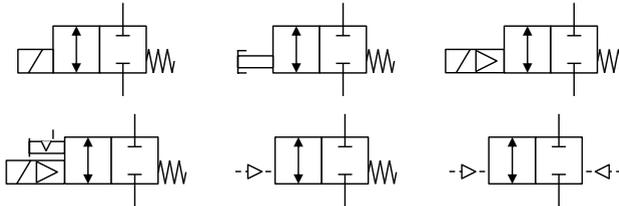


Abbildung 10: Mögliche Symbole für unterschiedliche Ausprägungen eines Bausteins am Beispiel eines 2/2-Wegeventils

Zur Klassifizierung der Ausprägung von Bausteinen in einem Schaltplan gibt es zwei mögliche Vorgehensweisen. Entweder wird jede Ausprägung eines Bausteins als neues Symbol deklariert, wie in Option 1 in Abbildung 11 am Beispiel eines 2/2-Wegeventils dargestellt. Alternativ können die jeweiligen Merkmale über Basismodule und Untersymbole zusammengestellt werden (Option 2). Beide Optionen können zu den gleichen Ergebnissen bei der Erkennung der Symbole im Schaltplan führen. Allerdings ist der Zuordnungsaufwand bei Option 1 deutlich höher als bei Option 2. Abbildung 11 verdeutlicht diesen Zusammenhang nur bedingt, da es lediglich die Beschriftungen für ein Symbol darstellt. Der Vorteil von Option 2 kommt zum Tragen, wenn nicht nur 2/2-Wegeventile beschriftet werden, sondern auch Wegeventile mit anderen Ausprägungen. Diese haben einen anderen Grundkörper, aber häufig gleiche Steuerarten. Dem Aufwand für die Beschriftung steht die Genauigkeit der Symbolerkennung gegenüber.

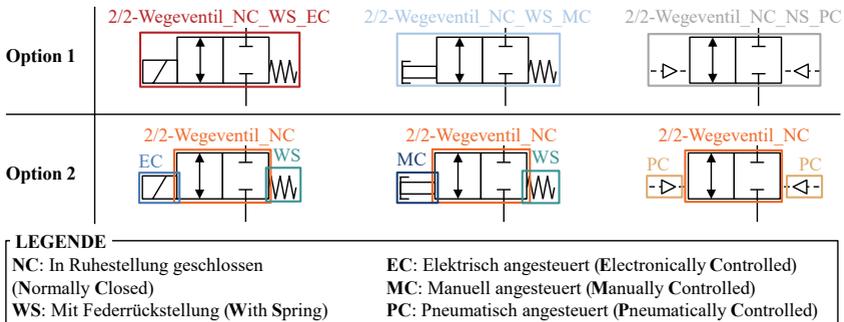


Abbildung 11: Zwei Optionen für die Beschriftung der Symbole am Beispiel eines 2/2-Wegeventils

Sollen Symbole in Schaltplänen detektiert werden, ist deren Orientierung zu berücksichtigen. Dabei sind Symbole in Schaltplänen nicht frei orientiert, sondern weisen eine Standardorientierung auf und dürfen aus dieser nur in 90°-Schritten gedreht werden [146]. Zusätzlich zur Drehung der Symbole in 90°-Schritten können die Symbole gespiegelt werden [146]. Dadurch ergeben sich acht mögliche

Ausrichtungen für jedes Symbol. Diese acht möglichen Ausrichtungen werden in Abbildung 12 am Beispiel eines 2/2-Wegeventils dargestellt.

Die Unterscheidung in acht verschiedene Ausrichtungen ist jedoch nicht für alle Symbole relevant. Zum einen gibt es Symbole, die nur einen Anschluss haben. Bei diesen Symbolen ist eine Erkennung der Orientierung nicht notwendig, da ein Anschluss zu einer einfachen Bestimmung der Anschlussbezeichnung führt. Das Gleiche gilt für Symbole mit zwei gegenüberliegenden Anschlüssen ohne Arbeitsrichtung. Die Arbeitsrichtung beschreibt die Eigenschaft einer Komponente, in eine bestimmte Richtung eingebaut werden zu müssen. Viele Schläuche aus der Pneumatik oder Widerstände aus der Elektrik haben beispielsweise keine Arbeitsrichtung. Relevant wird die Orientierung jedoch, wenn Bausteine mit zwei Anschlüssen eine Arbeitsrichtung haben. Dann kann der Baustein in insgesamt vier möglichen Ausrichtungen im Schaltplan vorhanden sein und die Beschriftung der Anschlüsse ist für den Algorithmus relevant. Dabei ergeben sich die vier möglichen Orientierungen aus den um jeweils 90° gedrehten Symbolen. Ein Spiegeln der Symbole in den jeweils gedrehten Orientierungen sorgt nicht für weitere mögliche Orientierungen, da ein Spiegeln bei zwei gegenüberliegenden Anschlüssen mit einer Arbeitsrichtung einer Drehung des Bausteins um 180° entspricht.

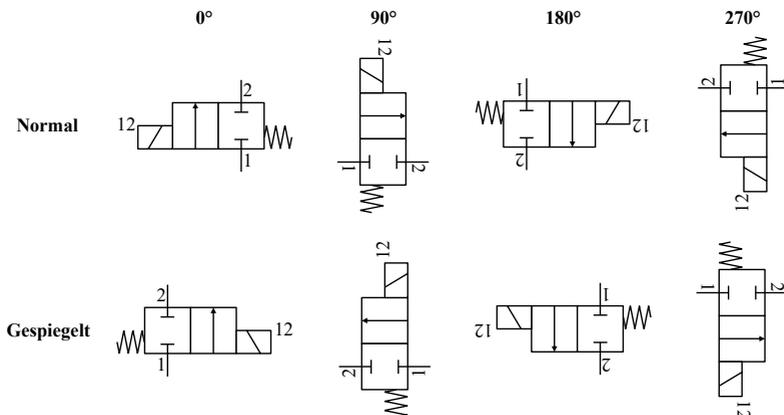


Abbildung 12: Acht mögliche Ausrichtungen eines Symbols am Beispiel eines 2/2-Wegeventils

Für Bausteine mit mehr als zwei Anschlüssen sorgt das Spiegeln von Symbolen hingegen für neue Ausrichtungen. Zusätzlich zu den vier möglichen Ausrichtungen durch das Drehen des Symbols in 90° Schritten gibt es jede dieser Ausrichtungen auch in gespiegelter Form, so dass sich insgesamt acht mögliche Ausrichtungen ergeben. Die Unterteilung von Symbolen in die genannten vier Gruppen und daraus resultierende mögliche relevante Orientierungen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Klassifizierung von Symbolen für die Relevanz der Orientierung des Symbols

	Symbole mit einem Anschluss	Symbole mit zwei Anschlüssen	Symbole mit mehr als zwei Anschlüssen
Baustein hat Arbeitsrichtung	Nein	Nein	Ja
Anschlussbezeichnung relevant	Nein	Nein	Ja
Anzahl relevanter Orientierungen des Symbols	-	-	4

Wichtig ist die Orientierung vor allem für die Anschlussbezeichnung eines Symbols. Hierfür können entweder standardisierte oder unternehmensspezifische Bezeichnungen verwendet werden. Ein Beispiel für standardisierte Bezeichnungen aus Normen ist die DIN ISO 11727 [147], welche die Anschlussbezeichnungen von Pneumatikventilen und weiteren pneumatischen Komponenten definiert.

Die Schaltpläne können in unterschiedlicher Form und Qualität vorliegen. Viele Schaltpläne liegen in speziellen Softwaretools vor, in denen sie erstellt wurden. Aus diesen gibt es in der Regel unterschiedliche Exportmöglichkeiten. Teilweise gibt es die Möglichkeit die im Schaltplan vorhandenen Informationen in Form von CSV (Comma Separated Values), XML oder ähnlichen Formaten zu exportieren. Einige Tools bieten hierfür jedoch keine passenden Möglichkeiten zum Export an. In solchen Softwaretools können die Schaltpläne lediglich als PDF (Portable Document Format) oder Bilddatei exportiert werden. Darüber hinaus gibt es einige Schaltpläne, die nicht mehr in ihrem Erstellungstool verfügbar sind. Einige Schaltpläne liegen als PDF oder Bilddatei vor, viele ältere Schaltpläne gibt es jedoch nur noch in Papierform. Solche Papierschaltpläne können abhängig von der Häufigkeit der Benutzung in sehr schlechter Qualität vorliegen. Typische Einflüsse, die zu schlechter Qualität führen, sind Knicke im Papier, nachträglich hinzugefügte handschriftliche Kommentare oder Verschmutzungen durch unterschiedliche Substanzen wie Öl oder Kaffee.

Neben der Qualität der Schaltpläne variiert deren Informationsgehalt in der Praxis. Einige Schaltpläne sind sehr detailliert aufgebaut und enthalten alle relevanten Informationen. Andere hingegen sind nicht sehr detailliert und unvollständig und es fehlen beispielsweise die Bezeichnungen der Anschlüsse an den Symbolen.

2.3.9 Ansätze zur Digitalisierung von Schaltplänen

Für die Digitalisierung der Informationen aus Schaltplänen gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansätze aus verschiedenen Disziplinen. Ein Ansatz von Arroyo et al. [148] konzentriert sich auf die Extraktion von Informationen aus Rohrleitungs- und Instrumentenplänen von Anlagentopologien zur Erstellung automatisierter Simulationsmodelle. Der Ansatz umfasst drei Schritte: Low-Level-Erkennung, High-Level-Erkennung sowie Modelldarstellung und -verifizierung. Bei der Low-Level-Erkennung werden Mustererkennungsmethoden eingesetzt, um nicht-parametrische Symbole wie Gefäße oder Ventile aus einer zuvor erstellten Bibliothek zu identifizieren und zu lokalisieren. Für eine umfassende Suche sind Anpassungsparameter wie Rotation, Skalierung und Verdeckung wichtig. Mit Methoden der optischen Zeichenerkennung (engl.: Optical Character Recognition, OCR) werden dann die entsprechenden Beschriftungen für die gefundenen nicht-parametrischen Symbole ausgelesen. Für parametrische Symbole wie Linien und Kreise werden entsprechende Erkennungsmethoden eingesetzt. Die Beschriftungen für diese Symbole werden mit OCR-Methoden ausgelesen und anschließend in ein objektorientiertes Modell übertragen. Das Modell wird dann dem Benutzer über eine Schnittstelle zur Überprüfung zur Verfügung gestellt. Die beschriebene Methode ist durch ein Patent geschützt (EP3104302B1) [148]. Die in der Arbeit beschriebene Methode wird aufgrund der in den Beispielen verwendeten, leicht unterscheidbaren Symbole als geeignet für Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagramme angesehen. Eine mögliche Übertragbarkeit auf andere Disziplinen wird nicht erwähnt. [148, 149]

Yun et al. [150] stellen einen zweiten Ansatz zur Extraktion von Informationen aus Rohrleitungs- und Instrumentendiagrammen vor. Dort werden zunächst interessante Regionen erkannt, um diese dann mit Hilfe eines Faltungsnetzwerks und eines Dummy-Datensatzes zu klassifizieren. Die erzielten Trefferquoten waren sehr gut. Der Artikel befasst sich nur mit der Erkennung von Symbolen und enthält keine Informationen über die Erkennung von Verbindungen und Anschlussbezeichnungen. Die Autoren empfehlen die Verwendung etablierter Algorithmen zur Symbolerkennung wie Faster Region-based Convolutional Neural Networks (R-CNN), You Only Look Once (YOLO) oder Single Shot Multi-Box Detector (SSD). [150]

Theisen et al. [151] präsentierten ähnliche Ergebnisse in ihrem Artikel über die Digitalisierung von Flussdiagrammen chemischer Prozesse mit Hilfe von neuronalen Netzen. Um die Objekte im Diagramm zu erkennen, setzten sie ein Faster R-CNN ein, und zur Erkennung der Verbindungen zwischen den Symbolen wurde ein pixelbasierter Algorithmus verwendet. Der Algorithmus erkennt Verbindungen zwischen zwei Symbolen, indem er von einem Pixel zum anderen geht. Der Artikel beschreibt kein Vorgehen zur Detektion der Anschlussbezeichnungen. [151]

Mani et al. [152] schlagen einen anderen Ansatz für die Digitalisierung von Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen vor. Beschriftungen, Symbole und Verbindungen werden aus den entsprechenden Schaltplänen mit Hilfe von Algorithmen wie Faster R-CNN und OCR extrahiert. Der Ansatz wird anhand von elf Prüfplänen bewertet, und es konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Ähnlich wie bei den bisherigen Ansätzen für Rohrleitungs- und Instrumentierungspläne wird in diesem Artikel nicht auf die Übertragbarkeit der Methode auf andere Disziplinen eingegangen, was ihre Anwendbarkeit zumindest auf die Fluidik einschränkt. [152]

Antoniazzi et al. [153] beschreiben eine zum Patent angemeldete, computerimplementierte Methode zur Extraktion von Informationen für elektrische Stromverteilungsnetze aus einem grafischen Diagramm, das einen elektrischen Stromkreis darstellt. Die Methode verwendet unterschiedliche Algorithmen zur Erkennung von Symbolen. Zusätzlich identifiziert die Methode Verbindungen zwischen den erkannten Symbolen. Es werden keine weiteren Informationen über die zur Identifizierung der Anschlüsse und Verbindungen verwendeten Methoden gegeben, was die Übertragbarkeit auf andere Disziplinen einschränkt. [153]

Yang et al. [154] schlagen einen Ansatz zur Erkennung elektrischer Elemente, Beschriftungen und der Topologie in Einleitungsdiagrammen von Umspannwerken vor, die üblicherweise in Energiesystemen verwendet werden. Die vorgeschlagene Methode verwendet drei Computer-Vision-Module, um alle drei Arten von Informationen genau zu erfassen. Die Methode geht nicht näher auf die Erkennung von Anschlussbezeichnungen ein, wodurch die Anwendbarkeit beispielsweise auf Fluidschaltpläne eingeschränkt ist. [154]

Es gibt eine beträchtliche Menge an Literatur zur Digitalisierung von handgezeichneten Schaltplänen, insbesondere von elektronischen Schaltplänen. In verschiedenen Artikeln werden verschiedene Ansätze verwendet, wobei eine Reihe von Technologien wie Markov-Modelle, Support-Vektor-Maschinen und neuronale Netze zum Einsatz kommen. Diese Beiträge haben durchweg gute Ergebnisse auf ihren jeweiligen Testdatensätzen erzielt. Viele Beiträge konzentrieren sich jedoch ausschließlich auf die Erkennung von Symbolen und vernachlässigen die Bedeutung ihrer Verbindungen. Außerdem werden die Anschlussbezeichnungen oft nicht berücksichtigt. [155–162] Auf dem Gebiet der Digitalisierung verschiedener Arten von technischen Dokumenten gibt es bereits vielversprechende Ansätze, die in den jeweiligen Anwendungsfällen zu teils sehr guten Ergebnissen geführt haben. Vor allem im Bereich der Rohrleitungs- und Instrumentierungspläne sowie der handgezeichneten elektrischen Schaltpläne gibt es zahlreiche Beiträge. Für die allgemeingültige Anwendbarkeit der vorgestellten Ansätze auf Schaltpläne unterschiedlicher Disziplinen lassen sich drei Einschränkungen identifizieren:

- Viele der Ansätze befassen sich mit Symbolen, die sich in Bezug auf Struktur oder Größe deutlich unterscheiden. Im Bereich der Fluidik beispielsweise gibt es jedoch viele ähnliche Symbole mit nur marginalen Unterschieden, die klar voneinander unterschieden werden müssen.
- Während viele Ansätze Verbindungen zwischen erkannten Symbolen erfassen, konnte kein Ansatz gefunden werden, der die Anschlussbezeichnungen von Verbindungen zu entsprechenden Symbolen berücksichtigt und erkennt.
- Die betrachteten Ansätze digitalisieren nur die in den Dokumenten vorhandenen Informationen. Es kann jedoch Schaltpläne geben, in denen einzelne Informationen, wie z. B. Anschlussbezeichnungen, fehlen.

2.3.10 Typischer Handhabungszyklus einer Automatisierungskomponente

Vakuum-Greifsysteme sind typische Automatisierungskomponenten. Solche Vakuum-Greifsysteme werden häufig in Handhabungsprozessen von Stückgut in der diskreten Produktion eingesetzt [94]. Ein typischer Handhabungszyklus besteht aus insgesamt sieben Phasen, die beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt sind. In Phase 1 wird das Vakuum-Greifsystem zum Handhabungsobjekt bewegt, gefolgt von Phase 2, dem Aufsetzen des Vakuumsauggreifers auf dem Werkstück. In der dritten Phase wird das Handhabungsobjekt durch den sich aufbauenden Unterdruck angesaugt. Dies erfolgt meist einseitig an der Oberfläche des Werkstücks. Ist das Vakuum im System ausreichend hoch, wird das Handhabungsobjekt in der vierten Phase angehoben und in Phase 5 zum Bestimmungsort transportiert. Dort wird das Vakuum durch atmosphärisches Belüften oder Einblasen von Druckluft aufgehoben und damit das Handhabungsobjekt vom Greifer gelöst (Phase 6). Sobald keine kraftübertragende Verbindung mehr zwischen Vakuumsauggreifer und Handhabungsobjekt besteht, wird der Vakuumsauggreifer in Phase 7 abgehoben und in die Ausgangsposition zurückgefahren. Für detailliertere Ausführungen zu Handhabungszyklen sei auf [94] verwiesen. Das Vakuum-Greifsystem ist nur in den Phasen 2 bis 6 aktiv. In den Phasen 1 und 7 hingegen ist es inaktiv.

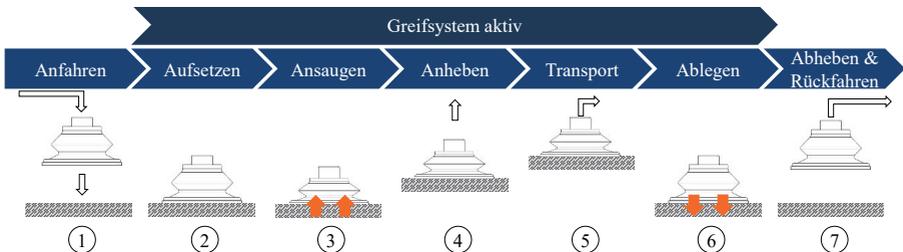


Abbildung 13: Phasen eines typischen Handhabungsprozesses eines Vakuum-Greifsystems angelehnt an [94]

Für die Bewertung von Vakuum-Greifsystemen können unterschiedliche Kenngrößen herangezogen werden. Eine sehr wichtige und prozessrelevante Kenngröße ist die Zeit, bis ein gewünschtes Mindestvakuumniveau für den Prozess erreicht ist, die sogenannte Evakuierungszeit. Dieses Mindestvakuumniveau wird typischerweise über eine Schaltschwelle definiert, in dieser Arbeit H_2 genannt. Diese Schaltschwelle ist mit einer Hysterese h_2 versehen, um ein unerwünschte Schaltvorgänge zu vermeiden. Die Evakuierungszeit ist neben weiteren relevanten Kenngrößen in Abbildung 14 dargestellt.

Darin ist ein typischer Vakuumverlauf für zwei Handhabungszyklen auf der Y-Achse in Millibar (relativ) über der Zeit in Sekunden auf der X-Achse aufgetragen. Die Zykluszeit beschreibt dabei den Zeitabschnitt vom Anfang eines Handhabungszyklus (in diesem Fall beginnend mit dem Start des Evakuierungsvorgangs) bis zum Start des darauffolgenden Evakuierungsvorgangs. In der Zykluszeit gibt es häufig eine aktive und eine passive Zeit des Vakuums. Während der aktiven Vakuumzeit wird in der Regel ein Handhabungsobjekt transportiert. Während der passiven Vakuumzeit wird das Vakuum-Greifsystem häufig zur nächsten Werkstückaufnahme zurück bewegt. In der Zeit, in welcher das Vakuum aktiv ist, muss jedoch nicht immer ein Saugvolumenstrom am Vakuumerzeuger anliegen. Bei hinreichend saugdichten Handhabungsobjekten kann das Vakuum ohne weiteres aktives Evakuieren eine bestimmte Zeit aufrecht erhalten werden. Um hierfür den Vakuumerzeuger zu drosseln oder auszuschalten, können kontinuierliche Regelungen (beispielsweise bei drehzahleregelten Vakuumpumpen) zum Einsatz kommen. Bei Absenkung der Motordrehzahl wird dabei (in erster Näherung linear) das Saugvermögen und damit die Aufnahmeleistung reduziert. Es

gibt jedoch auch Vakuumerzeuger, die diskret mit Hilfe einer Zweipunktregelung geregelt werden. Ein Beispiel hierfür sind pneumatische Vakuumerzeuger. Für die Regelung wird die Schaltschwelle H1 mit der Hysterese h1 verwendet. Insbesondere bei saugdichten Werkstücken kann die Venturidüse im pneumatische Vakuumerzeuger temporär deaktiviert werden, wodurch signifikante Energieeinsparungen möglich sind. Allerdings besitzt nicht jeder pneumatische Vakuumerzeuger eine solche integrierte Zweipunktregelung.

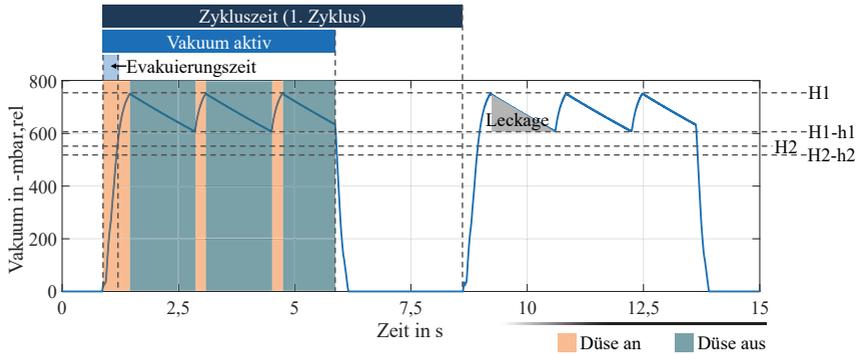


Abbildung 14: Typischer Vakuumverlauf mit gängigen Kenngrößen

Wichtig für die Regelbarkeit eines Vakuumerzeugers ist die Leckage im Vakuum-Greifsystem. Eine solche kann an den Schnittstellen zwischen den verschiedenen Komponenten eines Vakuum-Greifsystems auftreten, wenn die verbaute Abdichtung eine Teilcheneinströmung nicht vollständig verhindern kann [163]. Eine weitere typische Stelle für Leckage in einem Vakuum-Greifsystem ist die Schnittstelle zwischen Handhabungsobjekt und Vakuumsauggreifer. Dabei kann die Leckage zwischen Handhabungsobjekt und Vakuumsauggreifer in drei Klassen unterteilt werden [68]. Leckage erster Ordnung beschreibt die Leckage durch eine Öffnung im Handhabungsobjekt, wie beispielsweise bei Lochblechen. Eine Leckage zweiter Ordnung tritt an der Dichtlippe des Vakuumsauggreifers zum Handhabungsobjekt auf. Eine solche kann beispielsweise durch unebene Oberflächen am Handhabungsobjekt hervorgerufen werden [94]. Leckage dritter Ordnung wird durch ein luftdurchlässiges oder poröses Handhabungsobjekt wie z. B. Holz oder Karton hervorgerufen. Für weiterführende Informationen zur Leckage in Vakuum-Greifsystemen wird auf [68, 94] verwiesen. Da sich die Leckagevolumenströme häufig nur mit sehr aufwändigen und teuren Volumenstromsensoren messen lassen, wird die Leckage in der industriellen Praxis häufig über den durch Leckage ausgelösten Vakuumabfall (Δp) im System pro Zeiteinheit (Δt) ermittelt. Die Leckage wird typischerweise als linear angenommen und mithilfe des Quotienten aus Vakuumabfall und verstrichener Zeit berechnet.

$$L = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Weitere gängige Kenngrößen (engl. Key-Performance-Indicators, KPI) von Vakuum-Greifsystemen sind die theoretische Haltekraft oder der Energiebedarf pro Zyklus. Solche Kenngrößen lassen sich mit entsprechenden Formeln berechnen, häufig direkt oder indirekt aus dem Vakuumverlauf. Auch hierfür wird auf weiterführende Literatur verwiesen [68, 94, 105, 164].

2.3.11 Abstraktion der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen

Für die Abstraktion von Verhaltensmodellen gibt es unterschiedliche Ansätze in der Literatur. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen, zum einen modellbasierte und zum anderen datengetriebene Ansätze. [165–167]

Modellbasierte Ansätze basieren auf dem mathematischen oder physikalischen Verständnis der verwendeten Modelle. In diesem Bereich gibt es sehr spezifische Ansätze für spezifische Typen von Modellen. Ein Beispiel hierfür ist die Craig-Bampton Methode, welche die Anzahl der Freiheitsgrade in finite Elemente Modellen reduziert um damit eine abstrahiertes Modell zu erstellen [168]. In linearen Systemen können Ansätze wie Linearisierung, lineare Parametervariation oder balanciertes Abschneiden verwendet werden [167, 169–171].

Die Gruppe der datengetriebenen Ansätze verwenden Eingangs- und Ausgangsdaten des originalen, detaillierten Verhaltensmodells. Mögliche Ansätze für die statische Abstraktion der Modellierungstiefe ist die Interpolation oder die Verwendung von Lookup-Tabellen. Für dynamische, abstrahierte Verhaltensmodelle können Long Short-Term Memory (LSTM) Netzwerke, vorwärtsgerichtet neuronale Netze oder neuronale Netzwerke mit gewöhnlichen Differentialgleichungen verwendet werden. [167, 172–174]

Beispiele für umgesetzte Ansätze zur Abstraktion von Verhaltensmodellen sind „RBmatlab“ [175], „model reduction inside ANSYS“ [176], „pyMOR“ [177] oder auch „MORLAB“ [178]. Dabei handelt es sich häufig um Funktionen, Erweiterungen oder Bibliotheken für spezifische Simulationsprogramme.

Hierbei müssen bei der Abstraktion Entscheidungen über den späteren Einsatz der abstrahierten Verhaltensmodelle getroffen werden. Darüber hinaus gibt es bisher nicht die eine Methode für die Abstraktion aller möglichen Verhaltensmodelle. [165]

Im Rahmen der Erstellung von Verhaltensmodellen von Komponentenherstellern kann nicht davon ausgegangen werden, dass das mathematische oder physikalische Verständnis stets erfasst werden kann, da die verwendeten Verhaltensmodelle sehr vielfältig sein können. Es handelt sich auch nicht immer um lineare Systeme, wodurch rein modellbasierte Ansätze als Möglichkeit zur Abstraktion verworfen werden können. Datengetriebene Ansätze hingegen stellen eine Möglichkeit für die Abstraktion von Verhaltensmodellen dar.

2.4 Schlussfolgerungen und Aufzeigen einer Forschungslücke

Aus den in Kapitel 2 diskutierten Aspekten ergeben sich die nachfolgenden Schlussfolgerungen, die für das Konzept zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen für Digitale Zwillinge in prozessrelevanter Modellierungstiefe und domänenspezifische Modellbildung für die Vakuum-Handhabungstechnik berücksichtigt werden müssen:

- Komponentenhersteller sind früh in der industriellen Wertschöpfungskette aktiv. Für einen Großteil der Anwendungsfälle von Komponentenherstellern werden sehr detaillierte Verhaltensmodelle benötigt.
- Verhaltensmodelle können für die Kriterien Modellierungsumfang, Modellierungsbreite, Modellierungstiefe und Fehlerfälle in diskrete Stufen unterteilt werden.
- Werden sehr detaillierte Verhaltensmodelle benötigt, eignet sich für eine automatisierte Erstellung die Verwendung einer Bibliothek, in der die detaillierten Teilmodelle hinterlegt sind.
- Komponenten stellen häufig die kleinste betrachtete Einheit in Produktionssystemen dar. Zerlegt man diese jedoch weiter, können Grundbausteine und physikalische Grundprinzipien als weitere Ebenen zur Einordnung identifiziert werden.

- Das Produktportfolio von Komponentenherstellern umfasst häufig Produktfamilien mit sehr großer Variantenvielfalt. Diese Variantenvielfalt kann jedoch auf eine deutlich kleinere Anzahl an Grundbausteinen und eine noch kleinere Anzahl an physikalischen Grundprinzipien zurückgeführt werden.
- Verhaltensmodelle sind zentraler Aspekt für viele Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings und vor allem in den frühen Phasen des Anlagenlebenszyklus relevant, in denen Komponentenhersteller üblicherweise aktiv sind.
- Aus verschiedenen Anwendungsfällen des Digitalen Zwillings ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit und die Berechnungszeit von Verhaltensmodellen.
- Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1 bis 4 sind für unternehmensübergreifende Digitale Zwillinge relevant, weshalb der Fokus dieser Arbeit auf diesen Modellierungstiefen liegt.
- Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1 bis 3 von Komponenten können nur eingeschränkt zu Verhaltensmodellen von Systemen zusammengefügt werden. Die Vereinfachungen in den einzelnen Verhaltensmodellen der Komponenten sorgen für große Abweichungen der Systemmodelle von der Realität.
- Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 können unterschiedlich detailliert ausgeführt werden. Welche Effekte wie detailliert modelliert sind, kann je nach Anforderungen variieren.
- Vakuum-Greifsysteme bestehen aus Komponenten unterschiedlicher Disziplinen und können als repräsentativer Anwendungsbereich typischer mechatronischer Komponenten und Systeme herangezogen werden.
- Vakuum-Greifsysteme werden häufig in Handhabungsprozessen von Stückgut eingesetzt, weswegen sie sich gut als Anwendungsszenario für diskrete Fertigungsprozesse eignen, auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt. Der Arbeitsablauf kann durch sich wiederholende Zyklen beschrieben werden. Ein solcher Zyklus kann in eine begrenzte Anzahl diskreter Phasen unterteilt werden.
- Das Verhalten von Vakuum-Greifsystemen ist maßgeblich durch sein fluidisches Verhalten definiert. Aus den fluidischen Größen eines Vakuum-Greifsystems können eine Vielzahl anderer KPIs abgeleitet werden. Die Modellierung dieses Verhaltens ist aus diesen Gründen elementar.
- Das Konzept muss in bestehende Entwicklungsprozesse integrierbar sein, um eine hohe Akzeptanz zu erreichen.
- Schaltpläne sind eine typische Informationsquelle für den Aufbau von Komponenten. Dabei können Schaltpläne in unterschiedlicher Form und Qualität vorliegen. Einige Schaltpläne stehen ausschließlich ohne passende Exportschnittstelle zur Verfügung.
- Symbole in Fluidschaltplänen können in standardisierter oder unternehmensspezifischer Form vorkommen. Die Symbole können unterschiedlich ausgerichtet sein, die Anzahl möglicher Ausrichtungen ist jedoch kleiner oder gleich acht.
- Der Vakuumverlauf über der Zeit ist die zentrale Kenngröße für Vakuum-Greifsysteme. Aus diesem können ein Großteil der relevanten Kenngrößen abgeleitet werden.
- Datengetriebene Ansätze stellen eine Möglichkeit zur Abstraktion von Verhaltensmodellen dar, die unabhängig von den verwendeten Verhaltensmodellen eingesetzt werden können.

2.4 Schlussfolgerungen und Aufzeigen einer Forschungslücke

In Anbetracht der Ausgangssituation dieser Arbeit ermöglichen Verhaltensmodelle als Teil des Digitalen Zwillinges in unterschiedlichen Anwendungen signifikante Mehrwerte. Deren Erstellung ist jedoch sehr zeitaufwändig und fehleranfällig. Vor allem wenn für unterschiedliche Anwendungen Verhaltensmodelle mit unterschiedlicher Modellierungstiefe bereitgestellt werden müssen. Die gefundenen Ansätze in der Literatur beschreiben Lösungsansätze für Teilaspekte dieser Problemstellung. Es konnte jedoch kein Ansatz gefunden werden, der Verhaltensmodelle in großer Modellierungstiefe für die Anwendungsfälle von Komponentenhersteller konsistent und aufwandsarm bereitstellt und diese für etwaige Anwendungsfälle mit geringer Modellierungstiefe aufwandsarm abstrahiert.

Neben diesem domänenübergreifenden Forschungsbedarf, besteht insbesondere Bedarf in der Domäne, in der das Konzept realisiert und evaluiert werden soll. Verhaltensmodelle für Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer sind aktuell nicht öffentlich zugänglich und die gefundenen Ansätze aus der Literatur modellieren maximal Teilaspekte des Verhaltens. Für die Gesamtbetrachtung einer Systemsimulation ist das jedoch nicht ausreichend.

Zusammenfassend aus der domänenübergreifenden und domänenspezifischen Bewertung des Stands der Wissenschaft und Technik kann die Forschungslücke für diese Arbeit wie folgt formuliert werden:

Aktuell existiert kein Konzept für die aufwandsarme und konsistente Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe für die Verwendung in Digitalen Zwillingen. Darüber hinaus fehlen detaillierte Verhaltensmodelle von Vakuumerzeugern und Vakuumsauggreifern.

Aufbauend auf der identifizierten Forschungslücke wird im nachfolgenden Kapitel das domänenübergreifende Konzept zur aufwandsarmen und konsistenten Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel werden die detaillierten Verhaltensmodelle von Vakuumerzeugern und Vakuumsauggreifern hergeleitet und vorgestellt.

3 Konzept zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen

Basierend auf der identifizierten Forschungslücke wird in dieser Arbeit ein Konzept für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen in entsprechender Modellierungstiefe für die Verwendung im Digitalen Zwilling vorgestellt. Berücksichtigt werden dabei die in Abschnitt 1.2 erörterten Probleme sowie die in Abschnitt 1.4 hergeleiteten Anforderungen. Weiterhin werden die in Abschnitt 2.3 analysierten Randbedingungen einbezogen. Zu diesem Zweck wird in diesem Kapitel die zentrale Konzeptidee vorgestellt und anschließend werden die drei Artefakte, die in den drei Iterationen des DSR im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, näher erläutert.

3.1 Grundlegende Konzeptentscheidungen

Um die Methode zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen einordnen zu können, müssen die Anforderungen an die Erstellung aus Sicht eines Komponentenherstellers betrachtet werden. Ausgehend von einer makroskopischen Betrachtung bietet sich die Einordnung des Komponentenherstellers in die industrielle Wertschöpfungskette an, dargestellt in Abbildung 15.

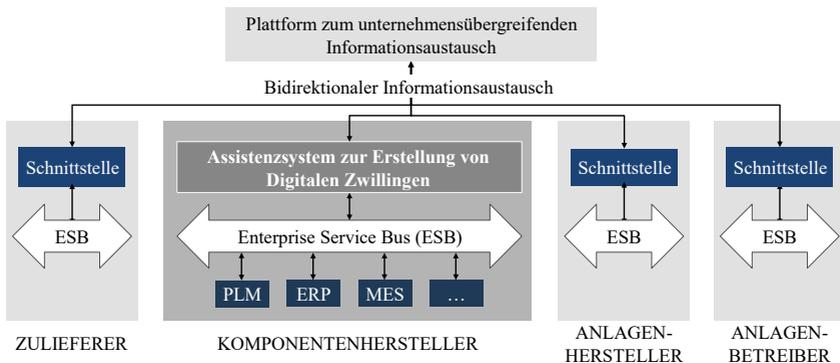


Abbildung 15: Makroskopische Verortung des Konzepts in der industriellen Wertschöpfungskette

Darin sind die beschriebenen Gruppen der industriellen Wertschöpfungskette und beispielhafte Informationsströme zwischen diesen dargestellt. Beim Digitalen Zwilling sind solche Informationsströme elementar, um Daten und Modelle durchgängig über den Lebenszyklus eines jeden Assets verwenden zu können. Für einen solchen Informationsaustausch können Plattformen eine Möglichkeit sein. Es sind jedoch auch andere Konzepte für einen Informationsaustausch über Unternehmensgrenzen hinweg möglich. Quelle dieser Informationen sind verschiedenste Softwareprogramme in den Unternehmen. Häufig zum Einsatz kommen Product-Lifecycle-Management (PLM), Enterprise-Resource-Planing (ERP), Manufacturing-Execution-Systems (MES) oder ähnliche Systeme. Auf diese Systeme wird in vielen Unternehmen jedoch nicht direkt zugegriffen. Stattdessen werden sogenannte Enterprise-Service-Bus (ESB) Architekturen verwendet, welche die Integration unterschiedlicher Dienste in die Anwendungslandschaft von Unternehmen unterstützen [179]. Über einen solchen ESB können unterschiedliche Systeme auf die genannten Informationsquellen standardisiert zugreifen. Auch das Assistenzsystem zur Erstellung der Digitalen Zwillinge in diesem Konzept soll über eine solche Schnittstelle auf verschiedene Informationen zugreifen. Neben dem Assistenzsystem greift auch die Schnittstelle aus Abbildung 15, welche die

3.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme

Informationen für die unternehmensübergreifende Kommunikation bereitstellt, über den ESB auf die jeweiligen Systeme zu. Prinzipiell sind auch andere Systemarchitekturen für das Konzept möglich. Im weiterführenden Verlauf dieser Arbeit wird das Konzept des ESB für die unternehmensinterne Informationsverarbeitung verwendet. Damit werden implizit auch andere Konzepte inkludiert, die jedoch nicht jedes Mal explizit genannt werden.

Die Erstellung Digitaler Zwillinge kann, wie in Abbildung 15 dargestellt, durch externe Anforderungen ausgelöst werden. Alternativ zu diesen externen Anforderungen gibt es auch unternehmensinterne Anwendungsfälle, für die Verhaltensmodelle aus dem Digitalen Zwilling einen signifikanten Mehrwert liefern können. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Verhaltensmodellen für digitale Systemauslegungen oder für digitale Systemvalidierungen. Das Assistenzsystem muss daher sowohl externe als auch interne Anforderungen verarbeiten können.

3.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme

Das Artefakt der ersten Iteration des DSR detailliert das makroskopische Konzept aus vorhergehendem Abschnitt. Hierzu wird der Fokus in Abbildung 15 auf das Assistenzsystem zur Erstellung von Digitalen Zwillingen des Komponentenherstellers gelegt. Dieses erhält Anforderungen aus externen oder internen Quellen. Für externe Anforderungen ist in Abbildung 16 eine Schnittstelle hin zu anderen Stakeholdern vorgesehen. Die Quellen für interne Anforderungen stammen aus dem ESB. Da diese Anforderungen durch die heterogenen Quellen in unterschiedlichster Form vorliegen können, gilt es in einem ersten Schritt, diese vorzuverarbeiten, um eine definierte Informationsstruktur der Anforderungen zu erhalten. Diese homogenisierten Eingangsinformationen werden im nächsten Schritt unterschiedlichen Funktionen zugeführt.

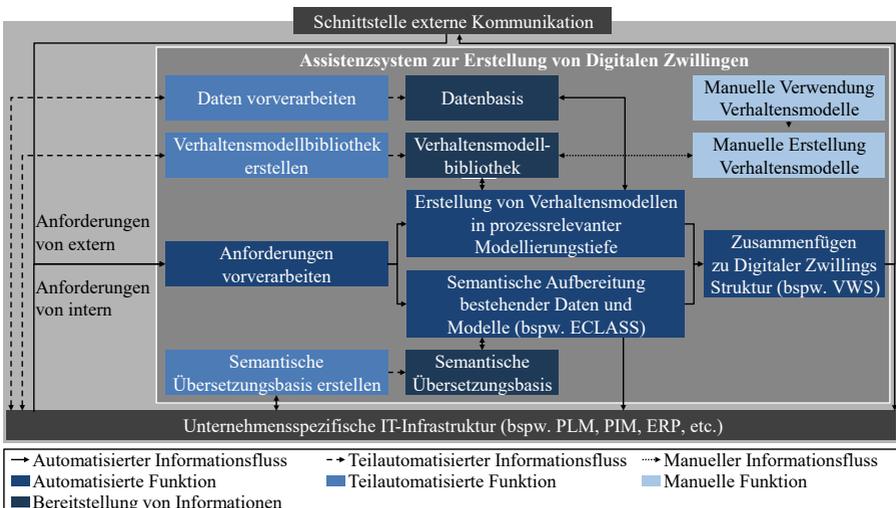


Abbildung 16: Konzept zur automatisierten Erstellung Digitaler Zwillinge

Häufig gibt es in Unternehmen eine große Anzahl an Daten und Modellen, welche relevant für den Digitalen Zwilling der entsprechenden Komponente sind. Diese müssen für die Verwendung jedoch teilweise semantisch aufbereitet werden. Die Semantik ist elementar für die durchgängige

Verwendung von Digitalen Zwillingen und kann nicht als gegeben angenommen werden [180]. Für jene Daten und Modelle, die semantisch aufbereitet werden müssen, soll auf bestehende semantische Standards zurückgegriffen werden, wie z. B. „ECLASS“. Allgemein kann hierfür auch auf andere Standards zurückgegriffen werden. Zur semantischen Aufbereitung der Daten und Modelle wird eine semantische Übersetzungsbasis verwendet. Diese bildet die unternehmensintern verwendeten Begriffe auf deren Äquivalent im entsprechenden Standard ab. Die semantische Übersetzungsbasis muss initial erstellt werden. Dies ist mit wirtschaftlichem und technischem Aufwand verbunden. Vorteilhaft ist, dass in Unternehmen häufig einheitliche Begriffe für gleiche Eigenschaften verwendet werden, wodurch sich für unterschiedliche Komponenten innerhalb eines Unternehmens große Schnittmengen bezüglich deren Eigenschaften ergeben. Dadurch ist die Anzahl der Einträge in der Übersetzungsbasis um ein Vielfaches kleiner als die individueller Komponenteneigenschaften im Produktportfolio.

Das Erstellen der semantischen Übersetzungsbasis kann als teilautomatisierte Funktion realisiert werden. Eine Option hierfür wäre ein eigenes Assistenzsystem zur einfacheren Suche der jeweiligen Komponenteneigenschaften im entsprechenden Standard. Das Assistenzsystem sucht mit geeigneten Algorithmen nach passenden Bezeichnungen im entsprechenden Standard für eine jeweilige Komponenteneigenschaft. Die nutzende Person bestätigt oder lehnt die vom Assistenzsystem vorgeschlagene Zuordnungen lediglich ab, muss diese aber nicht mehr vollständig manuell suchen. Zudem kann sich das Assistenzsystem die bereits bestätigten Begriffspaare merken, um sich wiederholende Begriffe ohne manuellen Eingriff automatisiert zu übersetzen. Mit einem solchen System kann der manuelle Aufwand mit zunehmender Nutzungsdauer signifikant reduziert werden. Neben den Daten und Modellen, die in Unternehmen bereits vorliegen und gegebenenfalls noch semantisch aufbereitet werden müssen, liegen Verhaltensmodelle häufig nicht in prozessrelevanter Modellierungstiefe vor. Entweder liegen Verhaltensmodelle in Modellierungstiefen vor, die für den jeweiligen Anwendungsfall des Digitalen Zwillinges nicht passend sind oder es fehlt jegliche Verhaltensmodellierung einer entsprechenden Komponente oder eines entsprechenden Systems. Für die Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme soll im vorgestellten Konzept auf eine Bibliothek mit Verhaltensmodellen und eine Datenbasis zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Verhaltensmodelle aus der Verhaltensmodellbibliothek werden mithilfe entsprechender Werte aus der Datenbasis parametrisiert. Die Verhaltensmodellbibliothek und die Datenbasis müssen dabei in einem teilautomatisierten, vorgelagerten Arbeitsschritt erstellt werden. Hierfür kann auf Informationen aus der entsprechenden unternehmensspezifischen Informationstechnik-Infrastruktur (IT-Infrastruktur) zurückgegriffen werden. Für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek sind dabei vor allem Schaltpläne und andere Zeichnungen für den Zusammenbau der Komponenten relevant. Hierauf wird später noch näher eingegangen. Für die Datenbasis werden Parameter aus Datenblättern, Messungen und tiefgreifenden Simulationen über den ESB aus den unternehmensspezifischen Systemen angezogen und vorverarbeitet. Eine solche Vorverarbeitung ist notwendig, um die heterogen vorliegenden Informationen im Anschluss standardisiert aus der Datenbasis auszulesen.

Die unter Verwendung der Verhaltensmodellbibliothek und Datenbasis vollautomatisiert erstellten Verhaltensmodelle in prozessrelevanter Modellierungstiefe, zusammen mit den semantisch aufbereiteten Daten und Modellen aus der unternehmensspezifischen IT-Infrastruktur, können in einem letzten vollautomatisierten Schritt zu einer Struktur eines Digitalen Zwillinges zusammengefügt werden. Hierfür können unterschiedliche Informationsmodelle verwendet werden. Ein gängiger Standard, der eine unternehmensübergreifende Verwendung erleichtert, ist die AAS. Prinzipiell wären jedoch auch andere Standards oder ein proprietäres Informationsmodell möglich.

Da die erstellten Verhaltensmodelle neben der Verwendung im Digitalen Zwilling auch für andere Anwendungsfälle im Entwicklungsprozess Mehrwerte liefern können, wird eine Möglichkeit zur manuellen Erstellung und Verwendung der Verhaltensmodelle aus der Verhaltensmodellbibliothek geschaffen. Hierbei können nutzende Personen auf die Verhaltensmodelle der Verhaltensmodell-

3.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme

bibliothek zugreifen und mit den vorhandenen Bausteinen aufwandsarm Verhaltensmodelle von Komponenten und Systemen aufbauen, ausführen und auswerten.

Wichtig für die Erstellung der Verhaltensmodelle ist die Bereitstellung der Anforderungen über den Aufbau einer Komponente oder eines Systems. Diese benötigen eine Vorverarbeitung. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten für die Struktur, in welche die Anforderungen überführt werden können. Für diese Arbeit sollen hierfür Graphen zum Einsatz kommen, da diese bereits in vorangegangenen Arbeiten zur Abbildung des Aufbaus von Systemen eingesetzt wurden. Die Struktur mit den Bestandteilen eines solchen Graphen ist in Abbildung 17 dargestellt. Dabei zeigt der linke Teil der Abbildung den visualisierten Aufbau des Graphen, während im rechten Teil die dahinterliegenden Informationen in Form von Tabellen aufgeführt sind.

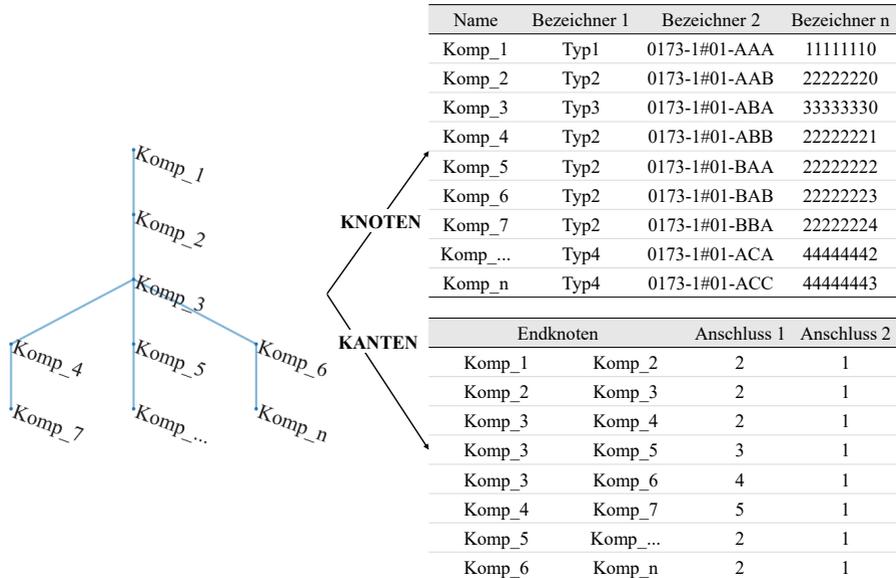


Abbildung 17: Aufbau eines Graphen zur Beschreibung der Anforderungen an ein zu erstellendes Verhaltensmodell

Grundlegend besteht ein Graph aus Knoten und Kanten [181]. In den Knoten der Graphen sind die Informationen über die verwendeten Komponenten hinterlegt. Diese umfassen den eindeutigen Namen eines jeden Knoten und eine oder mehrere Bezeichner. Diese Bezeichner können sowohl den Typ als auch die Instanz eines Bausteins beschreiben. Es ist möglich den Typ oder die Instanz eines Bausteins mit mehr als einem Bezeichner in unterschiedlichen Klassifikationsstandards zu beschreiben. Bei Bedarf kann die Tabelle um weitere Spalten mit zusätzlichen Informationen erweitert werden. Eine Option hierfür sind zusätzliche Spezifikationen der Komponenten, beispielsweise ob diese Ein- oder Ausgänge repräsentieren. Neben den Informationen über Knoten enthält der Graph auch solche über Kanten. Darin sind die Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten tabellarisch aufgeführt. Die Identifikation der Knoten erfolgt dabei über deren eindeutige Namen. Neben den Verbindungen zwischen den Knoten ist in der Tabelle auch die Anschlussbezeichnung von Start und Ende der Verbindung aufgeführt. Diese spezifiziert, welcher Anschluss an der Start- und Endkomponente für die Verbindung verwendet wird. Auch bei Kanten können bei Bedarf weitere Informationen in zusätzlichen Spalten hinzugefügt werden. Mithilfe der

Informationen aus Knoten und Kanten, die aus den Anforderungen abgeleitet werden, kann im nächsten Schritt das Verhaltensmodell für die Komponente oder das System erstellt werden. Dieser Teil des Grobkonzepts aus Abbildung 16 wird mithilfe der Darstellung in Abbildung 18 detaillierter betrachtet und ist ein Schwerpunkt dieser Arbeit.

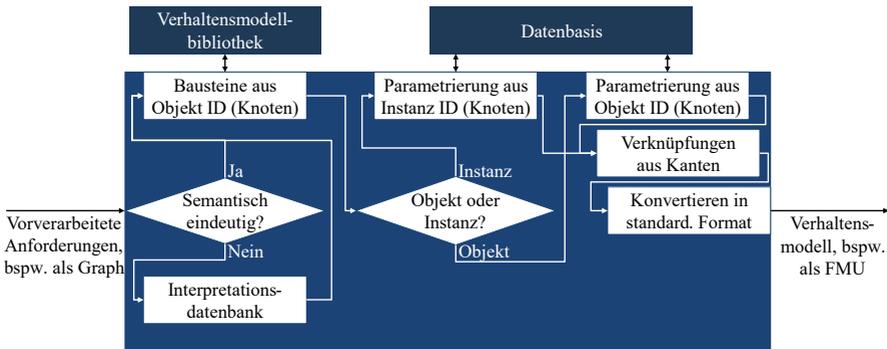


Abbildung 18: Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen

Die Informationen in Form eines Graphen werden in einem ersten Schritt auf deren semantische Eindeutigkeit überprüft. Dies ist wichtig, um die korrekten Bausteine aus der Verhaltensmodellbibliothek auszuwählen. Ist diese semantische Eindeutigkeit nicht gegeben, wird eine Interpretationsdatenbank zur Übersetzung der unternehmensspezifischen Begriffe verwendet. Die semantisch eindeutigen Informationen aus den Knoten werden im nächsten Schritt zur Auswahl der Bausteine aus der Verhaltensmodellbibliothek verwendet. In dieser Arbeit wird als Bezeichner für die Komponenten deren Artikelnummer verwendet, da diese häufig unternehmensweit eindeutig ist und auch von anderen IT-Systemen zur Identifikation genutzt wird. Grundsätzlich können aber auch andere eindeutige Bezeichner, wie beispielsweise die Verkaufsbezeichnung, verwendet werden. Die durch die Informationen aus den Knoten zum neu erstellten Systemmodell hinzugefügten Verhaltensmodelle der entsprechenden Komponenten, werden in einem nächsten Schritt parametriert. Die Parameter dafür werden aus der Datenbasis ausgelesen. Auch hierfür kommt als Bezeichner für die Komponente die Artikelnummer zum Einsatz. Für die Zuordnung der einzelnen Parameter aus der Datenbasis zu den entsprechenden Stellen im jeweiligen Verhaltensmodell werden spezifische Bezeichner verwendet. Die spezifischen Bezeichner sind in den Verhaltensmodellen der Komponenten den Variablen für die Parameter zugeordnet. Alternativ zu diesen spezifischen unternehmensinternen Bezeichnern können auch standardisierte Parameterbezeichnungen verwendet werden. Die Parameter können dabei entweder instanzspezifisch oder objektspezifisch sein. Je nach gewünschtem Verhaltensmodell wird für das Anziehen der Parameter aus der Datenbasis entsprechend der Bezeichner für die Instanz (Instanz ID) oder für das Objekt (Objekt ID) aus den Knoten des Graphen verwendet.

Nach der Parametrierung können die Verhaltensmodelle mithilfe der Informationen aus den Kanten verknüpft werden. Dabei muss nicht nur bekannt sein, welche Bausteine miteinander verknüpft sind, sondern auch welcher Anschluss für die entsprechende Verbindung verwendet wird. Die Zuordnung erfolgt ebenfalls über Bezeichner für die Anschlüsse. Diese möglichst an Normen angelehnten Bezeichner, sind für die jeweiligen Anschlüsse im Graphen hinterlegt. Mithilfe dieser Informationen über Bausteine und Anschlüsse können die parametrierten Komponentenmodelle miteinander verknüpft werden. Das damit erstellte Verhaltensmodell einer Komponente oder eines Systems kann, sofern dies benötigt wird, in einem letzten Schritt in ein standardisiertes Austauschformat konvertiert werden. Ein weitverbreitetes, standardisiertes Format für den Austausch von Verhaltensmodellen ist

3.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme

die Functional Mock-up Unit (FMU) [182, 183]. Die soeben beschriebene Vorgehensweise wird als automatisierte Methode zur Erstellung von Verhaltensmodellen bezeichnet.

Mit der vorgestellten Methode aus Abbildung 18 lassen sich Verhaltensmodelle automatisch erstellen, parametrieren und in standardisierter Form ausgeben. Unterschiedliche Modellierungstiefen sind jedoch bisher noch nicht berücksichtigt. Um mit der vorgestellten Methode Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefe erstellen zu können, gibt es grundsätzlich zwei mögliche Ansätze. Zum einen können die verschiedenen Modellierungstiefen über unterschiedliche Verhaltensmodellbibliotheken in der jeweiligen Modellierungstiefe bereitgestellt werden (Variante 1). Hierfür werden entsprechend viele Verhaltensmodellbibliotheken, mit allen relevanten Verhaltensmodellen der Komponenten, wie definierte Modellierungstiefen benötigt. Die Komponenten- oder Systemmodelle werden dabei entsprechend der Methode aus Abbildung 18 durch die Verwendung der Verhaltensmodellbibliothek mit der gewünschten Modellierungstiefe generiert. Zum anderen gibt es die Möglichkeit nur eine Verhaltensmodellbibliothek mit einer Modellierungstiefe bereitzustellen. Die anderen Modellierungstiefen werden daraus mit einer zusätzlichen Funktion zur Abstraktion der Modellierungstiefe abgeleitet (Variante 2). Beide beschriebenen Alternativen sind in Abbildung 19 dargestellt.

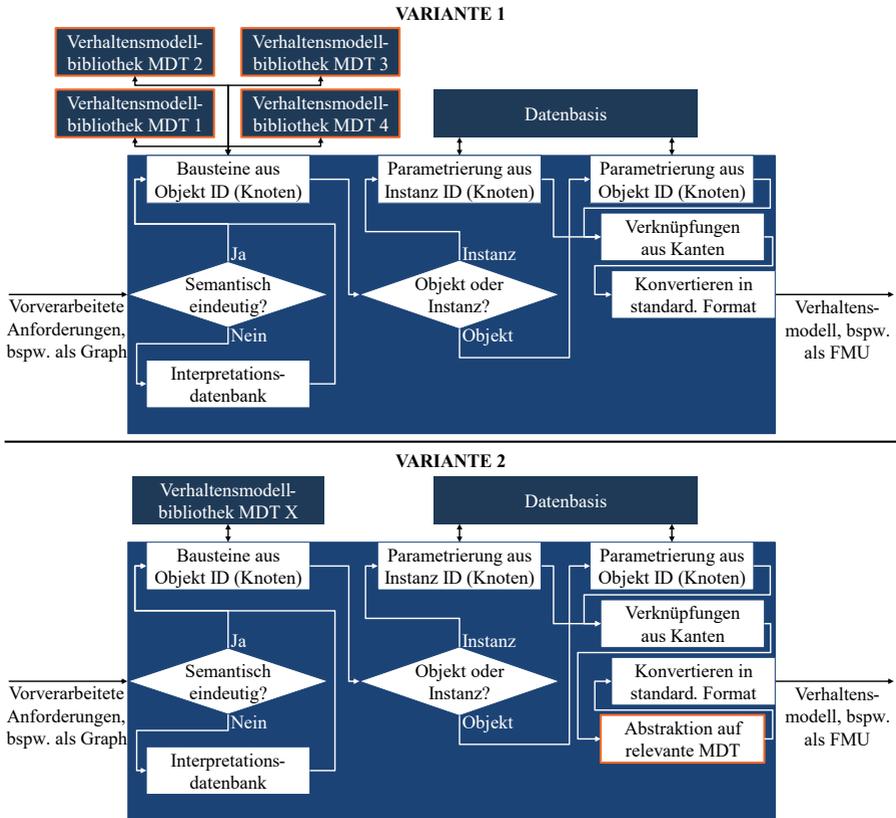


Abbildung 19: Zwei mögliche Varianten zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen in unterschiedlicher Modellierungstiefe

Dabei gibt es unterschiedliche Vor- und Nachteile für beide Varianten. Während der initiale Aufwand zur Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek für Variante 1 deutlich größer ist als bei Variante 2, ist die Entwicklung einer zusätzlichen Methode nicht notwendig, die eigentliche Erstellung der Verhaltensmodelle ist zudem einfacher und mit einem geringeren Aufwand verbunden. Bei Variante 2 ist dieser Sachverhalt entsprechend umgekehrt. Problematisch bei Variante 1 ist die Erstellung von Verhaltensmodellen für Gesamtsysteme in der Modellierungstiefe 1 bis 3, da hier große Abweichungen zwischen modelliertem und realem Verhalten auftreten können.

Aus dem zuletzt genannten Grund wird für die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen die Variante 2 mit einer Verhaltensmodellbibliothek und einer Methode zur Abstraktion der zusätzlichen Modellierungstiefen gewählt. Aufgrund der bereits angesprochenen Vereinfachungen in den Modellierungstiefen 1 bis 3 und deren Probleme bezüglich der Verwendung zur Konfiguration von Systemen aus einzelnen Komponenten wird die Modellierungstiefe 4 für die Verhaltensmodellbibliothek gewählt. Aus dieser werden Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 erstellt und parametrisiert. Im Anschluss müssen diese gegebenenfalls in die Modellierungstiefen 1 bis 3 abstrahiert werden. Hierfür wird im folgenden Abschnitt eine Methode vorgestellt, um den erläuterten Abstraktionsschritt vollautomatisiert durchzuführen. Ein automatisiertes Ableiten von Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 5 aus Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4 ist ohne weitere Informationen häufig nicht möglich.

3.3 Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe

Grundsätzlich können Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 manuell aus Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4 oder auch direkt erstellt werden. Dies erfordert jedoch ein hohes Verständnis des zu modellierenden Systems, bringt einen enormen zeitlichen Aufwand mit sich und ist sehr fehleranfällig. Bei der abstrakten Modellierung von Verhalten können beispielsweise schnell spezielle und selten auftretende Effekte vernachlässigt oder vergessen werden. Aus den genannten Gründen wird im nachfolgenden Abschnitt als Artefakt der zweiten DSR-Iteration ein Ansatz zur aufwandsarmen Abstraktion von Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4 in die Modellierungstiefen 1 bis 3 vorgestellt.

Grundlegend basiert der Ansatz für die automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe auf der Aufteilung von typischen automatisierten Prozessen der diskreten Fertigung in Zustände und Übergänge, wie beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt. Für eine automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe gilt es dabei zuerst die Zustände und im Anschluss daran die Übergänge zwischen diesen Zuständen zu detektieren. Für die Detektion der Zustände und der Übergänge wird das Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4 als Black-Box verwendet. Es werden lediglich die Eingänge des Modells beaufschlagt und die Ausgänge mit den sich dort ergebenden Werten analysiert. Dieses Vorgehen ist ähnlich dem Vorgehen bestehender datengetriebener Ansätze zur Erstellung von abstrahierten Verhaltensmodellen, unterscheidet sich jedoch in der Verwendung der extrahierten Daten. Diese werden für den Aufbau von Zustandsmaschinen verwendet, die abstrahierte Verhaltensmodelle repräsentieren.

Für die Modellierungstiefe 1 werden die Zustände des Systems als Zustände der Zustandsmaschine erstellt und die Bedingungen zwischen den Zuständen entsprechend dem Verhalten der Komponente oder des Systems ergänzt. Diese Struktur ist links in Abbildung 20 dargestellt. Durch diesen Aufbau lässt sich jedoch kein zeitliches Verhalten abbilden, da sobald eine Bedingung für einen Übergang am Eingang des Modells angelegt wird, der Zustand wechselt.

Um ein zeitliches Verhalten zu realisieren, müssen Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 2 erstellt werden. Diese basieren grundlegend auf den Zustandsmaschinen der Modellierungstiefe 1, ergänzen die Übergänge zwischen zwei Zuständen jedoch um mindestens einen weiteren Zustand, der als Zwischenzustand bezeichnet wird. Dieser Zwischenzustand wird äquivalent zu Modellierungstiefe 1 direkt durch die Erfüllung der Übergangsbedingung aktiv geschaltet. In diesem Zwischenzustand gibt es jedoch keine Aktionen, welche die Ausgänge des Verhaltensmodells

3.3 Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe

beeinflussen. Diese Aktionen werden erst im eigentlichen Zielzustand durchgeführt. Der Zielzustand wird nach einer definierten Zeit aktiv geschaltet. Realisiert wird das durch einen Übergang zwischen dem Zwischenzustand und dem Zielzustand mit der definierten Zeit als Bedingung, die vergehen muss, bis der Endzustand aktiv wird. Durch diesen Aufbau können Eingangssignale definierte zeitliche Aktionen auf die Ausgangssignale ausüben. Eine solche Struktur ist in der Mitte von Abbildung 20 dargestellt.

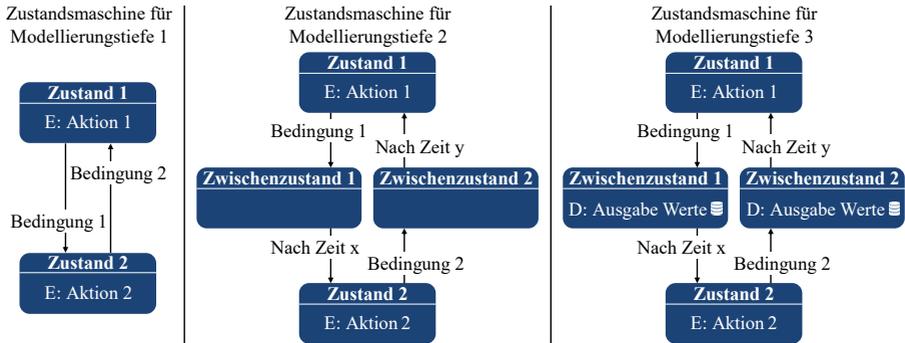


Abbildung 20: Struktur der Zustandsmaschinen für die unterschiedlichen Modellierungstiefen

Durch eine solche Struktur lassen sich jedoch keine kontinuierlichen Verläufe abbilden. Durch die zwei beschriebenen Strukturen können Ausgangssignale nur diskrete Endzustände ausgeben. Um Signale nicht nur diskret ausgeben zu können, sondern auch kontinuierliche Verläufe mit Zwischenwerten zu ermöglichen, gibt es die Zustandsmaschine der Modellierungstiefe 3. Diese basiert auf der Zustandsmaschine der Modellierungstiefe 2, erweitert diese jedoch um eine Aktion in den Zwischenzuständen. Dabei werden in den Zwischenzuständen, solange diese aktiv sind, Werte in einem bestimmten Takt ausgegeben. Dieser Takt muss vorher festgelegt werden. Typisch sind Taktzeiten von 10 ms oder 1 ms. Dabei umfasst ein jeweiliger Zwischenzustand ein Wertearray mit der Größe, die sich aus der Division der Übergangszeit aus dem Zwischenzustand und der Taktzeit ergibt. Nach Ablauf der Übergangszeit wird der Zwischenzustand verlassen und der Ausgang wird durch den konstanten Wert im aktiven Zustand gesetzt. Durch diese Struktur sind vorher definierte, kontinuierliche Verläufe für Ausgangssignale in Abhängigkeit der Eingangssignale möglich. Daher können solche Strukturen für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 3 eingesetzt werden.

Für die Erstellung der Zustandsmaschinen der Modellierungstiefen 1 bis 3 werden Zustände, Übergänge, Bedingungen für die Übergänge, zeitlicher Verzögerung der Übergänge und Werte für die Übergangszeiten benötigt. Hierfür wird die in Abbildung 21 dargestellte Methode zur Bestimmung der Zustände, Übergänge und weiterer Informationen herangezogen. Bevor die relevanten Informationen ermittelt werden können, müssen zuerst Ein- und Ausgänge definiert, die relevanten Wertebereiche der Eingänge und die relevanten Schritte festgelegt werden. Grundsätzlich könnte die nachfolgend beschriebene Methode ohne Informationen über den Wertebereich und die relevanten Schritte Anwendung finden. Dies hätte jedoch zur Folge, dass sich die Anzahl der Iterationen signifikant erhöht, da dann in einer möglichst kleinen Schrittweite alle möglichen Werte für den Eingang durchgegangen werden müssen. Verdeutlicht werden kann dies am Beispiel eines typischen Signaleingangs aus der Automatisierungstechnik, der zwei Zustände kennt: High-Pegel und Low-Pegel. Für diese zwei Zustände werden beispielsweise 0 V gegenüber Masse und 24 V gegenüber Masse verwendet. Wenn man der Methode lediglich die Information über den Wertebereich, jedoch nicht die Schrittweite, übergeben würde, müsste diese beispielsweise in 1 V Schritten den gesamten Wertebereich abprüfen. Dies würde dazu führen, dass insgesamt 25 Iterationen durchgeführt werden müssen, verglichen mit 2, sofern die Schrittweite bekannt ist.

Durch die Vorgabe der relevanten Wertebereiche an einem Eingang kann dieser Eingang als relevant für das abstrahierte Verhaltensmodell definiert werden. Wird einem Eingang nur ein Wert zugewiesen, wird dieser Wert als konstant im Verhaltensmodell angenommen. Dieser Eingang tritt später bei den abstrahierten Verhaltensmodellen nicht mehr auf. Durch dieses Vorgehen kann die Anzahl der relevanten Eingänge der abstrahierten Verhaltensmodelle vorgegeben werden.

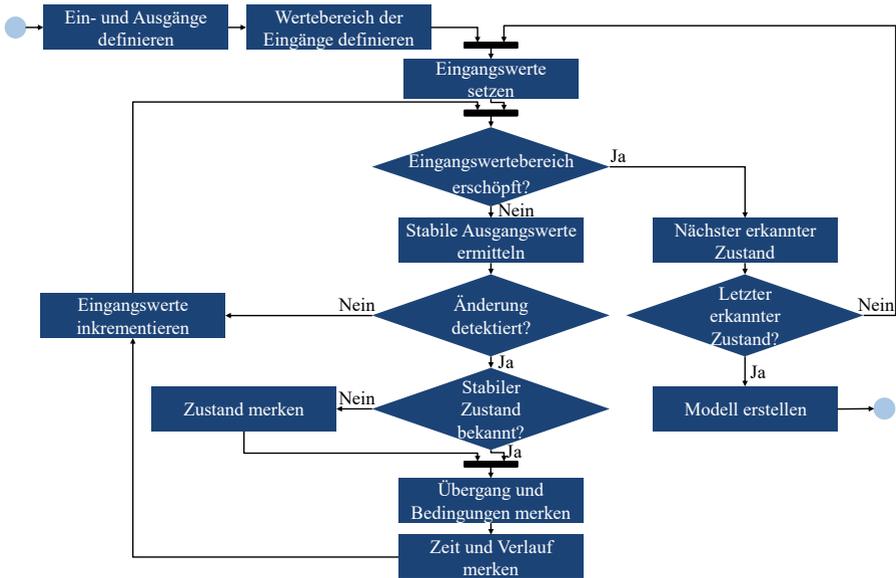


Abbildung 21: Methode für die Extraktion der Informationen zur automatisierten Abstraktion der Modellierungstiefe

Sobald die Wertebereiche und Schrittweiten definiert sind, werden die ersten Werte für die Eingänge gesetzt und die Simulation ausgeführt. Die Simulationszeit für einen Satz an Werten für die Eingänge ist auch ein Parameter, der die Leistungsfähigkeit der Methode beeinflusst. Je länger die Simulationszeit jeder Iteration gewählt wird, desto sicherer kann ein stabiler Zustand erkannt werden, da durch die längere Simulationszeit auch länger dauernde Einschwingvorgänge im System berücksichtigt werden. Gleichzeitig führt dies jedoch zu einer erhöhten Ausführdauer der Methode. Nach Abschluss der Simulation werden die stabilen Werte der Ausgänge ermittelt, die sich nach der definierten Simulationszeit einstellen. Diese werden mit den Eingangswerten verglichen. Sollte hierbei keine Änderung detektiert werden, ist keine Zustandsänderung festzustellen. In diesem Fall kann direkt der nächste Satz an Eingangswerten gesetzt werden und die Simulation beginnt erneut. Wird jedoch eine Änderung festgestellt, so muss zuerst überprüft werden, ob dieser Zustand bereits bekannt ist. Ist dies nicht der Fall, wird der Zustand als neuer Zustand im Zustandsspeicher hinterlegt. Unabhängig davon, ob der Endzustand der Simulation schon bekannt ist oder nicht, wird der Übergang, seine Bedingungen sowie der zeitliche Verlauf aller Ausgangssignale im Speicher für Übergänge hinterlegt. Im Anschluss daran wird der nächste Satz an Eingangswerten gesetzt und die nächste Simulation wird angestoßen. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis alle vorher festgelegten Eingangswerte abgearbeitet sind. Ist dies der Fall, wird der nächste Zustand als initialer Zustand festgelegt und erneut alle Sätze an Eingangswerten durchiteriert. Wichtig ist für alle Zustände, die nicht der initiale Zustand sind, das Setzen der Eingangswerte, um diesen Zustand zu

erreichen. Durch das Aneinanderhängen der Eingangssignale entsteht ein Eingangswerte-Vektor, der iterativ immer länger wird. Dies führt zu entsprechend längeren Simulationszeiten.

Der Ablauf zur Detektion aller Zustände und Übergänge ist zu Ende, wenn für alle gefundenen Zustände alle Eingangswerte durchiteriert sind. Dadurch ist sichergestellt, dass alle relevanten Informationen für die Erstellung des Verhaltensmodells in der gewünschten Modellierungstiefe gesammelt werden. Im Anschluss kann das entsprechende Verhaltensmodell nach den beschriebenen Strukturen aus Abbildung 20 aufgebaut werden.

Der Prozess zur Erstellung der Verhaltensmodelle in entsprechender Modellierungstiefe wird ebenso automatisiert durchgeführt. Hierzu werden zuerst alle erkannten Zustände mit deren entsprechenden Aktionen erstellt. Die Aktion setzt das Ausgangssignal auf den zuvor erkannten Wert. In einem nächsten Schritt werden, sofern benötigt, Zwischenzustände hinzugefügt. Sobald diese erstellt sind, werden alle Übergänge aus dem Übergangsspeicher mit den entsprechenden Bedingungen hinzugefügt. Dabei werden Übergänge aus Zuständen mit den entsprechend erkannten Bedingungen versehen. Übergänge aus Zwischenzuständen hingegen werden um hierfür erkannte Verzögerungen ergänzt. Dies sorgt dafür, dass der Zwischenzustand für die im Zwischenzustandsspeicher hinterlegte Zeit aktiv ist. Zuletzt werden, sofern benötigt, die Verläufe für die Ausgabe der Signale in den Zwischenzuständen der Modellierungstiefe 3 in Variablen im Modell hinterlegt. Das somit erstellte Verhaltensmodell kann gekapselt werden und bietet damit die notwendigen Ein- und Ausgänge, wie das entsprechende Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4.

3.4 Assistierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

Mit der vorgestellten automatisierten Abstraktion von Verhaltensmodellen kann die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen erweitert werden. Dies ermöglicht eine aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 1 bis 4. Grundvoraussetzung für die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen ist jedoch das Vorhandensein von Verhaltensmodellen aller relevanten Komponenten in einer Verhaltensmodellbibliothek der Modellierungstiefe 4. Die Erstellung dieser Verhaltensmodellbibliothek muss manuell durchgeführt werden. Dies ist fehleranfällig und mit signifikanten zeitlichen Aufwänden verbunden. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen, wird im Nachfolgenden als Artefakt der dritten DSR-Iteration ein Ansatz zur assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek vorgestellt.

Um diesen Ansatz besser einordnen zu können, werden die Verhaltensmodellbibliothek und deren Bausteine in Abbildung 22 näher betrachtet. Darin sind mittig die vier Ebenen aus Abbildung 7 dargestellt. Komponenten werden auf Modellebene durch die Verhaltensmodellbibliothek beschrieben. Aus dieser Verhaltensmodellbibliothek können Verhaltensmodelle von Komponenten und Systemen mit der vorgestellten Methode automatisiert für die Verwendung in Digitalen Zwillingen zusammengefügt und erstellt werden. Dieser Schritt wird in der Anwendung zyklisch ausgeführt.

Unterhalb der Verhaltensmodellbibliothek stellt sich die Situation anders dar. Viele der physikalischen Grundprinzipien, die für den Aufbau der Grundbausteine benötigt werden, sind in gängigen Simulationsprogrammen für die unterschiedlichen Disziplinen bereits als fertige Bausteine vorhanden. Einem Simulationsexperten ist es daraus möglich, die Grundbausteine zusammenzustellen. Grundsätzlich wäre es möglich auch diesen Prozess der Erstellung zu automatisieren. Hierfür fehlt jedoch häufig die entsprechende Dokumentation, aus welchen physikalischen Grundprinzipien ein bestimmter Grundbaustein besteht. Zudem handelt es sich bei vielen Grundbausteinen auch um Komponentenbestandteile, die von Lieferanten bezogen werden. Es ist denkbar, dass in Zukunft nicht nur die Komponentenbestandteile als physische Assets vom Lieferanten bezogen werden, sondern auch die entsprechenden Verhaltensmodelle für die Grundbausteine. Dadurch könnte die Anzahl der Grundbausteine, die von Simulationsexperten manuell erstellt werden müssen, erheblich reduziert werden.

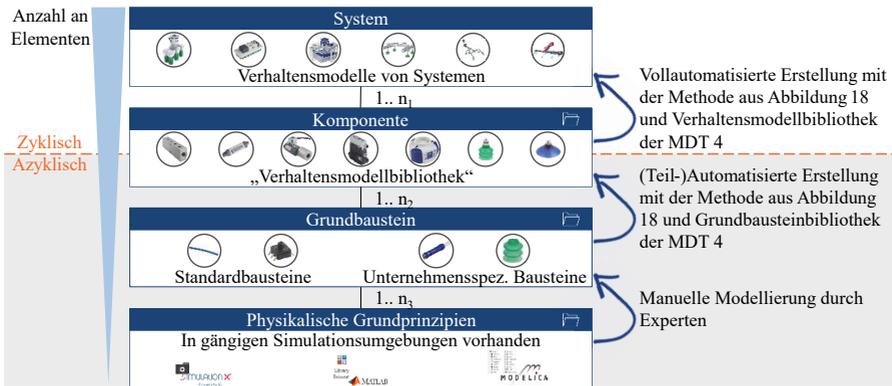


Abbildung 22: Einordnung der Verhaltensmodellbibliothek und der Bibliothek für Grundbausteine über dem Modellierungsumfang (Bilderquellen: [98, 184–186])

Anders sieht das für den Übergang der Grundbausteine zur Verhaltensmodellbibliothek der Komponenten aus. Hierfür können Informationen aus Schaltplänen, Softwarecode oder anderen Quellen herangezogen werden, da diese Dokumente häufig den Aufbau einer Komponente in der jeweiligen Disziplin mit den entsprechenden Grundbausteinen beschreiben. Sofern diese Informationen digital nutzbar vorliegen, kann die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen aus Abbildung 18 mit den Grundbausteinen als Bibliothek wiederverwendet werden. Dies verlagert den manuellen Aufwand von der Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek hin zur Erstellung der Grundbausteinbibliothek. Bei der Erstellung der Grundbausteine hat der Simulationsexperten weiterhin die Möglichkeit den Detailgrad einzelner physikalischer Zusammenhänge festzulegen also welche Effekte wie detailliert in einer entsprechenden Komponente modelliert werden sollen.

Der große Vorteil durch die Verlagerung des manuellen Aufwands von der Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek hin zur Erstellung einer Grundbausteinbibliothek ist die signifikant geringere Anzahl an benötigten Grundbausteinen. Während die Verhaltensmodellbibliothek beim betrachteten repräsentativen Komponentenhersteller im mittleren vierstelligen Bereich liegt, werden hierfür lediglich eine niedrige dreistellige Anzahl an Grundbausteinen benötigt. Dies reduziert den manuellen Aufwand, sowie die Fehleranfälligkeit deutlich und verbessert die schnelle und einfache Adaption der Bibliothek an neue Anforderungen.

Für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus der Grundbausteinbibliothek kann die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen, dargestellt in Abbildung 18, verwendet werden. Diese ermöglicht nicht nur eine aufwandsarme initiale Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek, sondern auch eine einfache Änderung dieser. Eine Änderung kann beispielsweise durch eine Anpassung der Detaillierung der Grundbausteine ausgelöst werden. Zentraler Aspekt für die Erstellung ist die Bereitstellung der Information, aus welchen Grundbausteinen und Verknüpfungen eine Komponente aufgebaut ist. Die aufwandsarme Aufbereitung dieser Informationen ist elementar für die Methode und wird nachfolgend näher betrachtet.

Die Information, aus welchen Grundbausteinen eine Komponente besteht und wie diese Grundbausteine zusammengeschaltet sind, liegt in Unternehmen häufig beispielsweise in Form von Schaltplänen oder technischen Zeichnungen vor. Die Informationsquellen können danach klassifiziert werden, ob sie strukturiert sind und ob sie eine einfach zu verwendende Schnittstelle aufweisen. Liegt den Informationen ein Informationsmodell zu Grunde, handelt es sich um Informationen in strukturierter Form. Ist dies nicht der Fall, wird es als Expertenwissen bezeichnet.

- *Nicht strukturierte Informationsquelle (Expertenwissen)*: Teilweise liegt das für Verhaltensmodelle erforderliche Wissen ausschließlich bei Experten vor. Alternativ gibt es auch nicht strukturierte Dokumentationen des Expertenwissens in Papier- oder digitaler Form. Beispiele hierfür können sehr unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Möglich sind handschriftliche Zeichnungen, beschreibende Texte oder Informationen in Tabellenform.
- *Strukturierte Informationsquelle mit passender Schnittstelle*: Damit sind Computerprogramme mit Schnittstellen für den Export der strukturiert vorliegenden Informationen gemeint. Dabei wird in solchen Computerprogrammen häufig der Aufbau der Komponente in einer oder mehreren Disziplinen beschrieben. Die Beschreibung des Aufbaus für die elektrische oder fluidische Disziplin wird häufig als Schaltplan bezeichnet. Die in solchen Computerprogrammen vorliegenden Informationen haben ein bestimmtes definiertes Informationsmodell, weswegen sie als strukturierte Informationsquellen beschrieben werden können. Wichtig für die Informationsquelle ist die Verfügbarkeit von entsprechenden Schnittstellen. Durch die Schnittstellen können die im Computerprogramm strukturiert vorliegenden Informationen in einer oder mehrere Disziplinen bereitgestellt werden. Dafür wird ein strukturiertes Datenformat, wie beispielsweise CSV oder XML verwendet. Dabei beschränkt sich diese Informationsquelle nicht nur auf Disziplinen mit Bezug zu Hardware. In gängigen Computerprogrammen können beispielsweise Diagramme in UML (Unified Modeling Language) erstellt werden, welche die einzelnen Funktionen der Software strukturiert beschreiben. Diese UML-Diagramme können ebenso exportiert und im Anschluss für die Erstellung eines Bausteins für die Verhaltensmodellbibliothek verwendet werden.
- *Strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle*: Sofern die Informationen in der Quelle zwar in strukturierter Form vorliegen, jedoch keine passende Schnittstelle verfügbar ist, handelt es sich um eine strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle. Gängige Beispiele für diese dritte Form einer Informationsquelle sind Schaltpläne in Papier- oder PDF-Form. Die Informationen darin sind zwar durch ein definiertes Informationsmodell strukturiert, können aber nicht ohne weiteres in anderen digitalen Anwendungen wiederverwendet werden.

Diese drei Quellen für den Aufbau von Bausteinen für die Verhaltensmodellbibliothek aus Grundbausteinen sind links in Abbildung 23 dargestellt. Die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek basiert auf der Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen, welche mittig dargestellt ist. Hierbei kommt als Bibliothek jedoch nicht die Verhaltensmodellbibliothek zum Einsatz, da diese das Ergebnis des Ansatzes darstellt. Vielmehr kommen hierfür Bibliotheken mit den Grundbausteinen aus den für die jeweilige Komponente relevanten Disziplinen zum Einsatz (grün, rot, blau). Über den Detaillierungsgrad der Grundbausteine kann entsprechend der Detaillierungsgrad der Verhaltensmodellbibliothek festgelegt, also wie detailliert einzelne physikalische Effekte in der Verhaltensmodellbibliothek der Modellierungstiefe 4 ausgeprägt sind. Die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen baut ein Verhaltensmodell auf Basis der Informationen aus einem Graphen auf. Für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek kommen je nach Komponente ein oder mehrere disziplinspezifische Graphen zum Einsatz (grün, rot, blau). Mithilfe dieser Graphen und der Grundbausteinbibliotheken werden die Verhaltensmodelle einer Komponente in der jeweiligen Disziplin erstellt. Diese einzelnen disziplinspezifischen Verhaltensmodelle sind jedoch noch nicht miteinander verknüpft.

Die Informationen zur Verknüpfung der einzelnen Disziplinen werden ebenso in Form eines Graphen bereitgestellt (grau). Dabei kann der entsprechende Graph entweder aus einer disziplinübergreifenden Dokumentation oder mithilfe von Expertenwissen erstellt werden. Die Erstellung des Graphen aus Expertenwissen ist hierbei die dominierende Vorgehensweise, da viele Dokumentationen und Softwaretools noch immer stark disziplinspezifisch orientiert sind. Es gibt aktuell wenige Softwaretools die zwei oder mehr Disziplinen miteinander verknüpfen. Eine vollständige Dokumentation aller verknüpften Disziplinen ist ebenso nur in den seltensten Fällen verfügbar.

Anders sieht die Lage für die Informationen der Komponenten in den einzelnen Disziplinen aus. Die hierfür genannten drei möglichen Informationsquellen müssen in entsprechende Graphen übersetzt werden. Die Ansätze zur Erstellung von Graphen aus den unterschiedlichen Informationsquellen sind in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

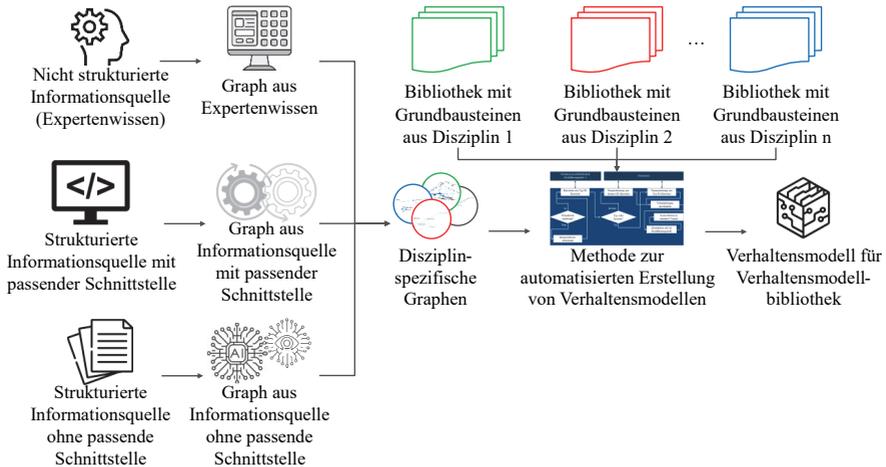


Abbildung 23: Konzept zur aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek (Bildquelle: [98])

3.4.1 Graph aus Expertenwissen

Für die Erstellung von Graphen aus Expertenwissen kann eine Benutzeroberfläche für die Zusammenstellung der gewünschten Struktur der Graphen verwendet werden. Dazu kann die nutzende Person Knoten des Graphen mit den relevanten Informationen, wie Name, Bezeichner und weiteren Merkmalen, anlegen. Diese Knoten wiederum können vom Bediener mit Kanten verknüpft werden. In diesen Kanten sind die Informationen über die verbundenen Anschlüsse zu hinterlegen. Sofern alle relevanten Informationen im Graphen hinterlegt sind, kann dieser abgespeichert und zur Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek verwendet werden.

3.4.2 Graph aus Informationsquelle mit passender Schnittstelle

Sofern Primärinformationen zur Erstellung einer Komponente oder eines Bausteins in einem Computerprogramm in strukturierter Form und mit entsprechender Schnittstelle vorliegen, kann diese Schnittstelle entsprechend genutzt werden. Das in der jeweiligen Informationsquelle vorliegende Informationsmodell muss für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek jedoch zunächst transformiert werden. Die Transformation des Informationsmodells ist meist individuell für jede Informationsquelle, da die Informationen darin häufig individuell verarbeitet werden müssen. Die Bereitstellung der Informationen erfolgt häufig in standardisierter Form. Gängige Formate hierfür sind CSV- oder XML-Dateien. Da in Unternehmen jedoch üblicherweise einige wenige Computerprogramme für die Dokumentation der Komponenten zum Einsatz kommen, muss die Transformation für das Informationsmodell nicht für jede Komponente einzeln durchgeführt werden, sondern lediglich einige wenige Male für die im Unternehmen verwendeten Computerprogramme. Die Transformation eines beispielhaften Informationsmodells ist in Abbildung 24 veranschaulicht.

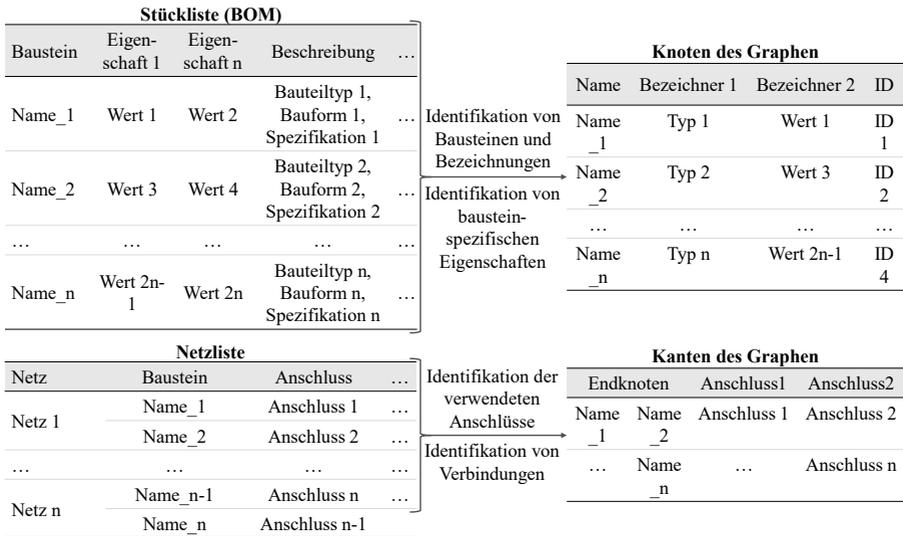


Abbildung 24: Transformation des Informationsmodells aus Stückliste und Netzliste in Knoten und Kanten eines Graphen

Im linken Bereich der Abbildung sind zwei der Dateien aus dem Computerprogramm, das als Informationsquellen genutzt wird, dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Stückliste (engl.: Bill of Materials, BOM) und eine Netzliste. Aus diesen zwei strukturiert dargestellten Quellen können die relevanten Informationen für den Graphen extrahiert werden. Aus der Stückliste können die Bausteintypen, deren Bezeichnung und bausteinspezifische Eigenschaften bestimmt werden. Mithilfe der Netzliste werden die Verbindungen zwischen den Bausteinen und der verwendeten Anschlüsse identifiziert. Das Zusammenführen erfolgt über den Namen des Bausteins, der sowohl in der BOM als auch in der Netzliste verwendet wird. Aus den Informationen zu den verwendeten Bausteinen können die Knoten des Graphen aufgebaut werden. Hier werden auch bausteinspezifische Parameter hinterlegt. Die erstellten Knoten werden in einem nächsten Schritt mit den Informationen aus der Netzliste durch Kanten verknüpft. Die Kanten enthalten die Informationen über die Anschlussbezeichnungen einer jeweiligen Verbindung. Nach Abschluss dieser Transformation des Informationsmodells können die Informationen in Form eines Graphen für die Erstellung der Verhaltensmodelle für die Verhaltensmodellbibliothek verwendet werden.

3.4.3 Graph aus Informationsquelle ohne passende Schnittstelle

Sofern Informationen in Quellen ohne passende Schnittstellen vorliegen, können diese nicht ohne weiteres durch eine Transformation des Informationsmodells digital nutzbar gemacht werden. Beispiele für solche Informationsquellen sind Schaltpläne in Papierform, PDF-Dokumente oder Programme ohne geeignete Exportschnittstellen. Solche Informationsquellen gibt es vor allem für Komponenten, die vor Jahren entwickelt wurden. Prinzipiell gibt es jedoch auch digitale Informationsquellen mit unpassenden Schnittstellen, welche die Informationen beispielsweise ausschließlich visuell in Form eines Schaltplans als PDF oder einer Bilddatei exportieren können. Auch in diesem Fall kann die nachfolgend vorgestellte Methode angewendet werden.

Die Methode zur Extraktion der Informationen aus einer Quelle ohne passende Schnittstelle umfasst fünf Schritte, dargestellt in Abbildung 25.

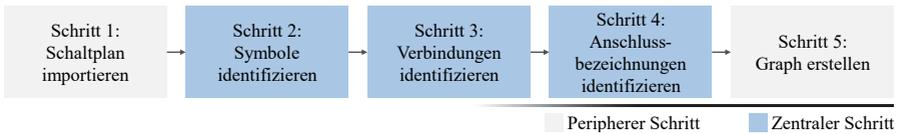


Abbildung 25: Vorgehen zur Extraktion von Informationen aus Quellen ohne passende Schnittstellen

Die Schritte 1 und 5 sind periphere Schritte, die notwendig sind, aber nicht den Kern der Methode bilden. Die Schritte 2, 3 und 4 sind die zentralen Schritte der Methode. Schritt 1 beschreibt dabei den Import des gewünschten Schaltplans, aus dem in den Schritten 2 bis 4 alle relevanten Informationen extrahiert werden, die dann in Schritt 5 in einen Graphen überführt werden. Im Folgenden werden die drei zentralen Schritte 2 bis 4 erläutert.

3.4.3.1 Schritt 2: Symbole identifizieren

Zunächst steht die Identifikation der Symbole im Schaltplan im Vordergrund. Dazu können Ansätze der Objekterkennung verwendet werden. Es stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die jeweils ihre Vor- und Nachteile haben. Für die Identifikation von Symbolen in Schaltplänen hat sich die R-CNN-Methode, insbesondere die Faster-RCNN-Methode, in früheren Studien als effizienter und zuverlässiger Ansatz erwiesen [187, 188]. Das ResNet-50 wird als vortrainiertes Netz aufgrund seiner günstigen Vorhersagezeit und Genauigkeit, insbesondere bei der Erkennung kleiner Objekte, verwendet [151, 189]. Dieses wird mit gelabelten Schaltplänen nachtrainiert. Das Labeln der Schaltpläne muss hierfür initial durchgeführt werden. Dabei ist es nicht entscheidend, ob international normierte oder unternehmensspezifische Symbole verwendet werden. Wichtig ist nur, dass diese Symbole konsistent im Unternehmen verwendet werden. Für das Labeln werden die Symbole mit jeder Ausprägung als eigenes Symbol hinterlegt. Mit diesem Ansatz konnten in Vorversuchen deutlich höhere Werte für die Trefferquote erzielt werden als mit separat für jede Eigenschaft angelegten Labeln. Neben dem eigentlichen Symbol wird dessen Orientierung mitberücksichtigt. Dadurch kann mit den Informationen aus Schritt 2 später in Schritt 4 eine Identifikation der jeweiligen Anschlussbezeichnung einer Verbindung durchgeführt werden. Die beschriebenen Schritte führen zu einem für den Anwendungsfall trainierten CNN. Die bisher beschriebenen Arbeitsschritte werden nur azyklisch durchgeführt, wie im oberen Bereich von Abbildung 26 dargestellt.

Das so trainierte CNN kann im Anschluss für den Faster R-CNN Algorithmus verwendet werden, um aus einem geladenen Schaltplan die darin vorhandenen Symbole und deren Positionen zu detektieren. Bei diesem Vorgehen handelt es sich um die zyklischen Arbeitsschritte, die jedoch vollständig automatisiert ablaufen können.

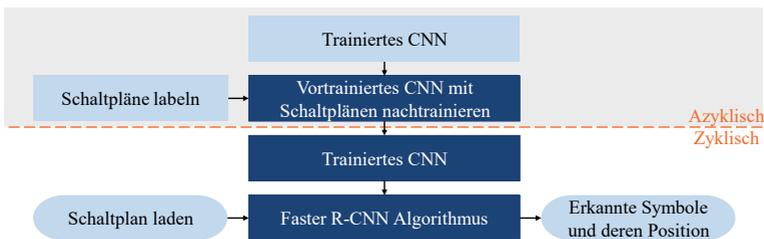


Abbildung 26: Ablauf zur Erkennung von Symbolen in Schaltplänen

3.4.3.2 Schritt 3: Verbindungen identifizieren

Nachdem die Symbole im Schaltplan erkannt werden konnten, werden im nächsten Schritt die Verbindungen zwischen den Symbolen detektiert. Der Ablauf zur Detektion ist in Abbildung 27 dargestellt. Zu diesem Zweck werden zunächst alle erkannten Symbole aus dem Schaltplan entfernt. Dies geschieht auf Basis der erkannten Rechtecke, die als Ergebnis der Symbolerkennung aus Schritt 2 vorliegen. Die Linien zwischen den Symbolen bleiben als voneinander unabhängige Flächen erhalten. Die einzelnen Linien werden zur späteren Verwendung gespeichert.

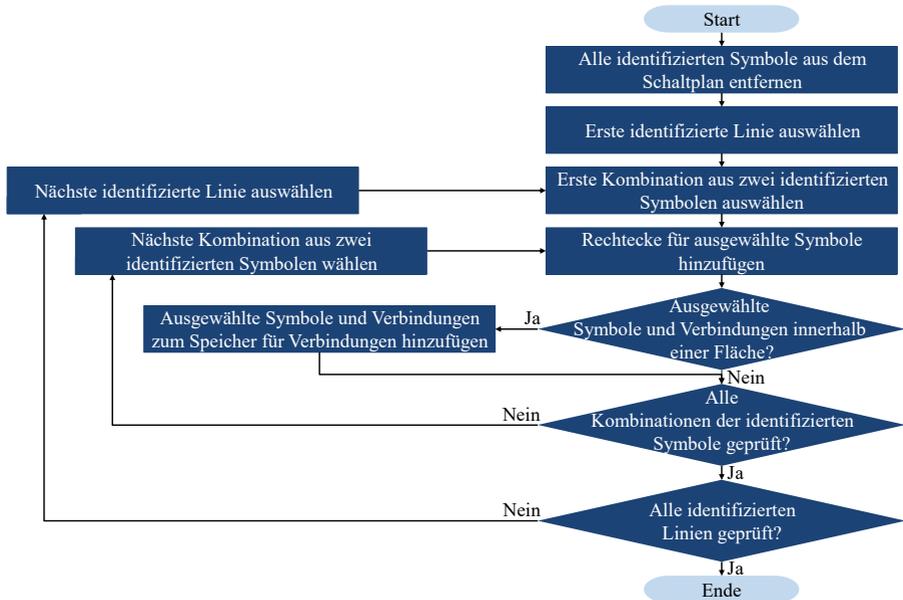


Abbildung 27: Ablauf zur Detektion der Verbindung zwischen zwei erkannten Symbolen in einem Schaltplan

Aus diesem Speicher wird im Anschluss eine Linie ausgewählt und in ein dafür vorgesehenes Binärbild kopiert. Im nächsten Schritt werden die ersten zwei erkannten Symbole ausgewählt und die für die Symbole erkannten Rechtecke wieder als Fläche in das Binärbild mit der ersten identifizierten Linie eingefügt. In dem Binärbild befindet sich nun die erste identifizierte Linie, sowie die ersten zwei identifizierten Symbole. Bilden diese drei Objekte eine zusammenhängende Fläche, verbindet die Linie die zwei ausgewählten Symbole. Gibt es hingegen zwei oder mehr unabhängige Flächen voneinander, bildet die ausgewählte Linie keine Verbindung zwischen den zwei ausgewählten Symbolen. Die Identifikation der Flächen kann mit entsprechenden Methoden der Bildverarbeitung erreicht werden. Wird nur eine zusammenhängende Fläche identifiziert, werden sowohl die Symbole als auch die aktuelle Linie in einem Speicher für Verbindungen hinterlegt. Über diese Vorgehensweise werden Verbindungen zwischen zwei Symbolen durch eine Linie detektiert.

Unabhängig davon, ob die drei Objekte eine Fläche bilden oder nicht, wird die aktuelle Kombination an Symbolen durch eine neue Kombination an Symbolen im verwendeten Bild ersetzt. Diese neue Kombination der zwei Symbole wird wieder auf Verbindung mit der ersten Linie überprüft. Der beschriebene Prozess wird für alle Kombinationen der erkannten Symbole in Verbindung mit der ersten Linie durchgeführt. Im Anschluss daran wird die nächste Linie ausgewählt und ersetzt die erste

Linie im Bild. Hierfür werden wiederum alle Kombinationen der Symbole mit zwei ausgewählten Symbolen getestet. Dieser Prozess wird für alle erkannten Linien wiederholt. Aus dem beschriebenen Verfahren ergibt sich folgende Gleichung zur Bestimmung der Anzahl der zu analysierenden Bilder:

$$i = \frac{(n_{\text{symp}} - 1)^2 + (n_{\text{symp}} - 1)}{2} * l_{\text{symp}} \quad (3.1)$$

Dabei ist n_{symp} die Anzahl der erkannten Symbole und l_{symp} die Anzahl der erkannten unabhängigen Linien. Um das beschriebene Verfahren zu realisieren, werden zusätzliche Bildverarbeitungs-funktionen wie morphologische Dilatation und Schließung eingesetzt. Dies ist notwendig, da z.B. Verbindungen teilweise unterbrochen sein können.

3.4.3.3 Schritt 4: Anschlussbezeichnungen identifizieren

Nach der Identifikation von Verbindungen zwischen den erkannten Symbolen ist im dritten Schritt die Identifikation Anschlussbezeichnungen an jedem Symbol relevant. Hierfür gibt es zwei mögliche Vorgehensweisen, die abhängig vom vorliegenden Schaltplan verwendet werden können.

Enthält der analysierte Schaltplan Anschlussbezeichnungen, so können diese mit OCR-Methoden direkt ausgelesen werden. Um festzustellen, ob eine Beschriftung der Anschlussbezeichnung im Schaltplan vorhanden ist, werden die Ergebnisse der OCR-Methode verwendet. Findet die OCR-Methode keine Zahlen oder Buchstaben in der Nähe der Anschlüsse, wird davon ausgegangen, dass keine Beschriftung der Anschlussbezeichnungen vorhanden ist. Werden jedoch Buchstaben oder Zahlen erkannt, werden diese iterativ mit den erkannten Verbindungen aus dem vorherigen Schritt abgeglichen. Hierzu werden die Positionen der erkannten Anschlussbezeichnungen mit den Positionen der Schnittpunkte zwischen Linien und Symbolen abgeglichen. Die Zuordnung einer Anschlussbezeichnung zur Schnittstelle zwischen Linie und Symbol erfolgt über die Minimierung des Abstands. Für jede Verbindung zwischen zwei Symbolen werden die zugeordneten Anschlussbezeichnungen hinterlegt. Dabei werden einer Verbindung in der Regel zwei Anschlussbezeichnungen zugewiesen, da diese normalerweise an zwei Symbolen angeschlossen ist. Eine Anschlussbezeichnung ist also einer Linie und einem Symbol zugewiesen.

Komplexer sind Schaltpläne, die keine Anschlussbezeichnungen enthalten. Diese kommen in der Praxis jedoch häufig vor. Um für solche Schaltpläne die Anschlussbezeichnungen ermitteln zu können, wird eine Referenzdatenbank mit beschrifteten Symbolen benötigt. Für diese Referenzdatenbank genügt es, die entsprechenden Symbole aus einem bekannten Schaltplan auszuschneiden und bei Bedarf mit einem einfach aufgebauten Bildbearbeitungsprogramm zu beschriften. Beispiele für repräsentativ beschriftete Symbole sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Symbole verdeutlichen direkt, dass weder die genaue Position der Anschlussbezeichnung noch die Schriftart identisch sein müssen. Möglich wäre neben einer digitalen Beschriftung auch eine händische Beschriftung mit anschließendem Scan zur Digitalisierung. Die OCR-Methoden als auch die Methode zur Zuordnung der Anschluss-bezeichnungen ist ausreichend robust für eine große Varianz der Beschriftungen.

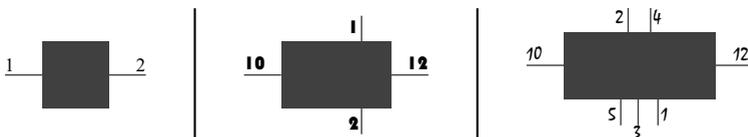


Abbildung 28: Beschriftung von beispielhaften Bausteinen

Abhängig vom aktuell erkannten Symbol kann über den Dateinamen das jeweils beschriftete Referenzsymbol verwendet werden. Im Referenzsymbol werden zuerst mittels der bereits erwähnten

OCR-Methode die vorhandenen Anschlussbezeichnungen erkannt. Danach wird das Referenzsymbol auf das erkannte Symbol ausgerichtet. Hierfür werden Informationen aus Schritt 2 verwendet, um das Referenzsymbol auf das erkannte Symbol zu drehen und gegebenenfalls zu spiegeln und damit die Position der erkannten Anschlussbezeichnungen auszurichten. Zudem wird das Referenzsymbol an die Größe des erkannten Symbols angepasst. Hierzu wird das Referenzsymbol inklusive der Anschlussbezeichnung skaliert.

Anschließend kann das aktuell betrachtete Symbol durch das Referenzsymbol ersetzt und zu den jeweiligen Anschlüssen zugeordnet werden. Der Abstand des aktuellen Anschlusses zu allen Anschlussbezeichnungen wird berechnet und die Beschriftung mit dem geringsten Abstand ausgewählt. Die für jede Verbindung am Symbol erkannte Anschlussbezeichnung wird, wie oben beschrieben, den Verbindungen am Symbol zugeordnet.

4 Entwicklung von domänenspezifischen Verhaltensmodellen

Eine sehr wichtige Disziplin für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 von Vakuum-Greifsystemen ist die Fluidik. Für die zwei essenziellen Komponenten Vakuumzerzeuger und Vakuumsauggreifer existieren bisher keine hinreichend genauen und öffentlich zugänglichen Verhaltensmodelle. Aus diesem Grund werden im Zuge der Arbeit verbesserte, neue Verhaltensmodelle für diese Komponenten erarbeitet. Diese sind Ergebnis der ersten DSR-Iteration und werden im Folgenden vorgestellt und evaluiert.

4.1 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumzerzeuger

Vakuumzerzeuger sind essenzieller Bestandteil eines jeden Vakuum-Greifsystems. Sie stellen grundlegend eine Komponente zum Transport von Masseteilchen bei gleichzeitiger Druckerhöhung Richtung Auslass dar. Beschrieben werden kann ein solcher Vakuumzerzeuger mithilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik für offene Systeme. Unter Vernachlässigung der Zu- oder Abfuhr von Wärme über die Systemgrenze und der Änderung der Höhenkoordinate des Fluids während der Durchströmung ergibt sich die nachfolgende Gleichung für die Leistung P [190]:

$$P = \dot{m}_b \left(h_b + \frac{w_b^2}{2} \right) - \dot{m}_a \left(h_a + \frac{w_a^2}{2} \right) \quad (4.1)$$

Das durch Gleichung (4.1) beschriebene Verhalten kann beispielsweise durch eine Massenstromquelle (in „MATLAB Simscape“) abgebildet werden [191]. Ein zentrales Merkmal von Vakuumzerzeugern ist, dass deren Fähigkeit zum Abführen eines Massestroms von vielen Faktoren abhängt. Ein bereits angesprochener Einflussfaktor aus Kapitel 2 ist das im momentanen Arbeitspunkt am Vakuumzerzeuger anliegende Vakuum. Beispielhafte Kennlinien hierfür sind in Abbildung 3 dargestellt. Neben dieser Abhängigkeit gibt es weitere Einflussfaktoren auf den Massenstrom eines Vakuumzerzeugers. Viele davon sind abhängig vom physikalischen Grundprinzip der jeweiligen Bauart des Vakuumzerzeugers. Zum Beispiel wird der Massenstrom von pneumatischen Vakuumzerzeugern neben dem aktuell anliegenden Vakuum auch stark vom anliegenden Betriebsdruck beeinflusst. Dies ist rechts in Abbildung 3 dargestellt. Die Modellierung des Vakuumzerzeugers als eine konstante Massenstromquelle allein reicht also nicht aus. Aus diesem Grund setzt diese Arbeit auf eine gesteuerte Massenstromquelle, wie beispielsweise in [192] beschrieben. Der aktuell geförderte Massenstrom ist nichtlinear abhängig vom momentan anliegenden Vakuum und diversen weiteren Faktoren. Da sich die Abhängigkeit weder direkt mit analytischen Formeln (beispielhaft veranschaulicht in Abbildung 3), noch mithilfe numerisch lösbarer Strömungsmechaniken im 3D-Raum hinreichend genau beschreiben lassen, werden in dieser Arbeit hierfür Datenkennfelder verwendet [58]. In diesen Datenkennfeldern ist der aktuelle Massenstrom des Vakuumzerzeugers in Abhängigkeit von den relevanten Einflussgrößen hinterlegt. Durch die Verwendung solcher Datenkennfelder können unterschiedlichste Vakuumzerzeuger mit dem gleichen Grundbaustein abgebildet werden. Für verschiedene Vakuumzerzeuger muss lediglich das Datenkennfeld angepasst werden.

Der soeben beschriebene Aufbau für die Modellierung ist schematisch in Abbildung 29 dargestellt. Zentraler Bestandteil dabei ist die angesprochene Massenstromquelle, welche die Kernfunktionalität des Vakuumzerzeugers, das Abführen von Masseteilchen, realisiert. Diese Massenstromquelle wird anhand der Werte aus dem jeweils zugehörigen Datenkennfeld gesteuert. Das Datenkennfeld umfasst je nach Betrachtungsfokus unterschiedliche Einflussgrößen. In der grundlegendsten Variante wird als Eingangsgröße für das Datenkennfeld lediglich der aktuelle Vakuumwert im angeschlossenen System

4.1 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumerzeuger

erfasst. Dieses 1D-Datenkennfeld kann nach Belieben um weitere Einflussfaktoren, wie dem Betriebsdruck oder dem Umgebungsdruck auf 2D- bis nD-Datenkennfelder erweitert werden.

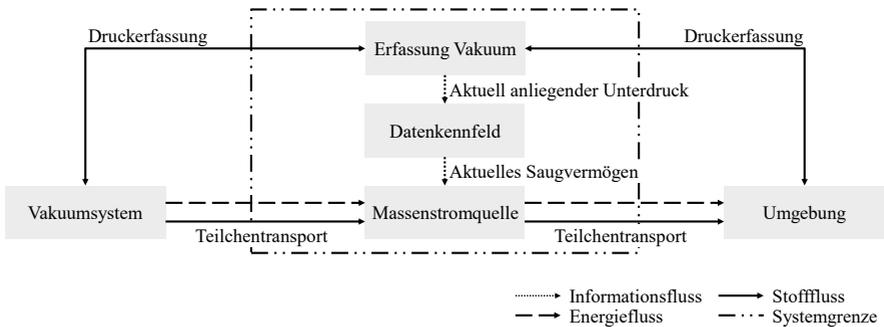


Abbildung 29: Funktionsstruktur für das Verhaltensmodell eines Vakuumerzeugers

Ein weiteres Beispiel für einen zusätzlichen Einflussfaktor ist die aktuelle elektrische Leistung von elektrischen Vakuumerzeugern, wie Vakuumpumpen oder Vakuumgebläsen. Die entsprechenden Kennlinien können für die Modellierung in weiteren Datenkennfeldern hinterlegt werden. Auch diese weiteren Verhaltensaspekte von Vakuumerzeugern sind häufig direkt abhängig vom aktuellen Vakuum. Die Ausgabe von Werten aus dem Datenkennfeld kann für weiterführende Funktionen oder als Ausgang des Modells verwendet werden. Die beschriebene Funktionsstruktur mit der Erweiterung um die elektrische Eingangsleistung des Vakuumerzeugers ist in Abbildung 30 dargestellt.

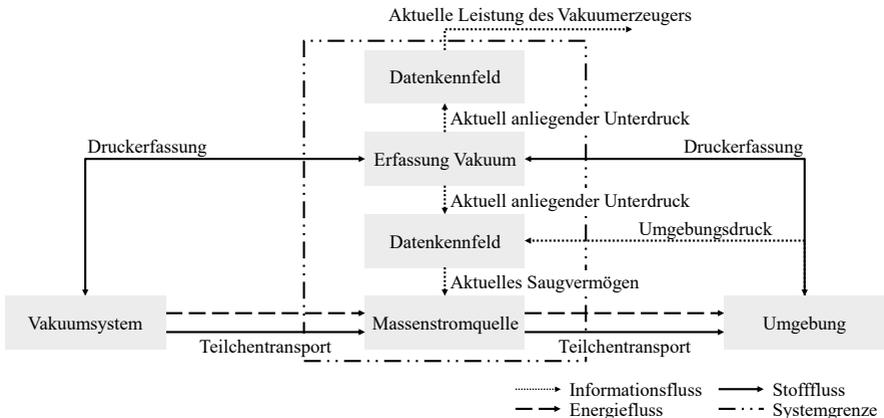


Abbildung 30: Funktionsstruktur für das Verhaltensmodell eines Vakuumerzeugers mit zusätzlichen Einflussgrößen

Darin ist für das bereits in Abbildung 29 verwendete Datenkennfeld eine weitere Eingangsgröße, der Umgebungsdruck, realisiert. Wie bereits angesprochen kann die Anzahl der Eingangsparameter für das Datenkennfeld nahezu beliebig erweitert werden. Durch die Verwendung solcher Datenkennfelder ist es aufwandsarm möglich, verschiedene Vakuumerzeuger mit unterschiedlichen Aspekten und Detaillierungsgraden zu modellieren. Dabei ist es nicht relevant, ob die Kennlinie einer linearen Funktion gleicht oder durch eine nichtlineare Funktion beschrieben werden kann.

Das beschriebene Konzept berücksichtigt jedoch lediglich die Kernfunktionalität eines Vakuumerzeugers. Diese entspricht bei pneumatischen Vakuumerzeugern einer Venturidüse und bei elektrischen Vakuumerzeugern dem Pumpen- oder Gebläsekern. Etwaige weitere periphere Komponenten, wie z. B. Ventile zur Ansteuerung der Venturidüse oder Sensorik zur Steuerung, sind dabei bisher vernachlässigt. Diese werden bei Bedarf in den Grundbausteinen ergänzt, um eine realitätsnahe Funktionalität zu ermöglichen.

Realisiert wird der hergeleitete Grundbaustein in „MATLAB Simscape“. Dies wird am Beispiel des Grundbausteins einer Venturidüse für einen pneumatischen Vakuumerzeuger vorgestellt, dargestellt in Abbildung 31. Darin sind die drei typischen Anschlüsse als Anschlüsse des Bausteines äquivalent zur realen Venturidüse dargestellt. Anschluss 1 repräsentiert den Eingang für die Betriebsdruck, Anschluss 2 den Anschluss für das Vakuumsystem und Anschluss 3 den Auslass, an dem typischerweise ein Schalldämpfer angebracht ist.

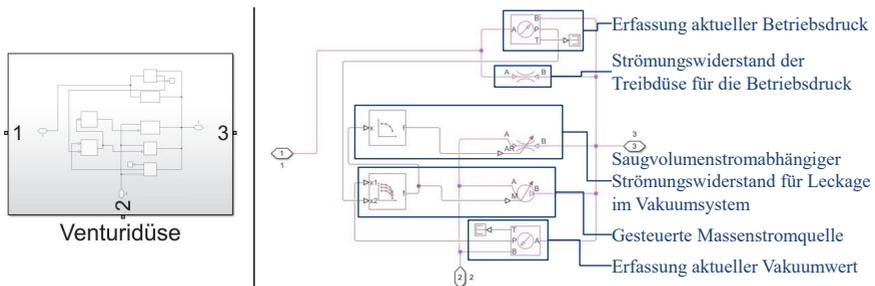


Abbildung 31: Modellbildung einer Venturidüse (rechts) und daraus erstellter Grundbaustein (links)

Im rechten Bereich von Abbildung 31 sind die einzelnen Bausteine zur Realisierung der Venturidüse inklusive deren Verknüpfungen dargestellt. Dabei handelt es sich um Bildschirmfotos aus „MATLAB Simscape“. Kern des Grundbausteins ist eine steuerbare Massenstromquelle, welche für den Teilchentransport aus dem Vakuumsystem hin zum Auslass sorgt. Gesteuert wird diese Massenstromquelle von einer Lookup-Tabelle, welche die düsen-spezifischen Saugmassenströme in Abhängigkeit des aktuellen Vakuumwertes an Anschluss 2 und dem aktuellen Betriebsdruck der Düse zwischen Anschluss 1 und Anschluss 3 ausgibt. Der Vakuumwert für die Lookup-Tabelle wird mithilfe eines Differenzdrucksensors zwischen dem Vakuumanschluss (Anschluss 2) und dem Auslass (Anschluss 3) bestimmt. Der Betriebsdruck wird mithilfe eines Differenzdrucksensors zwischen dem Eingang für den Betriebsdruck (Anschluss 1) und dem Auslass (Anschluss 3) erfasst. Durch die vorangegangenen beschriebenen Bausteine wird die Kernfunktionalität der Venturidüse bezogen auf das Verhalten am Vakuumanschluss während des Evakuierungsvorgangs beschrieben. Alle pink dargestellten Bausteine in Abbildung 31 (rechts) repräsentieren fluidische Komponenten mit den entsprechenden Verbindungen. Die braunen Bausteine und Verbindungen repräsentieren physikalische Signale, die keiner spezifischen Disziplin zugeordnet werden können.

Sobald der Evakuierungsvorgang beendet ist und der Betriebsdruck auf 0 bar_{rel} abgeschaltet wird, strömt bei der realen Venturidüse Umgebungsluft über den Auslass (Anschluss 3) zurück in das Vakuumsystem (Anschluss 2) und reduziert kontinuierlich das dort vorhandene Vakuum. Dieser Belüftungs-Teilchenstrom wird maßgeblich vom minimalen Querschnitt der Empfängerdüsen limitiert. Ein Einströmen von Teilchen in das Vakuumsystem kann jedoch nicht nur durch einen kompletten Betriebsdruckabfall zwischen Anschluss 1 und Anschluss 3 zustande kommen. Es ist ebenso möglich, dass eine Venturidüse nachdem zunächst ein hoher Vakuumwert aufgebaut wurde und anschließend der Betriebsdruck reduziert wird, nur noch einen geringeren Vakuumwert erreicht. Der für den Gleichgewichtszustand der Düse zu hohe Vakuumwert wird dann durch Düsenleckage (in Richtung Anschluss 2) automatisch abgebaut. Gemeinsam haben alle Fälle, in denen Teilchen

4.1 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumzerzeuger

Richtung Anschluss 2 strömen, dass zu dieser Zeit kein resultierender Teilchentransport von Anschluss 2 nach Anschluss 3 stattfindet. Zur Umsetzung dieses Verhaltens wird ein veränderlicher Strömungswiderstand zwischen Anschluss 2 und Anschluss 3 eingebracht. Dessen Öffnungsquerschnitt lässt sich durch folgenden Zusammenhang beschreiben:

$$A_L = \begin{cases} 0 & , \forall \dot{m}_{res} > 0 \\ A_{min,ED} & , \forall \dot{m}_{res} \leq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Dieser Zusammenhang wird im Grundbaustein, dargestellt in Abbildung 31, mithilfe einer ID-Lookup-Tabelle realisiert. Prinzipiell kann dieser Zusammenhang auch mithilfe einer schaltenden Verzweigung, ähnlich einer Wenn-Dann-Verzweigung, realisiert werden. Jedoch hat sich herausgestellt, dass solche schaltenden Verzweigungen bei einigen Solvern (dt.: Löser) zu Warnungen, Fehlermeldungen und erhöhten Simulationszeiten führen. Aus diesem Grund wird für die Realisierung des beschriebenen Verhaltens eine Lookup-Tabelle verwendet. Letzter verbleibender Baustein ist der Strömungswiderstand, welcher die Treibdüse für den Betriebsdruck darstellt. Dieser ermöglicht ein realitätsnahes Verhalten der Venturidüse an Anschluss 1. Vor allem bezogen auf den Druckabfall über der Venturidüse und den Teilchenstrom von Anschluss 1 nach Anschluss 3, welcher maßgeblich für die Energieverbrauchsbestimmung der Venturidüse ist.

Möchte man den entwickelten Grundbaustein nicht für die Verwendung in einem pneumatischen Vakuumzerzeuger einsetzen, sondern für einen elektrischen Vakuumzerzeuger, beispielsweise für eine Vakuumpumpe, kommen große Teile der beschriebenen Realisierung aus Abbildung 31 dafür erneut zum Einsatz. Größter Unterschied ist der im oberen Teil dargestellte Bereich für die Erfassung des aktuellen Betriebsdrucks sowie der modellierte Strömungswiderstand für den Betriebsdruck. Beide Teile entfallen bei elektrischen Vakuumzerzeugern. Das Datenkennfeld hängt dementsprechend hauptsächlich vom aktuell anliegenden Vakuum ab. Zusätzlich kann es von der Drehzahl des elektrischen Vakuumzerzeugers oder anderen Faktoren abhängig sein, die dann entsprechend modelliert werden müssen. Den Strömungswiderstand für die Leckage im Vakuumsystem gibt es nur teilweise bei elektrischen Vakuumzerzeugern. Während ein Gebläse bei geringerer Drehzahl eine gewisse Leckage aufweist, die durch einen vakuumabhängigen Strömungswiderstand berücksichtigt werden muss, liegt ein solches Verhalten bei den meisten Pumpentypen nicht vor. Es empfiehlt sich also, den entwickelten Grundbaustein für das jeweilige Vakuumzerzeuger-Prinzip für die Bibliothek der Grundbausteine zu erstellen. Dabei können auch die elektrischen Schnittstellen für elektrische Vakuumzerzeuger erstellt werden. Für diese Arbeit bleibt der Fokus jedoch auf dem fluidischen Verhalten, um den Prozess der Modellerstellung nicht zu komplex zu gestalten.

Für die Evaluierung des vorgestellten Grundbausteins wird der Vakuumverlauf herangezogen, da dieser elementar für das Verhalten von Vakuum-Greifsystemen ist. Zur Untersuchung des Vakuumverlaufs wird ein Versuchsaufbau aus einem 0,4l Edeltank, einem Vakuumsensor, dem entsprechenden Vakuumzerzeuger und den Schläuchen dazwischen verwendet. Der Edeltank wird vereinfachend anstelle eines realen Vakuum-Greifsystems als zu evakuierendes Volumen verwendet, um die Komplexität möglichst gering zu halten. Die pneumatischen Vakuumzerzeuger werden an einem Druckminderer mit Manometer angeschlossen, der die vorhandenen 8 bar_{rel} aus dem Druckluftnetz auf 5 bar_{abs} Fließdruck reduziert, da dies ein gängiger Betriebsdruck für pneumatische Vakuumzerzeuger ist [193]. Für die elektrische Spannungsversorgung werden die Vakuumzerzeuger an einer 24 V Spannungsquelle angeschlossen. Sollte der Vakuumzerzeuger eine integrierte Zweipunktregelung besitzen wird diese deaktiviert, um den maximal möglichen Vakuumbereich jedes Vakuumzerzeugers betrachten zu können. Der Versuchsaufbau am Beispiel eines pneumatischen Vakuumzerzeugers (SCPSi 10) ist im oberen Bereich von Abbildung 32 dargestellt.

Der Ablauf der Messung, sowie die Erfassung der Messdaten wird mithilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), Modell Beckhoff CX-9020, und einer Zykluszeit von 1 ms durchgeführt. Für den Prüfablauf werden zuerst alle relevanten Parameter für den verwendeten pneumatischen Vakuumzerzeuger eingestellt. Für pneumatische Vakuumzerzeuger ist dies

beispielsweise ein Fließdruck von 5 bar,abs, der bei aktiver Düse des pneumatischen Vakuumerzeugers vor den eigentlichen Versuchen am Druckminderer eingestellt wird.

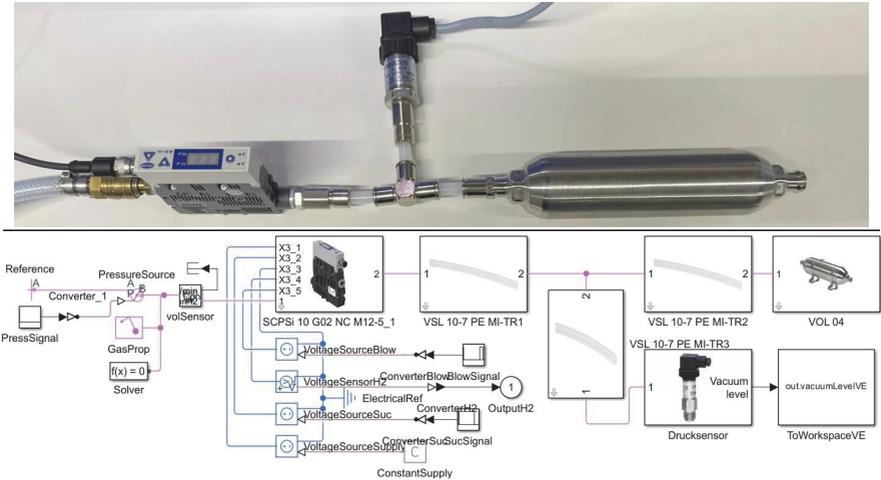


Abbildung 32: Versuchs- und Simulationsaufbau zur Evaluierung des Vakuumerzeuger-Verhaltensmodells am Beispiel eines SCPSi 10 (Bildquelle: [98])

Für den tatsächlichen Prüfverlauf wird der Vakuumerzeuger für 15 s in den Modus Ansaugen und im Anschluss für 5 s in den Modus Ablegen versetzt. Besitzt der Vakuumerzeuger einen Modus zum aktiven Einblasen von Druckluft, auch Abblasen genannt, wird dieser für das Ablegen verwendet. Bei Vakuumerzeugern, die nicht über eine solche Funktion verfügen, wird entweder über ein integriertes oder ein zusätzlich angebrachtes Ventil atmosphärisch belüftet. Nach dem Ablegen wird eine kurze Verweilzeit von 5 s gewartet, danach startet der nächste Evakuierungsvorgang. Dieser gesamte Prozess wird insgesamt dreißigmal wiederholt. Die mit dem Versuchsaufbau generierten Messdaten werden mit dem entsprechenden Simulationsmodell verglichen. Am Beispiel eines SCPSi 10 ist dieser Vergleich in Abbildung 33 dargestellt.

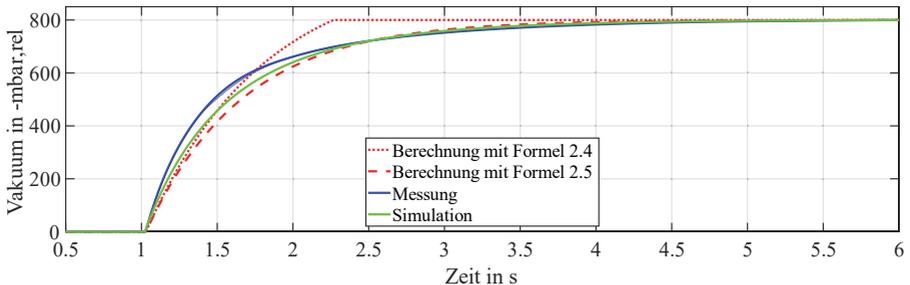


Abbildung 33: Vakuum über Zeit für Messung, Simulation und Ansätze aus dem Stand der Technik am Beispiel eines SCPSi 10

Darin sind neben den mit dem vorgestellten Verhaltensmodell des pneumatischen Vakuumerzeugers und den gemessenen Daten auch die Verläufe der Ansätze aus dem Stand der Technik dargestellt.

4.1 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumerzeuger

Der Vakuumverlauf über der Zeit für Gleichung (2.5) kann direkt berechnet werden. Für Gleichung (2.4) muss hingegen zuerst die benötigte Zeit für diskrete Vakuumwerte von null bis zum maximal erreichbaren Vakuum berechnet werden. Im Anschluss wird die Matrix mit den benötigten Zeiten und den dazugehörigen Vakuumwerten mit einem Zeitvektor der Schrittweite 1 ms interpoliert. Die Verläufe beider Gleichungen (2.4) und (2.5) werden zur Darstellung in Abbildung 33 von absoluten Druckwerten auf relative Druckwerte umgerechnet.

Durch Abbildung 33 wird deutlich, dass die Übereinstimmung zwischen dem simulierten und gemessenen Verlauf sehr gut ist. Die maximale Abweichung zwischen dem simulierten und mittleren gemessenen Druckverlauf beträgt rund 47 mbar,rel. Im Vergleich dazu kann festgestellt werden, dass die Gleichungen (2.4) und (2.5) aus dem Stand der Technik qualitativ und quantitativ deutlich größere Abweichungen aufweisen. Die maximale Abweichung im Druck für Gleichung (2.4) beträgt rund 101 mbar,rel, die für Gleichung (2.5) rund 102 mbar,rel. Die quantifizierten Werte widersprechen dem qualitativen Verlauf aus Abbildung 33, da die Übereinstimmung zwischen gemessenem Verlauf und Gleichung (2.5) deutlich besser erscheint verglichen mit Gleichung (2.4). Als alternative quantitative Größe wird die zeitliche Abweichung bis zu einem bestimmten Vakuumniveau herangezogen. Hierfür werden die benötigten Zeiten zwischen 1 mbar,rel und 801 mbar,rel in 50 mbar,rel Schritten erfasst und miteinander verglichen. Die maximale Abweichung zum gemessenen Verlauf beträgt 877 ms für Gleichung (2.4), 201 ms für Gleichung (2.5) und 124 ms für das vorgestellte Verhaltensmodell. Letzteres entspricht damit deutlich besser den Messungen aus Abbildung 33.

Um die Allgemeingültigkeit des vorgestellten Verhaltensmodells zu verdeutlichen, wird der beschriebene Versuch für sechs weitere Vakuumerzeuger durchgeführt. Die verwendeten Vakuumerzeuger sind inklusive einiger charakterisierender Informationen in Tabelle 7 aufgeführt. Die in der Tabelle aufgeführten Vakuumerzeuger umfassen pneumatische Vakuumerzeuger mit und ohne Ventiltechnik sowie mit und ohne Ansteuerelektronik. Zudem werden pneumatische Vakuumerzeuger unterschiedlicher Düsendurchmesser und Anzahl an Düsenstufen untersucht. Auch bezüglich der Technik zum Ablegen werden unterschiedliche Prinzipien untersucht. Darüber hinaus wird ein elektrischer Vakuumerzeuger als Vertreter eines anderen physikalischen Grundprinzips zur Vakuumzeugung untersucht. Der Versuchsaufbau wird dabei für alle untersuchten Vakuumerzeuger, wie in Abbildung 32 dargestellt, verwendet. Die Ansteuerung sowie die Energieversorgung ist an den jeweiligen Vakuumerzeuger angepasst. Die für den Abgleich verwendeten Verhaltensmodelle werden mit der vorgestellten Methode zur aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen aus den entsprechenden Grundbausteinen erstellt.

Tabelle 7: Untersuchte Vakuumerzeuger inklusive deren Eigenschaften

Bezeichnung des Vakuumerzeugers	Typ	Düsendurchmesser in mm	Anzahl Düsenstufen	Ablege-technik
SCPSi 10	Pneumatisch	1	1	Abblasen
SBP 10	Pneumatisch	1	1	Zusatzventil
SCPMi 07	Pneumatisch	0,7	1	Abblasen
SCPSi 2-07	Pneumatisch	0,7	2	Abblasen
SCPi 20	Pneumatisch	2	1	Abblasen
SXMPi 25	Pneumatisch	2,5	1	Abblasen
ECBPi	Elektrisch	-	-	Belüften

Für einen quantitativen Vergleich der simulierten Verläufe mit den gemessenen Verläufen werden wieder die Vakuumniveaus zwischen 1 mbar,rel und 801 mbar,rel in Schritten von 50 mbar,rel betrachtet. Die damit erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt.

Darin sind links die Zeiten der Messung und in der Mitte die Zeiten für die Simulation aufgetragen. Das rechte Diagramm stellt die absolute Abweichung zwischen Messung und Simulation dar. Dieses verdeutlicht, dass die Übereinstimmung zwischen simuliertem und realem Verhalten allgemein sehr gut ist. Bis 750 mbar,rel liegt die Abweichung für alle Vakuumerzeuger unter 132 ms, was bei Evakuierungszeiten für den Versuchsaufbau von teilweise bis zu 8 s sehr gering ist. Die

verhältnismäßig großen Abweichungen im Bereich über 750 mbar,rel kommen hauptsächlich von den sehr langsam ansteigenden Vakuumwerten. Eine kleine Abweichung zwischen Messung und Simulation sorgt bei der Art der Darstellung aus Abbildung 34 direkt für große Abweichungen. Doch selbst diese eher größeren Abweichungen von maximal 178 ms, sind noch immer sehr gut, verglichen mit den absoluten Evakuierungszeiten von bis zu 8 s. Dies wird auch nochmals durch die maximale prozentuale Abweichung von ungefähr 2,2 % unterstrichen.

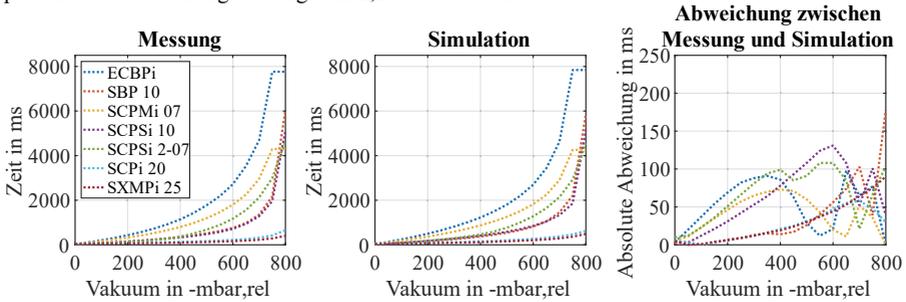


Abbildung 34: Zeit über Vakuum für verschiedene Vakuumerzeuger - Messung (links), Simulation (mittig) und absolute Abweichung (rechts)

Mit Hilfe des vorgestellten Verhaltensmodells können gängige Vakuumerzeuger hauptsächlich auf Basis der Volumenstrom-Vakuum-Kennlinie modelliert werden. Dies ermöglicht eine präzise Modellierung des Verhaltens mit geringem Aufwand und eine direkte Verknüpfung der relevanten physikalischen Größen wie Vakuumwert oder Energieverbrauch.

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

Für eine bessere Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Verhalten für Vakuumsauggreifer wird nachfolgend ein neuartiges Verhaltensmodell vorgestellt. Ausgangssituation dessen stellt dabei ein konstantes Volumen dar, das üblicherweise mithilfe eines Gleichungssatz aus Massen- und Energiegleichungen beschrieben wird. Dies soll auch für das neue Vakuumsauggreifer Modell gelten. Für die Massengleichung lässt sich grundlegend festhalten, dass sich die Massenänderung im System als Summe aus zu- und abfließenden Masseströmen ergibt [190]:

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_i \quad (4.3)$$

Der Bezug von Masse zu Temperatur und Druck lässt sich durch die Gleichung (4.4) für semiperfekte Gase herstellen [190, 194, 195]:

$$p \cdot V = m \cdot Z \cdot R \cdot T \quad (4.4)$$

Der Massenstrom ergibt sich schließlich aus der zeitlichen Änderung der Masse in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Außerdem wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der Vakuumsauggreifer ideal mit der Oberfläche des Handhabungsobjekts abschließt und somit keine Zu- oder Abflüsse von Teilchen durch Leckage auftreten. Jeglicher Zu- und Abfluss von Gasteilchen erfolgt dann durch den Schlauchanschluss. Unter Verwendung der zeitlichen Ableitung von Gleichung (4.4) und dieser Vereinfachung ergibt sich aus Gleichung (4.3) die Gleichung (4.5):

$$\dot{m} = \left(V \cdot \frac{\rho}{p} \right) \frac{dp}{dt} + (\rho) \frac{dV}{dt} - \left(V \cdot \frac{\rho}{T} \right) \frac{dT}{dt} \quad (4.5)$$

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

Für die Herleitung der Energiegleichung wird eine angepasste Form des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik herangezogen [190]:

$$dQ + dW + \sum d(H + E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}) = dU \quad (4.6)$$

Dabei beschreibt der linke Teil der Gleichung die Änderung der Energie durch den Transport von Wärme über die Systemgrenzen hinweg sowie die verrichtete Arbeit und den Ein- und Ausfluss von Masseteilchen. Der rechte Teil hingegen beschreibt die Änderung der inneren Energie während des Prozesses durch die Subtraktion der Anfangsenergie von der Endenergie. Betrachtet man die Änderung der inneren Energie zu einem infinitesimal kleinen Zeitschritt, kann diese durch das totale Differential beschrieben werden [195]:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_{p,n} dT + \left(\frac{\partial U}{\partial p}\right)_{T,n} dp + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_{j \neq i}} dn_i \quad (4.7)$$

Die partielle Differentialgleichung lässt sich unter Berücksichtigung einer konstanten isochoren Wärmekapazität und mit Hilfe der Beziehung zwischen den Wärmekapazitäten, sowie des semiperfekten Gasgesetzes lösen und führt umgewandelt zu Gleichung (4.8).

$$dU = \rho \cdot V \cdot \left(c_{p,m} - \frac{h}{T}\right) dT + V \cdot \left(\frac{h}{Z \cdot R \cdot T} - 1\right) dp + (h \cdot \rho) dV - (p) dV \quad (4.8)$$

Für die Komprimierung des Saugers muss während des Evakuierungsvorgangs Volumenarbeit verrichtet werden. Diese kann durch Gleichung (4.9) beschrieben werden [190]:

$$dW = -(p) dV \quad (4.9)$$

Unter Vernachlässigung initialer kinetischer und potentieller Energie kann aus den Gleichungen (4.7), (4.8) und (4.9) der Zusammenhang in Gleichung (4.10) geschlossen werden.

$$\rho \cdot V \cdot \left(c_{p,m} - \frac{h}{T}\right) \frac{dT}{dt} + V \cdot \left(\frac{h}{Z \cdot R \cdot T} - 1\right) \frac{dp}{dt} + (h \cdot \rho) \frac{dV}{dt} = \dot{Q}_H + \Phi \quad (4.10)$$

Die Gleichungen (4.5) und (4.10) beschreiben das Verhalten eines Vakuumsauggreifers bezogen auf dessen Masse und Energie. Ein Simulationsmodell, welches diese Gleichungen beinhaltet ist das eines pneumatischen Zylinders [196]. Zentral für das Verhalten von Vakuumsauggreifern ist deren inneres Volumen und wie sich dieses über den Evakuierungsvorgang und die Hubhöhen-Komprimierung des Vakuumsauggreifers verändert. Der genaue Zusammenhang aus Volumen und Hubhöhen-Komprimierung ist aktuell im Stand der Technik nicht bekannt. Um diesen zu untersuchen, werden unterschiedlicher Vakuumsauggreifer mithilfe von FEM-Simulationen untersucht. Alternativ wäre diese Analyse mit Messungen durchführbar. Dies ist jedoch sehr zeitaufwändig und benötigt spezielle Versuchsaufbauten [68]. Für die Berechnung des inneren Volumens über die Hubhöhen-Komprimierung wird das Divergenztheorem in Kombination mit einer geschlossenen Oberfläche verwendet. Dafür wird der Vakuumsauggreifer in der Simulation auf eine Platte gesetzt und mit einer Kappe nach oben verschlossen. Um die Simulationsdauer zu reduzieren, wird ein Ausschnitt ausgehend von der rotationssymmetrischen Achse verwendet. Das Ausgangsmodell (links) und der Ausschnitt (rechts) am Beispiel eines SAB 60 [197] ist in Abbildung 35 dargestellt.

Der Differenzdruck, der die Hubhöhen-Komprimierung des Vakuumsauggreifers verursacht, wird mit einer Flächenlast angenähert. Die Flächenlast wird wegen der besseren Konvergenz über die

Hubhöhen-Komprimierung gesteuert. Abbildung 36 stellt drei beispielhafte Bilder der Simulation eines SAB 60 zu verschiedenen Komprimierungen der Hubhöhe dar.

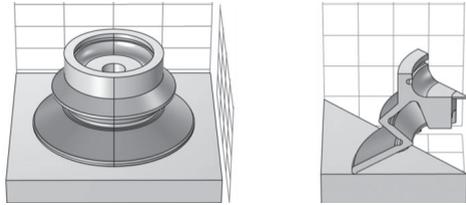


Abbildung 35: Ausgangsmodell des Vakuumsauggreifers (links) und Ausschnitt des CAD-Modells für die FEM-Simulation (rechts)

Das linke Bild stellt den Vakuumsauggreifer in der Ausgangsposition dar, das mittlere Bild einen Zustand bei ungefähr halber Hubhöhen-Komprimierung und das rechte Bild den Zustand des Vakuumsauggreifers nach Abschluss der Simulation. Beendet wird die Simulation entweder, wenn die vorher im Modell gemessene maximale Hubhöhen-Komprimierung erreicht wird oder die Simulation aufgrund zu großer Hubhöhen-Komprimierung infolge des Aufsetzens oder Anpressens des Vakuumsauggreifers auf der Oberfläche zu Konvergenzproblemen führt.

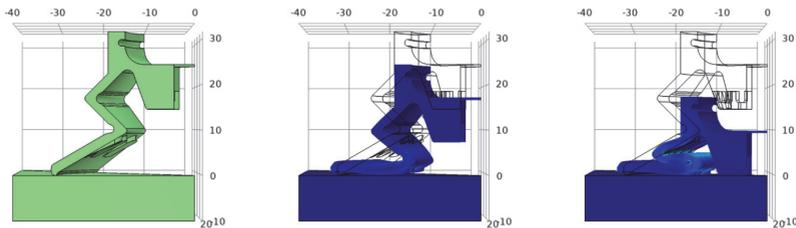


Abbildung 36: Ausschnitt der FEM-Simulation des Vakuumsauggreifers bei einer Hubhöhen-Komprimierung von 0 mm (links), 7,2 mm (mittig) und 14,28 mm (rechts)

Eine grafisch qualitative Bewertung dieser Zustände zeigt eine gute Übereinstimmung der Simulation mit dem realen Verhalten des Vakuumsauggreifers bei angelegtem Vakuum. Das quantitative Ergebnis der Simulation, das innere Volumen der unterschiedlichen Vakuumsauggreifer über der Hubhöhen-Komprimierung, ist im oberen Abschnitt von Abbildung 37 dargestellt. Im unteren Bereich ist zudem die prozentuale Abweichung des simulierten inneren Volumens über der Hubhöhen-Komprimierung in Bezug auf eine lineare Funktion als Annäherung dargestellt. Dabei wird jeweils der Punkt des maximalen und minimalen Volumens des jeweiligen Sauggreifers verwendet und dazwischen eine lineare Funktion gebildet. Dieser Zusammenhang wird mithilfe von Gleichung (4.11) modelliert:

$$V = -\frac{(V_{max} - V_{min})}{x_{max}} \cdot x \quad (4.11)$$

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die simulierten Kurven stark mit einer linearen Funktion überdecken. Einzig der SAXM 60 Vakuumsauggreifer weist große prozentuale Abweichungen zur linearisierten Kennlinie auf. Wird dieser vernachlässigt, liegt die maximale prozentuale Abweichung für einen Vakuumsauggreifer stets unter 18,5 %.

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

Durch den Zusammenhang zwischen Volumen und Hubhöhen-Komprimierung kann in den Gleichungen (4.5) und (4.9) jeglicher Bezug zum Volumen durch die Hubhöhen-Komprimierung und einen für jeden Vakuumsauggreifer spezifischen Faktor ersetzt werden. Jedoch ist die Hubhöhen-Komprimierung keine Primärgröße, die als Eigenschaft des Vakuumsauggreifers dem Modell übergeben werden kann, vielmehr jedoch eine interne Berechnungsgröße. Aus diesem Grund muss auch die Hubhöhen-Komprimierung durch eine passende Primärgröße ersetzt werden. Hierfür eignet sich die Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie des Vakuumsauggreifers. Der Hubhöhen-Komprimierung des Vakuumsauggreifers, egal ob durch Aufdrücken auf eine Oberfläche oder durch Aufbringen eines Vakuums, wirkt eine Gegenkraft des Vakuumsauggreifers entgegen. Ausgelöst durch die elastische Formänderung des Vakuumsauggreifer-Materials.

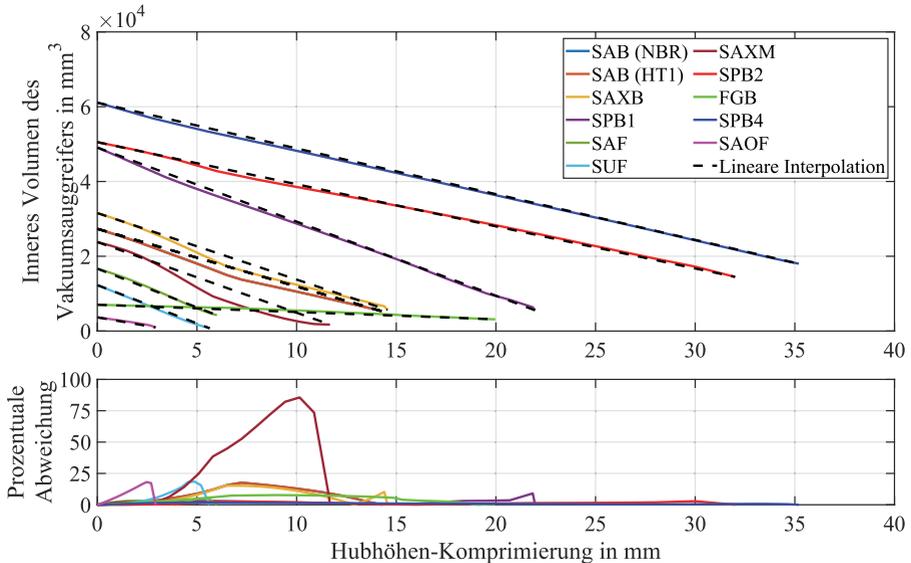


Abbildung 37: Inneres Volumen der unterschiedlichen Vakuumsauggreifer über die Hubhöhen-Komprimierung (oben) sowie deren prozentuale Abweichung zu einer linearen Funktion als Annäherung (unten)

Diese Kraft kann auch als Federkraft des Vakuumsauggreifers bezeichnet werden und ist stark von der Form, Ausprägung und dem Material des Vakuumsauggreifers abhängig. Diese Gegenkraft variiert je nach Hubhöhen-Komprimierung des Vakuumsauggreifers. Dies kann gut anhand der Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie veranschaulicht werden, wie beispielhaft für einen SAB 60 in Abbildung 38 dargestellt. Die Kennlinie kann ähnlich der Volumen-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie aus der FEM-Simulation gewonnen werden. Das Problem dabei sind jedoch die nichtlinearen Materialeigenschaften von Vakuumsauggreifern. Die Genauigkeit von FEM-Simulationen sind sehr sensibel für Veränderungen bei E-Modul, Hubhöhen-Komprimierungskoeffizient und Temperatur. Bei Metallen sind diese linear isotrop und gut zu bestimmen. Bei Elastomeren und allgemein bei Kunststoffen kann es schnell zu leichten Veränderungen in diesen Kenngrößen kommen. Zudem stellen Materialhersteller diese Kenngrößen teilweise nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund ist die Übereinstimmung zwischen Simulation und realem Verhalten nicht immer ideal. Zudem ist die Erfassung der Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie im Vergleich zur Volumen-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie messtechnisch deutlich

einfacher und wird im aktuellen Entwicklungsprozess standardmäßig erfasst. Daher werden für die Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie Messdaten verwendet. Erfasst werden kann eine solche Kraft- Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie auf einer Werkstoffprüfmaschine.

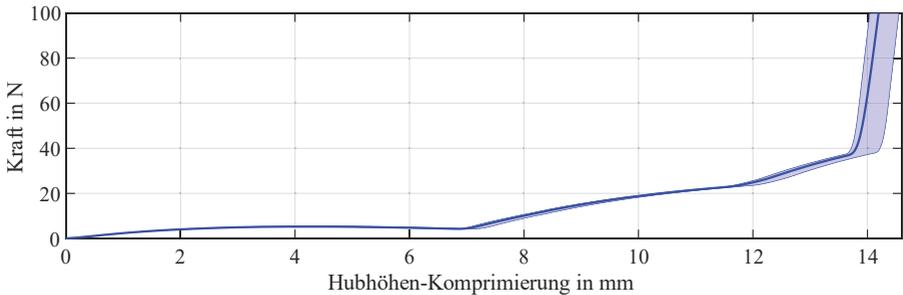


Abbildung 38: Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie eines SAB 60 Vakuumsauggreifers

Die Verwendung eines pneumatischen Zylinders als adäquates Modell wird gestützt durch die Erkenntnis, dass sich das innere Volumen von Vakuumsauggreifern bezogen auf die Hubhöhen-Komprimierung in guter Näherung mit einem linearen Zusammenhang beschreiben lässt. Dem Komprimieren eines pneumatischen Zylinders wirkt eine Kraft entgegen. Diese Kraft ist individuell für jeden Vakuumsauggreifer zu ermitteln und wird durch eine eigene Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie beschrieben. Der soeben beschriebene Aufbau für die Modellierung von Vakuumsauggreifern ist schematisch in Abbildung 39 dargestellt.

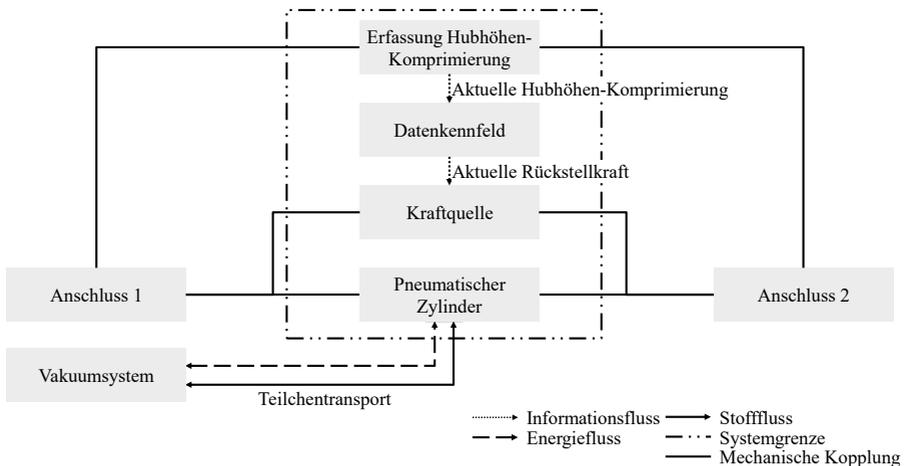


Abbildung 39: Funktionsstruktur für Vakuumsauggreifer

Zentraler Bestandteil der Modellbildung ist ein pneumatischer Zylinder. Dieser beschreibt zum einen den festgestellten Zusammenhang aus Gleichung (4.11), das fluidische Verhalten aus Gleichung (4.5) und Gleichung (4.10) und ermöglicht zum anderen eine direkte Kopplung der fluidischen und mechanischen Disziplin. Durch den Stoffaustausch des pneumatischen Zylinders mit dem

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

Vakuumsystem und dem dadurch veränderten Innendruck wird eine Kraft zwischen den Anschlüssen 1 und 2 aufgebracht, die zu einer Hubhöhen-Komprimierung führt. Diese Hubhöhen-Komprimierung wird erfasst und an ein Datenkennfeld übertragen. Dieses beinhaltet die Kraft-Hubhöhen-Komprimierungs-Kennlinie des Vakuumsauggreifers und stellt über die Kraftquelle eine entsprechende Gegenkraft zum Zusammenfahren des pneumatischen Zylinders ein.

Realisiert wird der hergeleitete Grundbaustein in „MATLAB Simscape“. Dieser stellt neben den zwei mechanischen Anschlüssen, welche oben die mechanische Verbindung zum Vakuum-Greifsystem und unten die Verbindung zum Handhabungsobjekt bilden (Anschluss 1 und Anschluss 2), zudem den Anschlusspunkt für das Vakuumsystem bereit. Der Baustein mit den beschriebenen Anschlüssen ist links in Abbildung 40 dargestellt. Rechts davon ist der detaillierte Aufbau abgebildet. Darin ist im unteren rechten Bereich der Zylinder als Modell für die Kraft und das innere Volumen des Vakuumsauggreifers dargestellt. Dieser ist direkt mit den zwei mechanischen Anschlüssen (Anschluss 1 und Anschluss 2) des Vakuumsauggreifer-Bausteins verbunden. Über diese zwei Anschlüsse kann bei Betrachtung des mechanischen Verhaltens eines einzelnen Vakuumsauggreifers oder eines solchen in einem gesamten Vakuum-Greifsystem der tatsächliche Hub eines Vakuumsauggreifers berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise Einfluss auf die Bahnplanung von Portalen oder Robotern haben, da bei einigen Vakuumsauggreifern der Hub bis zu 36,5 mm betragen kann [198]. Der Zylinder ist thermisch an eine ideale Wärmequelle angeschlossen, mit der eine konstante Temperatur von 293,15 K entsprechend den Standardumgebungsbedingungen eingestellt wird. Die ideale Wärmequelle wurde gewählt, um die Komplexität des Verhaltensmodells möglichst gering zu halten und dem überwiegend isothermen Verhalten beim Evakuierungsprozess Rechnung zu tragen. Für weitere Verbesserungen der Übereinstimmung mit der Realität kann der thermische Widerstand von Vakuumsauggreifern noch näher untersucht werden.

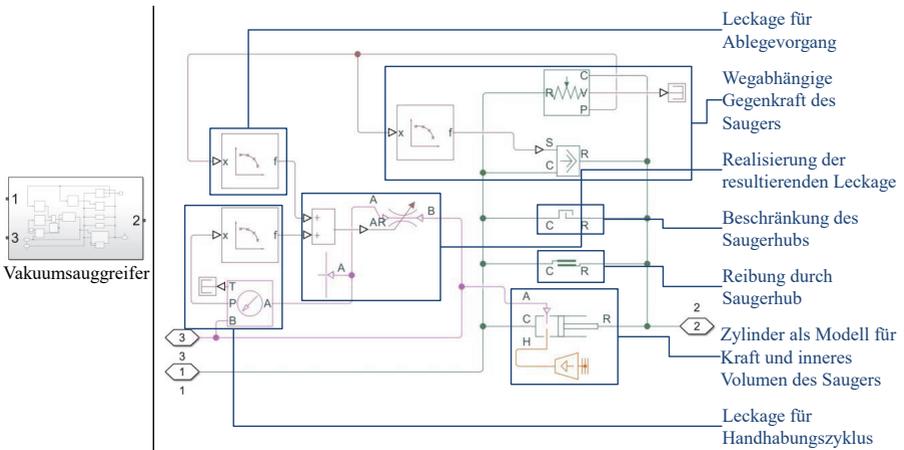


Abbildung 40: Modellbildung für Vakuumsauggreifer (rechts) und daraus erstellter Grundbaustein (links)

Der Anschluss für den Gasaustausch des Zylinders ist mit dem Vakuumanschluss des Bausteins verknüpft. Über diesen kann der Baustein mit dem Vakuumsystem verbunden werden. Zentraler mechanischer Aspekt ist die Gegenkraft des Vakuumsauggreifers, die dem sofortigen Kollabieren des Vakuumsaugers entgegenwirkt. Die Gegenkraft ist abhängig vom aktuellen Zustand (aktuell verstrichene Wegstrecke des Kollabierens) des Vakuumsauggreifers. Die Erfassung des aktuellen Zustandes sowie das Aufbringen der Gegenkraft wird über einen Positionssensor, eine Lookup-

Tabelle und eine Kraftquelle realisiert. Dies ist im oberen rechten Bereich von Abbildung 40 dargestellt. In der Lookup-Tabelle können die unterschiedlichen Charakteristika verschiedener Vakuumsauggreifer berücksichtigt werden. Diese Bausteine realisieren die hergeleitete Grundfunktionalität des Vakuumsauggreifers. Alle pink dargestellten Bausteine repräsentieren fluidische Komponenten mit den entsprechenden Verbindungen. Die braunen Bausteine und Verbindungen repräsentieren physikalische Signale, die keiner spezifischen Disziplin zugeordnet werden. Die grünen Komponenten und Verbindungen stellen die mechanische Disziplin dar.

Periphere Funktionen ergänzen das in dieser Arbeit realisierte Verhaltensmodell des Vakuumsauggreifers für eine noch bessere Funktionalität. Zum einen ist das ein Baustein zur Begrenzung des Hubs des Vakuumsauggreifers. Dieser wird verwendet, um die Kraft-Weg-Kennlinie, wie in der Realität, in die positive und negative Richtung zu beschränken. Zum anderen weist der Vakuumsauggreifer bei Bewegungen, sowohl in die positive als auch in die negative Richtung Reibung auf. Diese wird über den Baustein für Reibung realisiert.

Neben diesen mechanischen, peripheren Bausteinen gibt es auch fluidische Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. Zentral für Vakuumsauggreifer ist deren Leckage an der Stelle zwischen Vakuumsauggreifer und Handhabungsobjekt. Die an der Dichtung des Vakuumsauggreifers auftretende Leckage ist abhängig von der Position und dem aktuellen Vakuum. Die Positionsabhängigkeit ist vor allem für das Aufsetzen des Vakuumsauggreifers ganz zu Beginn des Evakuierungsvorganges sowie für das Ablegen am Ende des Ablegevorganges relevant. Sobald der Vakuumsauggreifer vollständigen Kontakt mit dem Handhabungsobjekt hat, sinkt die Leckage schlagartig ab. Dadurch wird die Dichtlippe allseitig angelegt und der Evakuierungsvorgang erst ermöglicht. Umgekehrt sorgt eine Leckage bei einem Vakuumsauggreifer in nicht komprimierter Position für eine fluidische Verbindung zur Umgebung (maximale Leckage). Neben dieser von der Position abhängigen Leckage, existiert zudem eine Leckage in Abhängigkeit des aktuellen Vakuums im System. Dabei wird die Leckage in dieser Arbeit unabhängig vom Handhabungsobjekt durch einen einzelnen Parameter modelliert. Für eine weitere Annäherung an die Realität kann dieser Leckageparameter zukünftig für unterschiedliche Handhabungsobjekte im Vakuumsauggreifer Baustein hinterlegt sein, um damit für das aktuelle Handhabungsobjekt den korrekten Wert in der Simulation zu verwenden. [199, 200]

Für die Evaluierung des vorgestellten Grundbausteins für Vakuumsauggreifer wird, ähnlich zu den Vakuumern, der Fokus auf den Vakuumverlauf gelegt. Um den Einfluss anderer Komponenten möglichst gering zu halten, wird hierzu ein vereinfachter Versuchsaufbau, bestehend aus einem Vakuumsauggreifer, einem Vakuumsensor, einem pneumatischen Vakuumzeuger (SCPSi 10) sowie einem T-Stück und mehreren Steckverbindern verwendet. Die integrierte Zweipunktregelung am Vakuumzeuger wird deaktiviert, um den maximal möglichen Vakuumbereich jedes Vakuumsauggreifers betrachten zu können. Der reale Versuchsaufbau ist links in Abbildung 41 dargestellt.

Der Vakuumsauggreifer wird mit einer dünnen Kunststoffplatte abgedichtet. Diese wird gewählt, da sie eine möglichst geringe Oberflächenrauheit bei gleichzeitig geringem Gewicht aufweist. Die geringe Oberflächenrauheit sorgt für eine ideale Abdichtung an der Dichtlippe des Vakuumsauggreifers, wodurch die Leckage in diesem Versuch als vernachlässigbar klein angenommen werden kann. Durch das geringe Gewicht wird der Vakuumsauggreifer nur minimal vorgeedrückt, wodurch auch dieser Parameter des Verhaltensmodells im Versuchsaufbau einen vernachlässigbar kleinen Einfluss hat. Dies ermöglicht eine nahezu störfreie Analyse des grundlegenden Verhaltens des Vakuumsauggreifers. Im Versuchsaufbau wird eine SPS (Beckhoff CX-9020) für die Steuerung und die Messwertaufnahme mit einer Zykluszeit von 1 ms eingesetzt. Und auch dieser Versuch wird für eine aussagefähige Mittelwertbildung dreißigmal wiederholt.

Der Versuchsaufbau wird mit den entsprechenden Verhaltensmodellen der Komponenten und Parametern als Simulationsmodell aus der Verhaltensmodellbibliothek nachgebaut. Die relevanten Parameter für das Verhaltensmodell kommen dabei aus den Messungen mit einer Werkstoffprüfmaschine (Kraft-Weg-Kennlinie), als auch aus den FEM-Simulationen (Totvolumen

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

des Vakuumsauggreifers im evakuierten Zustand und resultierende Querschnittsfläche). Das erstellte Modell ist rechts in Abbildung 41 dargestellt.

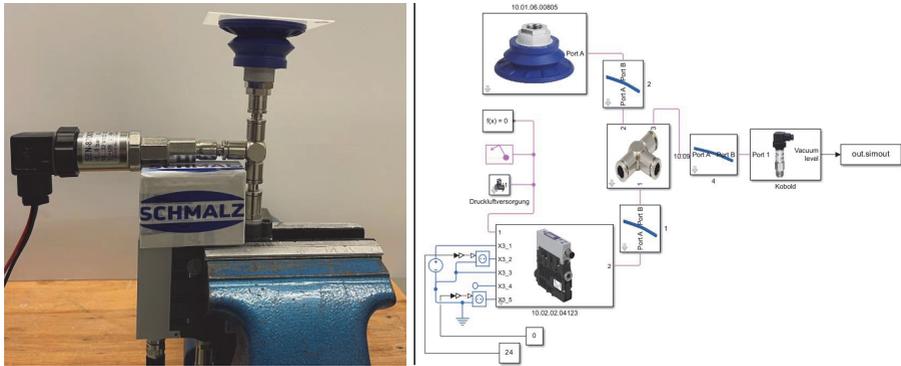


Abbildung 41: Versuchsaufbau (links) und Verhaltensmodell (rechts) zur Evaluierung des Vakuumsauggreifer Grundbausteins am Beispiel eines SAB 60 (Bilderquelle: [98])

Für den Vergleich von Messung und Simulation wird der Vakuumwert über der Zeit aufgetragen, wie in Abbildung 42 dargestellt. Die generierten Simulationsdaten (rot, grün) werden mit den Messdaten (blau) zunächst qualitativ verglichen. Neben dem Vergleich zwischen Messung und Simulation ist ein Vergleich mit Ansätzen aus dem Stand der Technik wichtig. Vakuumsauggreifer werden bisher hauptsächlich als konstante Volumina angenommen. Aus diesem Grund ist in Abbildung 42 der zeitliche Verlauf des Vakuums für den Versuchsaufbau mit einem Modell für ein konstantes Volumen an Stelle des Vakuumsauggreifers aufgetragen. Das Volumen entspricht dabei dem des Vakuumsauggreifers im nicht evakuierten Zustand.

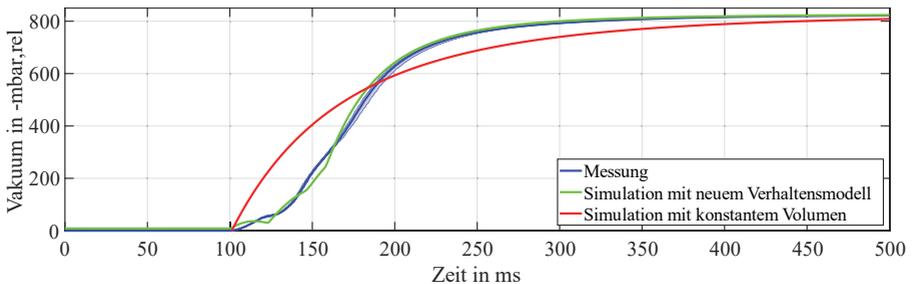


Abbildung 42: Vakuum über Zeit für Messung und Simulation am Beispiel eines SAB 60

Die blau dargestellte Messkurve enthält die Mittel-, Minimal- und Maximalwerte von dreißig Messwiederholungen. Der Zwischenbereich ist in hellblau dargestellt. Da die Streuung der Messungen mit einem Maximum von 42 mbar jedoch sehr gering ist, ist ein Unterschied zwischen der Minimal- und Maximalkurve kaum sichtbar.

Vergleicht man die Messung mit der in grün dargestellten Simulation des entwickelten Verhaltensmodells ist unterhalb von 350 mbar,rel eine kleine Abweichung ersichtlich. Dies ist hauptsächlich auf die hochdynamischen Vorgänge beim Kollabieren des Vakuumsauggreifers zurückzuführen. Es besteht jedoch eine grundsätzliche Übereinstimmung zwischen Messung und

Simulation, insbesondere in Anbetracht der hohen Dynamik des Prozesses. Oberhalb von 350mbar,rel gibt es eine sehr gute qualitative Übereinstimmung. Diese Übereinstimmung ist signifikant größer als die zwischen den gemessenen Verläufen und den simulierten Verläufen mit konstantem Volumen (rote Kurve). Das bisherige Modell mit konstantem Volumen zeigt über den gesamten Evakuierungsverlauf hingegen sehr große Abweichung zu den Messdaten. Es kann also eine deutliche Verbesserung der qualitativen Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation durch das in dieser Arbeit vorgestellte Verhaltensmodell erreicht werden.

Um die qualitative Übereinstimmung besser einordnen zu können und die Allgemeingültigkeit des Verhaltensmodells nachzuweisen, wird im Folgenden ein quantifizierter Vergleich von Messung und Simulation für unterschiedliche Vakuumsauggreifer vorgestellt. Hierfür werden neben einem SAB 60 zehn weitere Vakuumsauggreifer untersucht, die in Tabelle 8 aufgeführt sind. Betrachtet werden für die unterschiedlichen Vakuumsauggreifer Vakuumniveaus zwischen 1mbar,rel und 801mbar,rel in Schritten von 50mbar. Bei den entsprechenden Vakuumniveaus wird, wie bei der Evaluierung der Vakuumerzeuger, die absolute zeitliche Abweichung zwischen Messung und Simulation ermittelt. Hierfür werden die Verläufe von Messung und Simulation herangezogen, die in Abbildung 42 repräsentativ für einen Vakuumsauggreifer dargestellt sind.

Tabelle 8: Untersuchte Vakuumsauggreifer inklusive deren Eigenschaften

Typ des Vakuumsauggreifers	Material	Form	Anzahl Falten	Größe in mm
SAB	NBR-60	Rund	1,5	60
SAB	HT1-60	Rund	1,5	60
SAXB	ED-85	Rund	1,5	60
SPB1	ED-65	Rund	1,5	60
SAF	NBR-60	Rund	0	60
SUF	SI-55	Rund	0	60
SAXM	ED-85	Rund	0	60
SPB2	ED-65	Rund	2,5	50
FGB	NBR-55	Rund	3,5	25
SPB4	SI-55	Rund	4,5	50
SAOF	NBR-60	Oval	0	60

Die damit erzielten Ergebnisse sind für die elf Vakuumsauggreifer in Abbildung 43 dargestellt. Ganz links sind die gemessenen Zeiten dargestellt, bis bestimmte Vakuumwerte erreicht werden. Die simulierten Zeiten bis zu bestimmten Vakuumwerten sind mittig dargestellt. Im rechten Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die absolute zeitliche Abweichung für alle Vakuumsauggreifer immer kleiner als 40ms bleibt, was sehr gering ist. Für vier der elf Vakuumsauggreifer liegt eine höhere Abweichung vor. Werden diese vernachlässigt, so kann die maximale Abweichung für den gesamten dargestellten Vakuumbereich auf weniger als 15ms reduziert werden. Bezieht man diese Abweichungen auf die absolut benötigten Zeiten von bis zu 400ms, bleibt die zeitliche Abweichung stets unter 10% bzw. unter 3,75% der gesamt benötigten Zeit. Dies verdeutlicht die sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Die verhältnismäßig große Abweichung zwischen Messung und Simulation für den SPB4 nährt die Vermutung, dass die ermittelten inneren Volumina über die Hubhöhen-Komprimierung leichte Abweichungen aufweisen. Diese Abweichungen pflanzen sich im vorgestellten Verhaltensmodell fort und sorgen dort vor allem bei Vakuumsauggreifern mit großen inneren Volumina für größere Abweichungen im Unterdruckverlauf.

Insbesondere bei Vakuumsauggreifern mit einer großen Anzahl von Falten kann das innere Volumen aufgrund der aktuellen Struktur der durchgeführten FEM-Simulationen nur mit einer gewissen Abweichung bestimmt werden. Hauptgrund sind die bei der Kompression nach außen wandernden Falten in der FEM-Simulation, die zu einem größeren inneren Volumen führen können als im realen Evakuierungsprozess. Bei der Betrachtung eines ganzen Vakuum-Greifsystems und nicht nur eines Vakuumsauggreifers ohne nennenswerte Schläuche und anderen inneren Volumina, wie es im

4.2 Modellbildung und Evaluierung für Vakuumsauggreifer

vereinfachten Versuchsaufbau der Fall war, erhöht sich das zu evakuierende Gesamtvolumen deutlich. Dadurch wird der Einfluss des durch den Vakuumsauggreifer bedingten Fehlers reduziert, was noch bessere Ergebnisse für die Simulation ganzer Vakuum-Greifsysteme mit dem vorgestellten Verhaltensmodell für Vakuumsauggreifer verspricht.

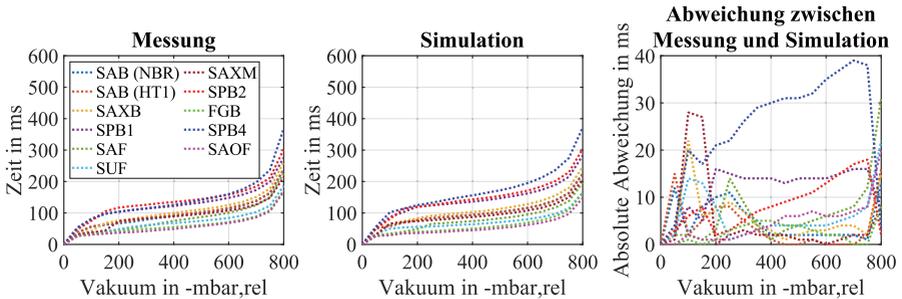


Abbildung 43: Zeit über Vakuum für verschiedene Vakuumsauggreifer - Messung (links), Simulation (mittig) und absolute Abweichung (rechts)

Mit Hilfe des vorgestellten Verhaltensmodells können gängige Vakuumsauggreifer hauptsächlich auf Basis der Kraft-Weg-Kennlinie modelliert werden. Dies ermöglicht eine präzise Modellierung des Verhaltens mit geringem Aufwand und eine direkte Verknüpfung der relevanten physikalischen Größen wie Vakuumwert, Kräfte am Vakuumsauggreifer oder auch der Hubhöhen-Komprimierung.

Schlussfolgernd zu den domänenspezifischen Grundbausteinen für Verhaltensmodelle von Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer lässt sich zusammenfassen:

- Die qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Verläufen für sieben Vakuumerzeuger ist hinreichend genau.
- Die qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Verläufen für elf Vakuumsauggreifer ist hinreichend genau.

5 Realisierung des Konzepts mithilfe eines Assistenzsystems

Nach der detaillierten Erläuterung des entwickelten Konzepts im vorangegangenen Abschnitt, wird in diesem Kapitel dessen Realisierung in Form eines Assistenzsystems vorgestellt. Die erste Komponente dieses Assistenzsystems realisiert die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek unter Verwendung von Primärinformationen wie Fluidschaltpläne, Elektroschaltpläne oder Softwarecode. Die so erstellte Verhaltensmodellbibliothek wird von der zweiten Komponente, der Methode für die Erstellung von Verhaltensmodellen von Komponenten und Systemen verwendet. Die Realisierung dieser Methode wird im Folgenden als AutoBMC (engl.: automatic behavior model creator) bezeichnet. Werden Verhaltensmodelle geringerer Modellierungstiefe, können diese durch die dritte Komponente automatisiert erstellt werden. Die Realisierung der Artefakte aus den drei DSR-Iterationen wird zur einfacheren Bedienung um eine graphische Benutzeroberfläche (engl.: graphical user interface, GUI) ergänzt.

5.1 Automatisierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

Für die assistierte oder automatisierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek werden Primärinformationen aus den unterschiedlichsten Disziplinen digital nutzbar benötigt. Als Beispiele für nicht strukturierte Primärinformationen wird die Disziplin Software und der disziplinübergreifende Aufbau der Komponenten herangezogen. Als Beispiel für eine strukturierte Informationsquelle mit passender Schnittstelle wird die Disziplin Elektrik verwendet und als jene mit strukturierten Informationen ohne passende Schnittstelle die Disziplin Fluidik. Als Anwendungsbeispiel für die automatisierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek werden Kompaktejektoren verwendet. Aus den unterschiedlichen Primärinformationen werden in einem Zwischenschritt Graphen erstellt. Diese werden mithilfe der in Kapitel 3 beschriebenen Methode unter Verwendung der Grundbausteinbibliothek in ein Verhaltensmodell für die Verhaltensmodellbibliothek überführt.

5.1.1 Nicht strukturierte Informationsquelle

Das Erstellen von Graphen aus nicht strukturierten Informationsquellen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mithilfe der im System „MATLAB“ zur Verfügung stehenden Funktionen. Hierfür wird ein Skript erstellt, in dem die Knoten, Kanten und weitere relevante Informationen hinterlegt werden. Perspektivisch kann dieser Arbeitsschritt durch eine Benutzeroberfläche weiter vereinfacht werden. Da dies jedoch nicht Kern dieser Arbeit ist, liegt der Fokus auf der Verwendung strukturierter Informationsquellen mit und ohne passende Schnittstellen.

5.1.2 Strukturierte Informationsquelle mit passender Schnittstelle

Als Beispiel für eine Disziplin mit strukturierter Informationsquelle und passender Schnittstelle wird die Disziplin Elektrik herangezogen. Die elektronischen Schaltpläne der Komponenten des repräsentativen Komponentenherstellers liegen in industrietypischen EDA (Electronic Design Automation) Programmen wie „EAGLE“ vor. Aus solchen EDA-Programmen können die darin vorliegenden Informationen typischerweise über gängige Schnittstellen exportiert werden. EAGLE beispielsweise bietet den Export der Informationen unter anderem in CSV- oder Textdateien an. Dabei werden in den unterschiedlichen Formaten verschiedene Informationen zur Verfügung gestellt. Für diese Arbeit wird zur automatisierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek zum einen die BOM im CSV-Format und zum anderen die Netzliste im Textformat verwendet. Aus der BOM werden zuerst Name, Bausteintyp und gegebenenfalls ein Wert des jeweiligen Bausteins extrahiert. Der Wert spezifiziert beispielsweise den Widerstand oder die Kapazität des Bausteins. Die

Informationen über den jeweiligen Baustein werden im Knoten der Graphen abgelegt. Die Verknüpfung der Bausteine werden aus der Netzliste ausgelesen. Zur Identifikation der Bausteine in den zwei Informationsquellen kommen deren Namen zum Einsatz. Den jeweiligen Netzen sind Bausteine mit deren Namen zugeordnet. Im Graphen können also alle Knoten verknüpft werden, die in einem Netz vorhanden sind. Neben den reinen Verknüpfungen zwischen Bausteinen, die über die Kanten im Graphen abgebildet werden, sind auch die Anschlussbezeichnungen relevant. Diese sind für die jeweiligen Bausteine und Netze ebenso in der Netzliste vorhanden und können daraus in den Graphen überführt werden.

5.1.3 Strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle

Für die Extraktion von strukturierten Informationen aus einer Quelle ohne passende Schnittstelle werden als Beispiel die Fluidschaltpläne von Kompaktejektoren verwendet. Am Beispiel dieser Kompaktejektoren werden die drei Schritte aus Kapitel 3.4.3 durchgeführt.

Für den ersten Schritt, die Erkennung der Symbole in den Schaltplänen, werden R-CNN, genauer gesagt ein FASTER R-CNN-Detektor, mit einem ResNet-50 verwendet. Diese Methode hat sich in früheren Untersuchungen als effiziente und zuverlässige Methode zur Objekterkennung erwiesen [187, 202]. Als vortrainiertes Netzwerk wird das ResNet-50 verwendet, da es ein gutes Verhältnis von Vorhersagezeit und Genauigkeit bietet [189]. Alternativ können auch andere Netze verwendet werden. Für den Datensatz werden die 92 Fluidschaltpläne der pneumatischen Vakuumerzeuger aus dem Produktportfolio des repräsentativen Komponentenherstellers gelabelt. Dies wird mithilfe der „Image Labeler App“ in „MATLAB“ durchgeführt. Die 92 Schaltpläne werden aus den Bedienungsanleitungen (PDF-Dateien) von der Homepage des Herstellers extrahiert und als Bilddateien gespeichert. Es wird ein Train-Test-Split von achtzig zu zwanzig verwendet, da dies in früheren Arbeiten mit Mehrklassen-Klassifizierung gute Ergebnisse geliefert hat [203].

Der Trainingsprozess des FASTER R-CNN-Detektors wird mit den in Tabelle 9 aufgeführten Optionen und 74 Fluidschaltplänen durchgeführt. Auf einem Personal-Computer (PC) mit einem „Intel Xeon W-2123 Prozessor“, 32 Gigabyte RAM (Random-Access Memory) und einer „Nvidia Quadro P2000“ GPU (Graphics Processing Unit) dauert dieser Prozess etwa 60 h. Das Training wird auf der CPU (Central Processing Unit) durchgeführt, da der GPU-Speicher für das Training nicht ausreicht.

Tabelle 9: Verwendete Trainingsoptionen für den FASTER R-CNN-Detektor

Option	Parameter
Mini-batch Größe	1
Initiale Lernrate	10^{-3}
Lernquote	Stückweise
Lernrate Verlustfaktor	0.1
Lernrate Verlustperiode	100
Maximale Epochen	50
Ausführungsumgebung	CPU

Die in dieser Arbeit beschriebene Methode verwendet den trainierten Detektor, um Symbole in Schaltplänen zu erkennen. Dazu wird ein Fluidschaltplan als Bild ausgewählt. Anschließend werden die Symbole mit dem trainierten FASTER R-CNN-Detektor und der in „MATLAB“ verfügbaren „Detect-Funktion“ erkannt (Schritt 2). Die Ergebnisse der Symbolerkennung anhand eines Beispielschaltbildes sind in Abbildung 44 dargestellt.

Alle Symbole werden korrekt erkannt, aber deren Position und Größe ist nicht optimal. Eine Anpassung dieser erfolgt durch iteratives Vergrößern und Verkleinern aller Seiten des Bereichs für das jeweilige Symbol, um den Rand des jeweiligen Symbols zu suchen. Wird ein Rand gefunden, wird die Position und Größe des Symbols entsprechend angepasst. Wird kein Rand gefunden, wird die durch den FASTER R-CNN-Algorithmus ermittelte Position und Größe verwendet. Die Anpassung

von Position und Größe der Symbole ist ein für jede Schaltplandisziplin spezifischer Prozess. Dieser Schritt fällt unter den Oberbegriff der Zusatzfunktionen aus dem Bereich der Bildverarbeitung.

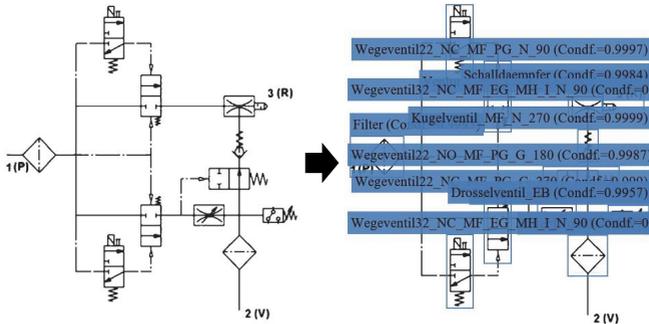


Abbildung 44: Beispielhafter Schaltplan (links) und die erkannten und lokalisierten Symbole unter Verwendung des Faster R-CNN mit dem trainierten Netz (rechts) (Bildquelle: [193])

Nach der Anpassung von Position und Größe der Symbole in Schritt 2 werden in Schritt 3 die Verbindungen zwischen den Symbolen erkannt. Dazu werden alle erkannten Symbole aus dem Schaltplan entfernt. Die einfachste Methode besteht darin, das Bild mit der Hintergrundfarbe zu überlagern, in der die Symbole erkannt wurden, wie in Abbildung 45 mittig-links dargestellt.

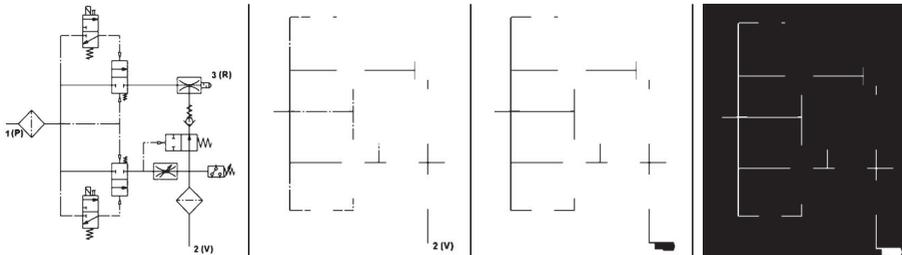


Abbildung 45: Originaler (links), ausgeschnittener (mittig-links), morphologisch geschlossener (mittig-rechts) und invertierter (rechts) Schaltplan (Bildquelle: [193])

Eine Vorverarbeitung von Verbindungen in Schaltplänen ist notwendig, wenn Verbindungslinien aufgrund schlechter Bildqualität unterbrochen sind oder wenn gestrichelte oder gepunktete Linien zur Unterscheidung verschiedener Verbindungstypen verwendet werden. Zu diesem Zweck wird das morphologische Schließen verwendet. Für weitere Informationen sei auf einschlägige Literatur verwiesen [204]. Das Beispielschema in Abbildung 45 mittig-rechts zeigt das Ergebnis der morphologischen Schließung. Im nächsten Schritt wird das Bild binarisiert und invertiert, um die Verarbeitung zu erleichtern. Dadurch wird der Schaltplan mit schwarzem Hintergrund und weißen Linien und Symbolen dargestellt, wie in Abbildung 44 rechts zu sehen ist.

In diesen Schaltplan werden im Schritt 3 die zuvor erkannten Symbole als weiße Flächen eingefügt und einzelne Verbindungslinien ein- und ausgeblendet. Ergibt sich aus den eingefügten Symbolen und Linien ein verbundener Bereich, so besteht in dieser Iteration eine Verbindung zwischen den zwei Symbolen und der Linie, wie in Abbildung 46 links dargestellt. Wenn die zwei Symbole und die Linie mehr als einen Bereich ergeben, wird keine Verbindung erkannt, wie in Abbildung 46 mittig dargestellt. Überlappende Symbole werden ebenfalls geprüft und, falls vorhanden, als Verbindung

gespeichert. Ein Beispiel für eine solche Verbindung ist die zwischen Schalldämpfer und Düse, wie in Abbildung 46 rechts dargestellt.

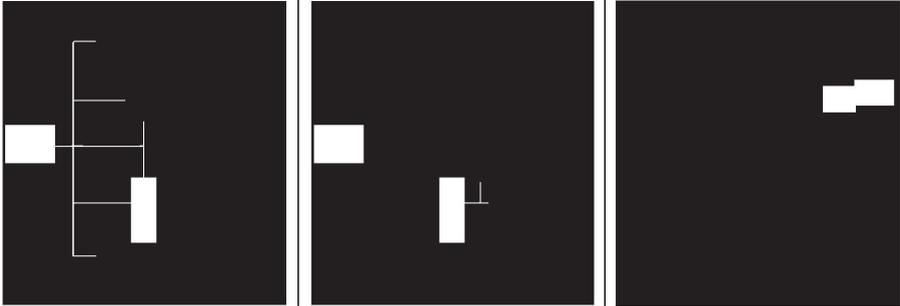


Abbildung 46: Normale Verbindung (links), keine Verbindung (mittig) und Verbindung durch Überlappung (rechts), dargestellt für zwei beispielhafte Symbole

Nachdem alle Verbindungen zwischen den erkannten Symbolen identifiziert worden sind, besteht der nächste Schritt (Schritt 4) darin, die Anschlussbezeichnungen der Verbindungen an den jeweiligen Symbolen zu bestimmen. In vielen Schaltplänen sind die Anschlussbezeichnungen nicht vollständig verfügbar, sodass eine Referenzbibliothek verwendet werden muss. In dieser Arbeit wird eine Referenzbibliothek verwendet, die aus häufig in Schaltplänen verwendeten Symbolen besteht, die mit einfachen Bildbearbeitungsprogrammen, wie Microsoft Paint, um die entsprechenden Anschlussbezeichnungen ergänzt werden können. Abbildung 47 zeigt ein Beispiel für ein beschriftetes Symbol aus der Referenzbibliothek auf der linken Seite.

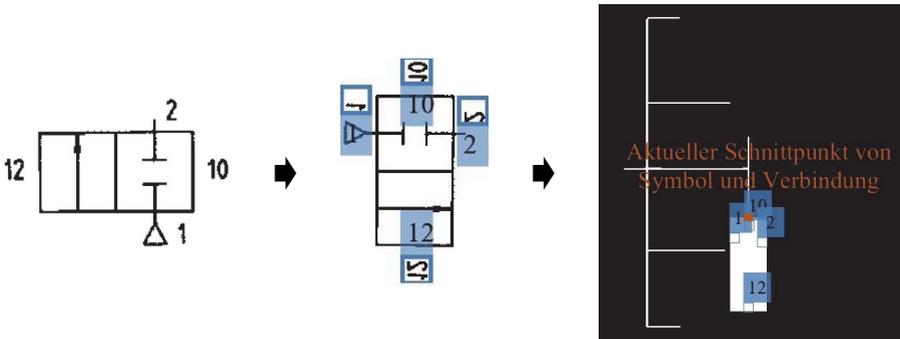


Abbildung 47: Beschriftetes Referenzsymbol (links), entsprechend der Ausrichtung des Symbols im Schaltplan angepasstes Symbol (mittig) und Erkennung der Anschlussbezeichnungen (rechts) (Bildquelle: [147])

Zur Bestimmung der Anschlussbezeichnung werden jeweils ein Symbol und ein Anschluss verwendet. Die Anschlussbezeichnungen können mit der in „MATLAB“ integrierten OCR-Methode erkannt werden. Anschließend wird das Symbol aus der Referenzbibliothek an die erkannte Größe des Symbols im Schaltplan angepasst und entsprechend der erkannten Drehung und Spiegelung ausgerichtet, wie in der Mitte von Abbildung 47 dargestellt. Diese Anpassung, einschließlich der

möglichen Drehung und Spiegelung, wird auch auf die erkannten Beschriftungsfelder angewendet. Das Symbol mit den erkannten Anschlussbezeichnungen kann an der entsprechenden Stelle in den Schaltplan eingefügt werden. Das Programm analysiert, welcher Anschluss dem aktuellen Anschluss des entsprechenden Symbols am nächsten liegt, wie in Abbildung 47 rechts dargestellt. Dieser Vorgang wird für alle Anschlüsse und Symbole wiederholt.

Somit sind alle Symbole, Verbindungen und Anschlussbezeichnungen aus dem Schaltplan extrahiert. Diese werden für die Erstellung eines Graphen verwendet (Schritt 5). Der Graph kann z.B. zur Erstellung eines Verhaltensmodells für die Verhaltensmodellbibliothek verwendet werden. Die vorgestellte Implementierung ermöglicht die vollautomatische Digitalisierung aller relevanten Informationen aus einem Schaltplanbild. Der gesamte Vorgang dauert auf dem zuvor genannten PC ca. 14 s.

5.1.4 Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus dem Graph

Die aus den unterschiedlichen Informationsquellen erstellten Graphen der einzelnen Disziplinen stellen die einheitliche Informationsquelle für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek dar. Mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten AutoBMC Methode werden aus den Graphen und der Grundbausteinbibliothek die Verhaltensmodelle für die Verhaltensmodellbibliothek erstellt.

Dabei besteht die Besonderheit bei der automatisierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek darin, dass hierfür nicht nur ein Graph verwendet wird, sondern häufig mehrere. Dies hat seinen Ursprung darin, dass in der Verhaltensmodellbibliothek häufig mechatronischen Komponenten mit mehr als einer Disziplin vorhanden sind. Die verwendeten Graphen hingegen beschreiben nur eine Disziplin. Alternativ kann ein Graph auch die Verknüpfung der Disziplinen untereinander abbilden. Für die Erstellung werden zuerst sequenziell die disziplinspezifischen Verhaltensmodelle der jeweiligen Komponenten automatisiert erstellt. Sobald die disziplinspezifischen Verhaltensmodelle erstellt sind, werden diese mithilfe eines übergeordneten Graphen verknüpft und zu einem Verhaltensmodell zusammengefügt. Dieser Vorgang ist am Beispiel eines Kompaktejektors SCPSi 10 [205] mit den Disziplinen Fluidik, Elektrik und Software in Abbildung 48 dargestellt.

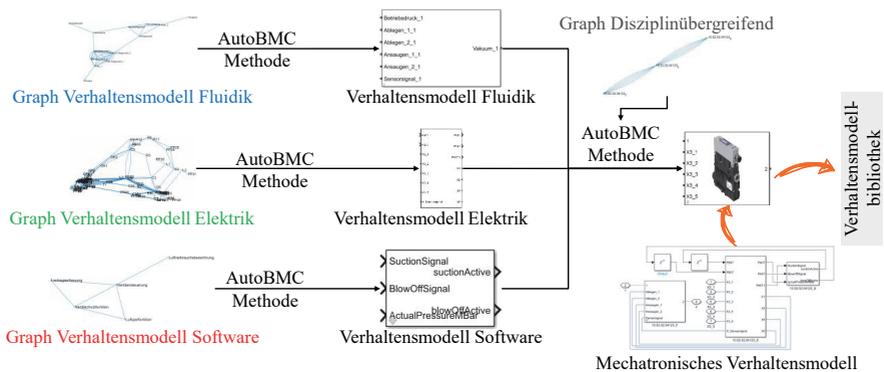


Abbildung 48: Beispielhafte Erstellung eines Verhaltensmodells für die Verhaltensmodellbibliothek am Beispiel eines SCPSi 10 (Bildquelle: [205])

Während der Erstellung der Verhaltensmodelle ist zudem eine Parametrierung notwendig. Welche Parameter für einen bestimmten Grundbaustein erforderlich sind, wird über die Maske des Grundbausteins bei dessen manueller Erstellung festgelegt. Dabei stellt die Anzahl der Parameter neben der eigentlichen Modellierung des Grundbausteins eine Möglichkeit dar, den Detailgrad eines

5.1 Automatisierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

Grundbausteins zu beeinflussen. Mit zunehmender Anzahl an Parametern steigt zwar die erreichbare Genauigkeit an, simultan nimmt jedoch der Aufwand und die Komplexität sowohl während der Erstellung als auch bei der Benutzung des Grundbausteins zu. Bei der Erstellung der Grundbausteine gilt es daher zwischen Genauigkeit, Aufwand und Komplexität abzuwägen. Eine solche Abwägung erfordert je nach Anforderungen an die Verhaltensmodelle eine Neubewertung in unregelmäßigen Abständen. Sollten sich Anforderungen geändert haben, können die Modellierung und die Maske eines Grundbausteins angepasst werden. Hier kommt einer der Vorteile der assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus Grundbausteinen zum Einsatz. Da dieser Vorgang assistiert oder automatisiert abläuft, können solche Anpassungen an den Grundbausteinen mit geringem Aufwand auch nachträglich in die Verhaltensmodellbibliothek integriert werden.

Ein Beispiel für einen Grundbaustein, dessen Modellierung und die dafür relevanten Parameter inklusive der Bausteinmaske, sind in Abbildung 49 dargestellt. Der Baustein des 2/2-Wegeventils aus der Grundbausteinbibliothek ist in der Mitte dargestellt. Links davon ist die manuell erstellte Modellierung abgebildet. Die dem Baustein zu Grunde liegende Modellierungsidee ist ein veränderlicher Strömungswiderstand (SW), der zwischen zwei Zuständen hin- und hergeschaltet wird.

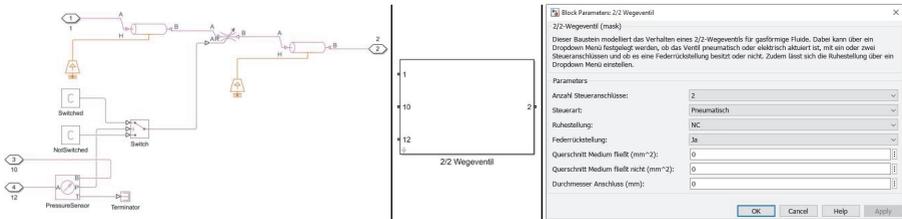


Abbildung 49: Beispielhafte Darstellung eines Grundbausteins (mittig), der darunter liegenden physikalischen Grundprinzipien (links) und der Parametermaske (rechts)

Die zwei resultierenden Querschnitte des Strömungswiderstands für die zwei Zustände können über die Maske gesetzt werden. Die dahinterliegende Logik ist in Gleichung (5.1) beschrieben:

$$A_{SW} = \begin{cases} A_{MediumFlie\beta t}, & \forall p_{12} > p_{10} + S \\ A_{MediumFlie\beta tNicht}, & \forall p_{12} \leq p_{10} + S \end{cases} \quad (5.1)$$

Dabei beschreibt p_{10} den Druck an Steueranschluss 10 und p_{12} den Druck an Steueranschluss 12. Der Parameter S beschreibt die Druckdifferenz, die für ein Schalten des Ventils notwendig ist. Auch dies kann ein Parameter sein, der über die Maske gewählt werden kann. Für diese Arbeit wird der Parameter zur Reduktion der Komplexität jedoch auf 2 bar,rel festgelegt.

Während der Erstellung des Bausteins für die Verhaltensmodellbibliothek werden die Parameter aus der Maske gesetzt. Die Daten hierfür kommen aus der Datenbasis, die mithilfe einer MongoDB Datenbank realisiert wird. Das Mapping zwischen einem Baustein und dem relevanten Parameterdatensatz erfolgt auf Basis des Bezeichners aus dem Graphen, beispielsweise der Artikelnummer. Diese ist in der Datenbank hinterlegt. Das Mapping zwischen den Werten vom passenden Datensatz und den Werten in der Maske eines Bausteins erfolgt mithilfe der Parameterbezeichnungen, die in der Maske und Datenbank gleich sein müssen.

Neben Parametern, die direkt in einen Block im Grundbaustein geschrieben werden, gibt es Parameter, die für eine Konfiguration des Grundbausteins sorgen. Ein Beispiel hierfür ist der Parameter „Ruhestellung“. Er beschreibt, ob ein Ventil ohne angelegtes Steuersignal geöffnet oder geschlossen ist. Dies wird durch eine Anpassung der hinterlegten Blöcke umgesetzt. Speziell für die Ruhestellung können die Steueranschlüsse am Drucksensor sowie die Parameter am Schalter (Switch) umgedreht werden, wie durch folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$A_{SW} = \begin{cases} A_{\text{MediumFlie\ss}t}, \forall p_{12} > p_{10} + S \text{ bei } NC \\ A_{\text{MediumFlie\ss}t\text{Nicht}}, \forall p_{12} \leq p_{10} + S \text{ bei } NC \\ A_{\text{MediumFlie\ss}t}, \forall p_{12} \geq p_{10} - S \text{ bei } NO \\ A_{\text{MediumFlie\ss}t\text{Nicht}}, \forall p_{12} < p_{10} - S \text{ bei } NO \end{cases} \quad (5.2)$$

Liegt beispielsweise bei dem neu konfigurierten Ventil kein Differenzdruck an, ist der geöffnete Querschnitt am veränderlichen Strömungswiderstand ausgewählt. Dies ändert sich erst, wenn der Druck am Steueranschluss 12 um eine Schaltdruckdifferenz S größer als der Druck am Steueranschluss 10 ist [206]. Die Schaltdruckdifferenz beschreibt die Druckdifferenz zwischen Öffnungs- und Schließdruck von Ventilen [207]. Die beschriebene Konfiguration für in Ruhestellung geöffnet (engl.: normally open, NO) und in Ruhestellung geschlossen (engl.: normally closed, NC) lässt sich entsprechend auf die Ansteuerungsart (pneumatisch oder elektrisch), die Anzahl der Steueranschlüsse (1 oder 2) sowie auf die Federrückstellung (mit oder ohne) anwenden. Dies gilt auch für andere Bausteine, wie beispielsweise 3/2-Wegeventile oder ähnliche. Für die Umsetzung dieser Konfigurationsmöglichkeiten wird „MATLAB“ Code im Baustein hinterlegt. Dieser wird bei der Bestätigung einer Maskenkonfiguration ausgeführt und kann im Grundbaustein Blöcke entfernen oder hinzufügen, sowie Verknüpfungen und Parameter anpassen.

5.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen

Sobald die Verhaltensmodellbibliothek in entsprechendem Umfang vorhanden ist, kann die AutoBMC Methode zur Erstellung von Systemen ausgeführt werden. Als Quelle der Anforderungen wird für die AutoBMC Methode ein Graph verwendet. Graphen können durch vorgelagerte Programme erstellt werden, beispielsweise Auslegungstools, Konfiguratoren oder andere Online-Tools. Stehen solche Graphen nicht zur Verfügung, können alternativ die Anforderungen an die AutoBMC Methode auch in Tabellenform übertragen werden. Aus dieser Tabelle kann im Anschluss mit einer definierten Logik ein Graph erstellt werden, der für die AutoBMC Methode verwendet werden kann. Bei der Erstellung solcher Graphen aus Tabellen gibt es jedoch Einschränkungen an die Ausprägung der Graphen, da in den Tabellen häufig nicht ausreichend Informationen vorhanden sind. Für grundsätzliche Systemuntersuchungen reichen solche Tabellen jedoch häufig aus. Der Prozess zur Erstellung eines solchen Graphen aus einer Tabelle ist in Abbildung 50 am Beispiel eines vereinfachten Vakuum-Greifsystems dargestellt. Darin ist links die Tabelle mit den Informationen über die verwendeten Komponenten, deren Anzahl im System sowie deren vertikale und horizontale Position abgebildet. Da es sich bei diesem System um ein zur Mittelachse symmetrisches System handelt, ist für die horizontale Position für jede Komponente eine „1“ eingetragen. Die vertikale Position hingegen ist für jede Komponentengruppe unterschiedlich. Diese Informationen werden mit einer disziplinspezifischen Logik kombiniert. Hier ist beispielsweise hinterlegt, dass pneumatische Vakuumerzeuger stets an Anschluss 2 mit dem Vakuumsystem verbunden sind oder das Vakuumschläuche normalerweise keine Flussrichtung aufweisen und daher die Reihenfolge der Anschlussbezeichnungen nicht relevant ist. Zudem werden Informationen über die Komponenten, wie beispielsweise die Anzahl der Anschlüsse, aus der Datenbank hinzugefügt. Aus dieser Datenbank kommt auch das Mapping der Artikelnummern zu den Komponentenbezeichnungen. Grundsätzlich werden für die AutoBMC Methode hauptsächlich Artikelnummern verwendet, da diese eindeutig sind. Sie sind im Graphen hinterlegt. In Abbildung 50 sind lediglich die Namen der Komponenten aus dem Graphen dargestellt, um das erfolgreiche Ausleiten von Informationen aus der Datenbank zu veranschaulichen. Sobald der Graph erstellt wurde, kann dieser von der AutoBMC Methode eingelesen werden. Da in dieser Arbeit stets eindeutige Artikelnummern verwendet werden, muss keine semantische Aufbereitung der Informationen aus dem Graphen vorgenommen werden. Stattdessen können die Komponenten aus den Knoten des Graphen direkt ausgelesen und in ein neues „MATLAB Simscape“ Modell eingefügt werden.

5.2 Automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen

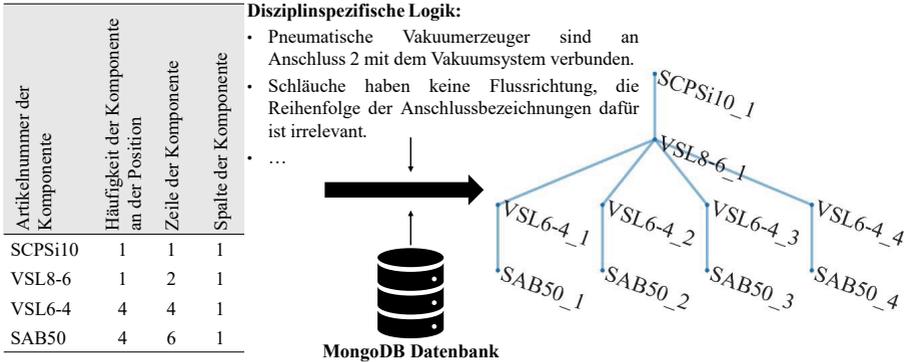


Abbildung 50: Erstellung eines Graphen aus einer Tabelle

Das Ergebnis dieses ersten Zwischenschrittes ist links in Abbildung 51 dargestellt. Für eine bessere Verständlichkeit der erstellten Verhaltensmodelle im „MATLAB Simscape“ Modell werden die im Unternehmen gängigen Namen der Komponenten verwendet. Nachdem alle Bausteine aus den Verhaltensmodellbibliotheken in das Modell geladen wurden, werden diese Bausteine parametrisiert. Hierfür werden die Artikelnummern herangezogen. Mit Hilfe dieser werden die entsprechenden Datensätze in der Datenbank gefunden. Das Zuordnen der im Datensatz hinterlegten Parameter zu den Parametern eines jeweiligen Verhaltensmodellbausteins erfolgt über die Bezeichnungen in der Parametermaske. Diese entsprechen den Parameterbezeichnungen in der Datenbank. Es gibt Verhaltensmodellbausteine für Komponenten, die keine Parameter benötigen. Dies ist häufig für spezifisch ausgelegte Bausteine oder Bausteine mit stark vereinfachter Logik der Fall.

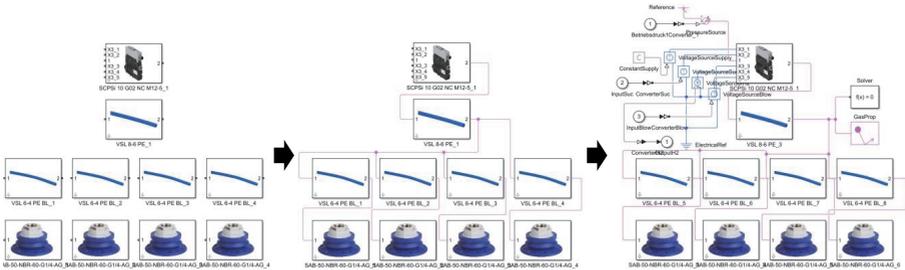


Abbildung 51: Teilschritte zur Erstellung des Verhaltensmodells eines Systems (Bilderquelle: [98])

Nach der Parametrierung folgt die Verknüpfung der Bausteine entsprechend der im Graphen hinterlegten Verknüpfungen. Dabei ist wichtig zu wissen, welche Anschlüsse für die Verknüpfung verwendet werden. Für die Bezeichnung der Anschlüsse an den Bausteinen werden zur Identifikation Nummern verwendet. In einigen Disziplinen gibt es für die Definitionen dieser Anschlussbezeichnung Normen [206]. Für die Implementierung in „MATLAB“ müssen diese Nummern jedoch übersetzt werden. Dort gibt es abhängig davon, ob „Simulink“ oder „Simscape“ Bausteine verwendet werden, unterschiedliche Bezeichnungen für Ein- und Ausgänge. Mithilfe einer eigens entwickelten Funktion in „MATLAB“ werden die Bezeichnungen der Anschlussbezeichnungen entsprechend in die „MATLAB“ internen Bezeichnungen für die Anschlüsse übersetzt. Im Anschluss daran können die Verknüpfungen entsprechend den Vorgaben aus dem

Graphen erstellt werden. Das Ergebnis dieses Zwischenschrittes ist in der Mitte von Abbildung 51 dargestellt.

Das erstellte Verhaltensmodell kann im nächsten Schritt entweder direkt einem Digitalen Zwilling angefügt werden oder in ein standardisiertes Format, wie beispielsweise FMU, überführt werden. Häufig werden jedoch für die einfachere Verwendbarkeit der Modelle noch zusätzlich periphere Blöcke hinzugefügt. Dies gilt sowohl für die Verwendung der Verhaltensmodelle im Digitalen Zwilling als auch für interne Anwendungsfälle. Diese peripheren Blöcke können während des Erstellungsprozesses ebenso automatisiert hinzugefügt werden. Das Ergebnis, nach dem hinzufügen relevanter peripherer Blöcke, ist rechts in Abbildung 51 dargestellt.

Bei den peripheren Blöcken gibt es zum einen grundlegend benötigte Blöcke für die Ausführung solcher Modelle in „MATLAB“, wie beispielsweise ein Solver oder ein Block für die Gaseigenschaften. Zum anderen müssen die Ein- und Ausgänge des Modells, in diesem Fall die Ein- und Ausgänge des pneumatischen Vakuumerzeugers, angesteuert werden. Da hierfür, wie in der Realität, elektrische Signale verwendet werden, bedarf es gesteuerter Spannungsquellen und Spannungssensoren. Diese sind entsprechend der Funktionen der Ein- und Ausgänge des pneumatischen Vakuumerzeugers, die aus der Datenbank ausgelesen werden können, beschaltet.

Das erstellte Verhaltensmodell kann direkt an den Eingängen mit den entsprechenden Signalen beaufschlagt werden und liefert das simulierte Verhalten des realen Systems. Um dieses Verhalten näher analysieren zu können, ist es darüber hinaus möglich, zusätzliche Bausteine einzufügen. Hierdurch können zum einen Werte an bestimmten Stellen ausgelesen und zum anderen das Verhalten des Systems beeinflusst werden. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Verwendung von Strömungswiderständen, die verwendet werden können, um an bestimmten Stellen des Systems Leakage einzubringen. Dadurch lässt sich beispielsweise schnell die maximal zulässige Leakage für ein System bei definierten Randbedingungen bestimmen. Ähnlich dazu gibt es weitere vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten.

5.3 Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe

Die mit der AutoBMC Methode erstellten Verhaltensmodelle sind Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4. Um Verhaltensmodelle anderer Modellierungstiefen bereitstellen zu können, wird in Kapitel 3.3 eine Methode zur Abstraktion vorgestellt. Die Verhaltensmodelle aus der AutoBMC Methode werden als Ausgangsmodell für die Abstraktion verwendet.

Um das Verhaltensmodell zu erstellen, müssen zunächst die relevanten Eingänge sowie ihre Wertebereiche und Schrittweiten festgelegt werden. In dieser Arbeit wird eine Benutzerabfrage zur Auswahl der relevanten Eingänge und ihrer Wertebereiche verwendet. Der Anwender des Assistenzsystems kann in dieser Benutzerabfrage für jeden Eingang mögliche Werte durch Kommas getrennt eingeben. Soll ein Eingang nicht verwendet oder konstant gehalten werden, gibt die nutzende Person für diesen Eingang den gewünschten konstanten Wert an. Dadurch erkennt das Assistenzsystem, dass dieser Eingang während der Iterationen nicht variiert werden soll und gibt diesen Eingang im später erstellten abstrahierten Modell nicht an. Zudem muss festgelegt werden, welche Zeitspanne für die Eingangssignale verwendet werden soll, bis sich ein stabiler Zustand einstellt. Hierfür gilt es, eher eine zu große als zu kleine Zeit zu wählen, da bei einer zu kleinen Zeit die Möglichkeit besteht, dass der final eingeschwingene Zustand noch nicht erreicht ist. Für die Verhaltensmodelle dieser Arbeit werden 3 s als Zeitspanne angenommen. Dies bedeutet, dass ein Eingangssignal für 3 s am Eingang eines Verhaltensmodells anliegt, bevor in den nächsten Zustand gewechselt wird. Diese 3 s haben sich empirisch als geeigneter Wert herausgestellt.

Im nächsten Schritt geht es darum, den Ausgangszustand der Ausgänge des erstellten Modells zu erkennen. Damit ist der Zustand gemeint, der sich einstellt, wenn alle Eingänge mit Null beaufschlagt werden. Dieser Zustand wird als erster Ausgangszustand verwendet. Mit diesem werden nachfolgende Zustände verglichen, um etwaige Abweichungen feststellen zu können. Ein Beispiel für einen solchen Verlauf von Eingangssignalen und den vom Verhaltensmodell zurückgegebenen

5.3 Automatisierte Abstraktion der Modellierungstiefe

Ausgangssignalen ist in Abbildung 52 dargestellt. Darin sind die zwei Ein- und Ausgangssignale für das Verhaltensmodell aus Abbildung 51 über insgesamt 9 s abgebildet. Ein Satz an Eingangssignalen wird dabei, wie bereits erwähnt, für eine Zeit von 3 s angelegt. Haben beide Eingangssignale den Wert 0, ergibt sich der erste sichere Zustand, welcher hier als Zustand 1 bezeichnet und in lila dargestellt ist. Für diesen gibt sowohl das Signal für den Vakuumwert als auch das für die Schaltschwelle H2 den Wert 0 aus. Wird aber ein Eingangssignal mit einem Wert von 24 V (z. B. Ansaugen aktiv) angelegt, reagiert das Modell und es ergibt sich ein neuer Zustand mit der Nummer 2. Dieser ist in Abbildung 52 grün dargestellt. Für diesen liegt ein Vakuumwert von rund 750 mbar,rel und ein Spannungssignal von 24 V für H2 an den Ausgängen an. Wird ausgehend vom Zustand 2 ein Wert von 24 V für die Signale Ansaugen und Ablegen angelegt, ergibt sich ein weiterer Zustand mit der Nummer 3. Dieser ähnelt den Signalen des ersten Zustands, wobei für das Ausgangssignal Vakuum ein Wert von -12 mbar,rel ausgegeben wird. Der dabei anliegende negative Vakuumwert entspricht einem Überdruck, der durch die eingeleitete Druckluft während dem Ablegen zustande kommt.

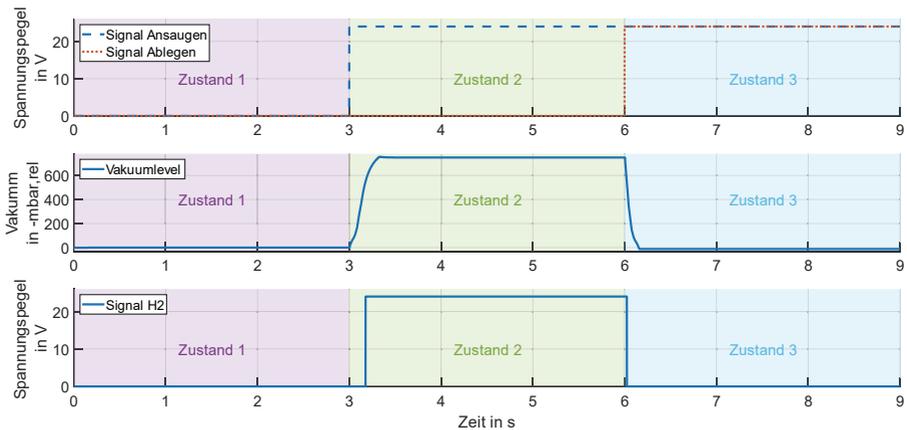


Abbildung 52: Beispielhafter Verlauf von Eingangssignalen (oben) und Ausgangssignalen (mittig sowie unten) zur Detektion von Zuständen und Übergängen

Nach diesem Schema werden alle möglichen Kombinationen für Eingangssignale an alle detektierten Zustände angelegt. Durch diesen Prozess ist es möglich, alle Zustände und Übergänge sicher zu erkennen. Dabei kommt es oft vor, dass zwischen zwei Zuständen mehrere Übergänge mit unterschiedlichen Bedingungen existieren. Sowohl die Zustände als auch die Übergänge werden mit allen irrelevanten Informationen in einem Array abgespeichert. Die erstellten Arrays für erkannte Zustände und Übergänge sind in Tabelle 10 für das Verhaltensmodell aus Abbildung 51 dargestellt. In der Tabelle sind nur ganzzahlige Werte dargestellt. Die Kommas stellen keine Dezimaltrennung dar, sondern trennen die einzelnen Werte der Ein- und Ausgänge. Die Trennung von Eingangswerten für eine zeitliche Abfolge erfolgt mithilfe eines Semikolons.

Für die drei erkannten stabilen Zustände sind neben deren Namen und der Nummer des Zustandes zudem die Werte der Ausgänge aufgeführt, die mit der Methode als stabil erkannt werden. Diese werden mit möglichen neuen Zuständen verglichen, um damit zu detektieren, ob es sich um einen neuen oder bereits bekannten Zustand handelt. Zudem sind die zum Erreichen des Zustandes notwendigen Werte für die Eingänge eines jeden Zustandes angegeben. Dabei gibt es einige Zustände, für die eine gewisse Abfolge von Eingangswerten an das Verhaltensmodell angelegt werden muss, um den Zustand zu erreichen. Dies ist durch mehrzeilige Eingangswerte visualisiert. Neben den Zuständen sind in Tabelle 10 die Übergänge dargestellt. Für diese sind Start- und Zielzustand für den

jeweiligen Übergang angeben sowie die Werte für die Eingänge, die angelegt werden müssen, um den jeweiligen Übergang aus dem entsprechenden Zustand auszulösen. Darüber hinaus sind noch zwei weitere Spalten mit Informationen für die abstrahierten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 2 und 3 aufgeführt. Zum einen die Zeit für jedes Ausgangssignal, bis dieses den Zustand wechseln muss, nachdem ein Eingangssignal angelegt wurde. Zum anderen der Verlauf der Ausgangswerte während dieser Übergangszeit. Die Ausgangswerte sind in einem Array in „MATLAB“ gespeichert, da dies das einfache Zusammenfassen unterschiedlich langer Vektoren ermöglicht.

Tabelle 10: Zustände und Übergänge am Beispiel des Verhaltensmodells aus Abbildung 51

Zustände				Übergänge				
Name Zustand	Nummer Zustand	Stabile Werte Ausgänge	Eingangswerte um Zustand zu erreichen	Zustand Start	Werte Eingänge	Zustand Ziel	Zeit je Ausgang in ms	Ausgangswerte während Übergang
State 1	1	0,0	0,0	0	0,0	1	-	-
State 2	2	749,24	0,0; 24,0	1	24,0	2	319,179	[1x2]
State 3	3	-12,0	0,0; 0,24	1	24,24	3	103,0	[1x2]
				2	0,24	3	161,25	[1x2]
				2	24,24	3	161,25	[1x2]
				3	0,0	1	9,0	[1x2]
				3	24,0	2	319,178	[1x2]

Mit den Informationen der Zustände und Übergänge können im nächsten Schritt die Zustandsmaschinen erstellt werden. Dabei kann über die Benutzeroberfläche festgelegt werden, welche Modellierungstiefe (1 bis 3) erstellt werden soll. Für alle Modellierungstiefen wird zuerst ein leeres Modell für eine Zustandsmaschine in „Simulink“ erstellt. Sollte es sich um ein Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 handeln, werden im nächsten Schritt die Zustände aus dem Zustandsarray iterativ eingefügt. Für die Modellierungstiefen 2 und 3 werden zudem noch Zwischenzustände eingefügt. Die Zustände und Zwischenzustände werden durchnummeriert. In den Zuständen selbst werden die entsprechenden Ausgänge wie initial detektiert gesetzt. In den Zwischenzuständen, sofern vorhanden und benötigt, wird die entsprechende Ausgabe der Werte für den Übergang zwischen zwei Zuständen gesetzt. Im nächsten Schritt werden die erkannten Übergänge zwischen den erstellten Zuständen hinzugefügt und diese mit der erkannten Bedingung ergänzt. Daraus ergibt sich ein Modell mit Ein- und Ausgängen. Damit können entsprechend der Vorgabe die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1 bis 3 erstellt werden. Die Ergebnisse dieser Erstellung am Beispiel des Verhaltensmodells aus Abbildung 51 ist in Abbildung 53 dargestellt. Darin sind im oberen Bereich für Modellierungstiefe 1 die drei Zustände aus Tabelle 10 gut wiederzuerkennen. Zwischen diesen bestehen insgesamt acht Übergänge. Diese acht Übergänge werden in Modellierungstiefe 2 um Zwischenzustände ergänzt. Für Modellierungstiefe 3 werden diese Übergänge um die kontinuierliche Ausgabe von Werten erweitert. Dargestellt sind diese in der letzten Spalte in Tabelle 10.

Die so erstellten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 können direkt als Zustandsmaschine abgespeichert und verwendet werden. Dies ermöglicht ein einfaches Einsehen der darin hinterlegten Logik, erfordert jedoch die gleiche Entwicklungsumgebung, in diesem Fall „MATLAB“ mit den entsprechenden Erweiterungen. Weiterhin können die Zustandsmaschinen auch als FMU exportiert werden. Dies ermöglicht die toolunabhängige Verwendung der erstellten Verhaltensmodelle. Darüber hinaus erschwert es das Auslesen der im Verhaltensmodell hinterlegten Logik.

5.4 Benutzeroberfläche

Dadurch können Unternehmen ihre Verhaltensmodelle über Unternehmensgrenzen hinweg einsetzen, ohne direkt explizit Wissen preiszugeben. Ob das Verhaltensmodell als Zustandsmaschine oder als FMU abgespeichert werden soll, wird über die Benutzeroberfläche festgelegt.

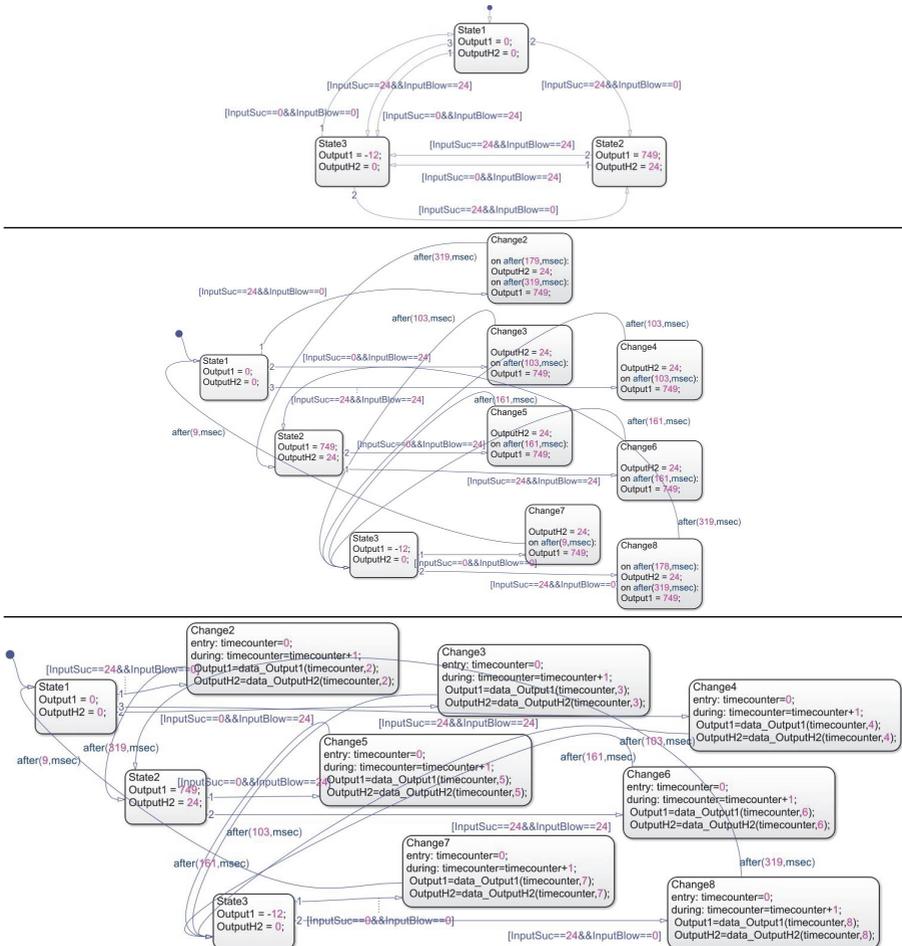


Abbildung 53: Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 (oben), 2 (mittig) und 3 (unten) des Verhaltensmodells aus Abbildung 51

5.4 Benutzeroberfläche

Zur einfacheren Bedienung der unterschiedlichen Funktionen wird eine Benutzeroberfläche aufgesetzt. Diese ist in Abbildung 54 dargestellt. Darin gibt es vier Bereiche für die jeweiligen Funktionalitäten. Links oben sind die Funktionen zur automatisierten oder assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek hinterlegt. Hier kann entweder ein einzelnes Verhaltensmodell für die Verhaltensmodellbibliothek oder eine größere Menge an Modellen auf einmal erstellt werden. Im

Assistenzsystem sind keine Funktionen für die Änderung von Bausteinen in der Bibliothek umgesetzt. Dies kann entweder manuell in der entsprechenden Bibliothek durchgeführt werden, oder der Baustein wird über das Assistenzsystem komplett neu erstellt. Grund für diese Konzeptentscheidung ist der Fokus auf der Reduktion von großen und häufig auftretenden zeitlichen Aufwänden der Simulationsexperten.

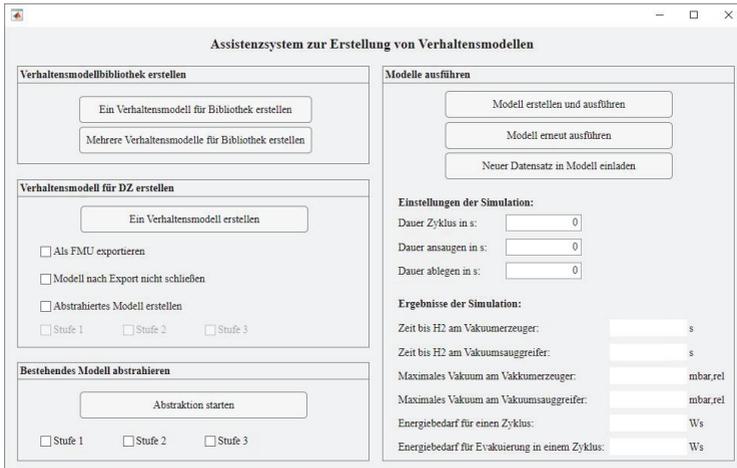


Abbildung 54: Benutzeroberfläche zur Bedienung des Assistenzsystems

Der Bereich mittig links ermöglicht die Erstellung der Verhaltensmodelle für die Verwendung im Digitalen Zwilling. Bevor ein Verhaltensmodell erstellt wird, kann in diesem Bereich ausgewählt werden, ob das Verhaltensmodell als FMU exportiert, ob es nach der Erstellung geschlossen oder abstrahierte Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 erstellt werden sollen. Liegt bereits ein Verhaltensmodell in Modellierungstiefe 4 vor und soll abstrahiert werden, kann dies mithilfe der Funktionen in der Box links unten durchgeführt werden.

Im rechten Bereich ist die aufwandsarme Ausführung zur direkten Analyse von Komponenten oder Systemkonfigurationen zu sehen. Hier kann ein Verhaltensmodell erstellt und ausgeführt, mit einem neuen Parametersatz versehen, oder erneut ausgeführt werden. Dabei können Einstellungen für die Simulation vorgenommen werden. Kenngrößen aus der Ausführung werden darunter zurückgegeben. Bei den Einstellungen und Ergebnisgrößen handelt es sich um beispielhaft ausgewählte Kenngrößen. Diese können entsprechend dem Anwendungsfall oder den Anforderungen angepasst werden.

6 Evaluierung

Für die Evaluierung werden zuerst die benötigten Vorprodukte erstellt, die im Anschluss mit der AutoBMC Methode verwendet werden. Begonnen wird mit der aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek, unter Verwendung aller drei betrachteten Informationsquellen. Besonderer Fokus liegt auf der Verwendung von Fluidschaltplänen als Beispiel für strukturierten Informationen ohne passende Schnittstelle.

Die Verhaltensmodellbibliothek wird im Anschluss für die Evaluierung der AutoBMC Methode genutzt. Hierfür kommen zwei Evaluierungsfälle zum Einsatz. Durch die Verwendung von zwei Evaluierungsfällen mit unterschiedlichem Fokus soll zum einen ein breiter Umfang an Funktionen der Methode abgeprüft und zum anderen eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit der Methode gezeigt werden. Der Fokus des ersten Evaluierungsfalles liegt auf der virtuellen Auslegung eines Systems. Hierfür sollen unterschiedliche Systemausprägungen eines typischen Vakuum-Greifsystems aus dem automobilen Karosserierohbau betrachtet werden. Im Anschluss wird ein abstrahiertes Verhaltensmodell für die VIBN erstellt. Der Fokus für die Erstellung eines solch abstrahierten Verhaltensmodells, hauptsächlich verwendet für das steuerungstechnische Verhalten, liegt im zweiten Evaluierungsfall. Hierbei wird die Be- und Entladeeinheit einer Laserschneidmaschine betrachtet. Bevor das abstrahierte Verhaltensmodell für die VIBN erstellt wird, vereinfacht ein detaillierteres Verhaltensmodell die Auslegung einer solchen Einheit.

Die Evaluierung der Anforderungen A1, A2 und A4 kann mit den Ergebnissen aus den vorgestellten Evaluierungsfällen der jeweiligen DSR-Iterationen direkt erfolgen. Anders sieht das für die Anforderung A3 aus. Für die Bewertung, wie aufwandsarm eine Erstellung ist, muss ein Referenzwert ermittelt werden. Da es hierfür keine passenden, frei zugänglichen Datensätze gibt, werden die Daten für die Evaluierung dieser Arbeit erhoben. Hierfür wird ein Experten-Benchmark zur Erstellung von Verhaltensmodellen in der Modellierungstiefe 4 und Abstraktion solcher Verhaltensmodelle in die Modellierungstiefen 1 bis 3 durchgeführt. Dazu werden insgesamt zehn Experten aus Industrie und Forschung befragt. Die Experten mussten bestimmte Aufgaben durchführen, für welche die Zeit erfasst und mit der von der AutoBMC benötigten Zeit abgeglichen wird.

6.1 Aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

Für die Evaluierung der aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek werden pneumatische Vakuumerzeuger als beispielhafte Komponente herangezogen. Für die drei Disziplinen (Fluidik, Elektrik, Software) liegen unterschiedliche Informationsquellen für die Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek vor. Die elektrischen Schaltpläne liegen als „EPLAN“-Datei vor. Aus diesem Programm kann über eine entsprechende Schnittstelle ein Export durchgeführt werden. Die Transformation des Informationsmodells wird im Anschluss im vorgestellten Assistenzsystem durchgeführt. Die Software wird als Beispiel für eine Informationsquelle mit Expertenwissen verwendet. Hierfür liegen die manuell erstellten Graphen vor. Ähnliches gilt für die disziplinübergreifenden Informationen. Als Beispiel für eine strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle werden die Fluidschaltpläne der pneumatischen Vakuumerzeuger herangezogen. Dabei stellt diese Informationsquelle diejenige mit der größten Komplexität dar. Aus diesem Grund soll nachfolgend detaillierter auf die mit der vorgestellten Methode erzielten Ergebnisse eingegangen werden. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der gesamten Evaluierung präsentiert.

6.1.1 Strukturierte Informationsquelle ohne passende Schnittstelle

Für die Evaluierung der Digitalisierung strukturierter Informationsquellen ohne passende Schnittstelle werden 18 der 92 Fluidschaltpläne anhand des Zufallsprinzips für den Testdatensatz ausgewählt, dies entspricht etwa 20% der Gesamtzahl der betrachteten Schaltpläne. Abbildung 55 zeigt vier Schaltpläne aus dem Testdatensatz, um die vielfältigen Eigenschaften zu demonstrieren.

Ziel der Digitalisierung ist es, die Symbole (Schritt 2), die Verbindungen (Schritt 3) und die Anschlussbezeichnungen (Schritt 4) zu identifizieren. Anschließend wird die Stabilität der Methode anhand eines beispielhaften Schaltplans untersucht, bevor die Ergebnisse diskutiert werden.

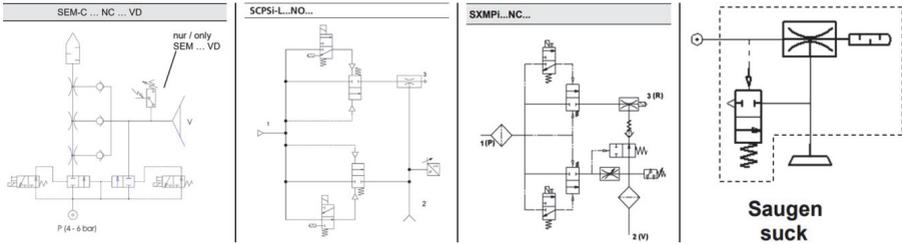


Abbildung 55: Beispielhafte Schaltpläne aus dem Testdatensatz (Bilderquellen: [193, 208–210])

6.1.1.1 Ergebnisse für den Testdatensatz

Zur Bewertung der Erkennung von Symbolen, werden die mit der implementierten Methode erkannten Symbole (ermittelte Klasse) mit den Beschriftungen des Testdatensatzes (tatsächliche Klasse) verglichen. Der Testdatensatz besteht aus 18 beschrifteten Schaltplänen mit insgesamt 29 verschiedenen Symbolen, dargestellt in der Konfusionsmatrix in Abbildung 56.

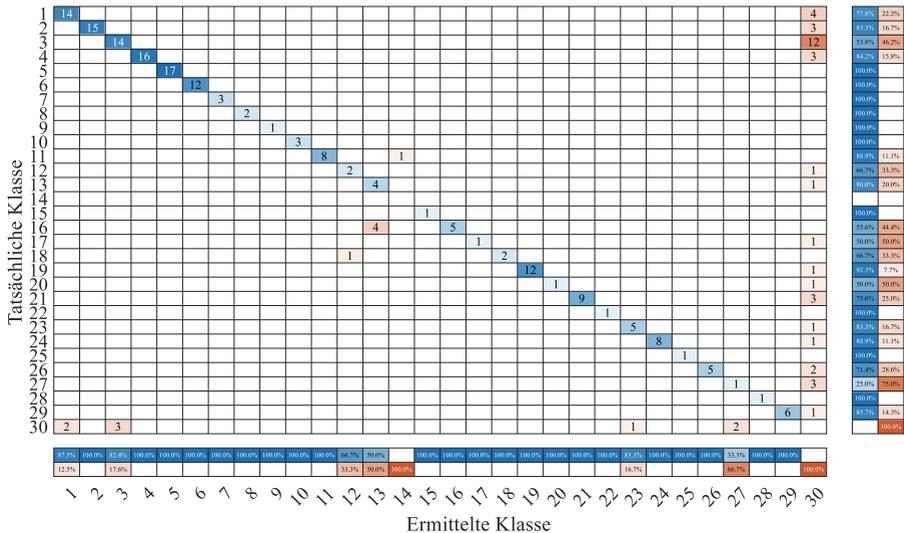


Abbildung 56: Konfusionsmatrix ohne überlappende Symbole der gleichen Kategorie

Zusätzlich zu den 29 Kategorien wird eine weitere Kategorie dreißig für die Hintergrundauswertung hinzugefügt. Diese Kategorie wird verwendet, wenn die Methode ein Symbol erkennt, obwohl an der Stelle keines vorhanden ist (letzte Zeile), oder wenn die Methode ein im Schaltplan vorhandenes Symbol nicht erkennt (letzte Spalte). Eine Übereinstimmung zwischen dem tatsächlichen und dem vorhergesagten Symbol wird festgestellt, wenn das Verhältnis der Flächenüberlappung zwischen den beiden Symbolen 50% oder mehr beträgt. Rechts und unterhalb der Konfusionsmatrix werden zwei

6.1 Aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

Werte für jede Zeile oder Spalte angezeigt. Die zwei Spalten auf der rechten Seite geben den Prozentsatz der richtig und falsch klassifizierten Beobachtungen für jede wahre Klasse an. Die zwei unteren Zeilen zeigen den Prozentsatz der richtig und falsch klassifizierten Beobachtungen für jede vorhergesagte Klasse.

Insgesamt zeigen die Auswertungsergebnisse in Abbildung 56, dass die Methode bei der Erkennung von Symbolen in Schaltplänen effektiv ist. Die Mehrzahl der Symbole wird korrekt erkannt. Bei den Fehlern handelt es sich hauptsächlich um nicht vorhandene Symbole die fälschlicherweise als solche erkannt werden. Bei näherer Betrachtung dieser Fehlerkategorie fällt auf, dass bestimmte Symbole mehrfach an nahezu identischen Stellen in den Schaltplänen erkannt werden. Die Methode scheint bei der Erkennung dieser Symbole überempfindlich zu sein. Diese Fehlerquelle kann jedoch reduziert werden, indem Symbole der gleichen Kategorie, deren Flächenüberlappung ein bestimmtes Verhältnis überschreitet, ausgeschlossen werden. Für den ersten Test wird ein Überlappungsverhältnis von 50% gewählt. Durch die Eliminierung von Doppeltreffern verringert sich die Anzahl der Fehler im Vergleich zu Abbildung 56. Eine Aussage, welche Konfusionsmatrix bessere Ergebnisse liefert, ist jedoch ohne zusätzliche Parameter nicht ohne weiteres möglich. Zur Beurteilung werden aus diesem Grund die KPIs „Specification“, „Precision“, „Recall“, „Accuracy“ und „F1“ (Mittel der Metriken „Precision“ und „Recall“) verwendet, dargestellt in Tabelle 11. Detailliertere Informationen zu diesen KPIs sind in einschlägiger Literatur zu finden [211, 212].

Tabelle 11: KPIs der Konfusionsmatrix mit und ohne Dopplungen

KPI	Mit Dopplungen	Ohne Dopplungen
„Specification“	0.9917	0.9934
„Precision“	0.7146	0.7553
„Recall“	0.8057	0.8207
„Accuracy“	0.7613	0.8075
„F1“	0.7420	0.7749

Durch das Entfernen doppelter Symbole können alle KPIs verbessert werden. Insgesamt führt das Entfernen von doppelt erkannten Symbolen zu besseren Ergebnissen für die Methode. Für die beiden betrachteten Konfusionsmatrizen wurden Standardschwellenwerte von 50% Flächenüberdeckung verwendet, um vorhergesagte und wahre Klassen zu vergleichen. Zur Entfernung von Dopplungen wurde ebenso eine Flächenüberdeckung von 50% angenommen. Die Auswirkungen dieser beiden Schwellenwerte werden weiter untersucht. Zu diesem Zweck werden jedoch keine Konfusionsmatrizen mehr verwendet, sondern nur noch die KPIs. Dazu werden die beiden Schwellenwerte in 10%-Schritten von 10% bis 100% untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 dargestellt.

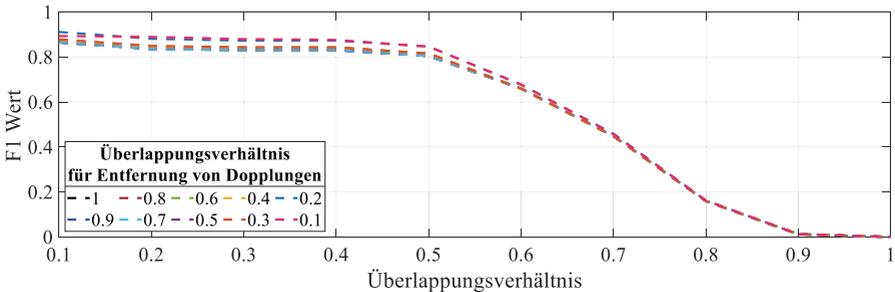


Abbildung 57: Wert für „F1“ verschiedener Schwellenwerte für die Erkennung von Überschneidungen und die Entfernung von Dopplungen

Die besten Ergebnisse für fast alle KPIs werden mit einer Überlappung von 20% oder weniger für die Eliminierung von Duplikaten erreicht. Dies wird durch den Wert für „F1“ unterstrichen. Es kann bestätigt werden, dass die besten Werte für „F1“ für kleine Werte der Erkennungsüberlappung und der Entfernung von Duplikaten gelten. Der beste Wert für „F1“, der erreicht werden kann, ist 0,8477.

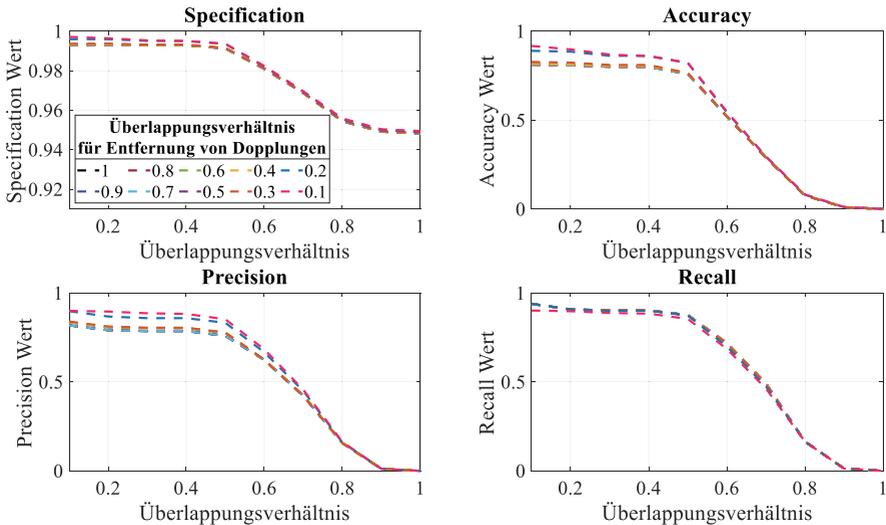


Abbildung 58: Specification, Accuracy, Precision und Recall für verschiedene Schwellenwerte für die Erkennung von Überschneidungen und die Entfernung von Dopplungen

Im Folgenden wird für die Flächenüberdeckung zur Detektion eines korrekt erkannten Symbols ein Faktor von 0,1 verwendet. Für die Entfernung doppelter Symbole wird ein Faktor von 0,4 verwendet. Die endgültigen KPIs, die mit diesen Faktoren erzielt werden könnten, sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Endgültige KPIs der Konfusionsmatrix

KPI	Wert
„Specification“	0.9982
„Precision“	0.8427
„Recall“	0.8307
„Accuracy“	0.9459
„F1“	0.8307

Tabelle 13 listet die korrekt erkannten Symbole für alle 18 Schaltpläne im Testdatensatz auf. Diese Information ist für die Auswertung der Schritte 3 und 4 relevant. Neben den korrekt erkannten Symbolen (kes) sind in den Spalten für Schritt 2 die falsch erkannten Symbole (fes) und die nicht erkannten Symbole (nes) für alle Fluidschaltpläne aus dem Testdatensatz aufgeführt. Schritt 3 beinhaltet die Analyse der erkannten Verbindungen. Es werden nur Verbindungen zwischen richtig erkannten Symbolen berücksichtigt, da falsch erkannte Symbole zu falsch erkannten Verbindungen führen können. Jede Verbindung zwischen zwei Symbolen muss mindestens einmal erkannt werden. Wenn ein Symbol über mehrere Verbindungen mit einem anderen Symbol verbunden ist, wird jede einzelne Verbindung gezählt und muss von der Methode erkannt werden. Neben den korrekt erkannten Verbindungen (kev) werden die falsch erkannten Verbindungen (fev) und die nicht

6.1 Aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek

erkannten Verbindungen (nev) gezählt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 13 in den Spalten von Schritt 3 für alle 18 Schaltpläne aufgeführt. Von den korrekt erkannten Verbindungen werden in Schritt 4 die erkannten Anschlussbezeichnungen analysiert. Analog zu Schritt 3 werden in diesem Schritt nur die Anschlussbezeichnungen der korrekt erkannten Vorinformationen analysiert. Es gibt immer zwei Anschlussbezeichnungen für eine Verbindung, je eine für jede Seite einer Verbindung. Zusätzlich zu den korrekt erkannten Anschlussbezeichnungen (kea) werden falsch erkannte Anschlussbezeichnungen (fea) und die nicht erkannten Anschlussbezeichnungen (nea) erfasst, aufgeführt in Tabelle 13.

Tabelle 13: Detaillierte Ergebnisse für die Bewertung der Schritte 2, 3 und 4

Schaltplan	Schritt 2			Schritt 3			Schritt 4		
	kes	fes	nes	kev	fev	nev	kea	fea	nea
1	6	0	0	6	0	0	12	0	0
2	11	0	0	30	0	1	60	0	0
3	11	1	0	31	1	0	55	7	0
4	12	1	0	19	0	0	38	0	0
5	8	0	0	12	0	0	20	4	0
6	8	1	1	7	0	0	14	0	0
7	10	0	0	20	0	0	40	0	0
8	10	0	0	20	0	0	40	0	0
9	13	0	0	28	0	5	56	0	0
10	8	0	0	22	0	0	44	0	0
11	13	0	0	33	0	0	66	0	0
12	10	1	0	19	0	0	38	0	0
13	10	0	0	20	10	0	40	0	0
14	4	1	0	3	3	0	6	0	0
15	8	1	0	19	0	2	38	0	0
16	10	1	1	18	1	0	36	0	0
17	12	0	0	32	0	2	64	0	0
18	11	0	1	37	0	0	74	0	0
Total	175	7	3	376	15	10	741	11	0

Betrachtet man die Ergebnisse in Tabelle 13, so zeigt sich, dass fünf der 18 Fluidschaltpläne vollständig korrekt digitalisiert werden konnten. Von den restlichen 13 Fluidschaltplänen werden nur bei einem Fluidschaltplan die Anschlussbezeichnungen falsch erkannt, bei acht Fluidschaltplänen treten Teilfehler bei der Symbolerkennung auf und bei vier Fluidschaltplänen tritt der anfängliche Fehler bei der Anschlusserkennung auf.

Eine genauere Analyse der nicht vollständig korrekt erkannten Fluidschaltpläne zeigt, dass die vier anfänglichen Fehler bei der Erkennung der Anschlüsse und der eine anfängliche Fehler bei der Erkennung der Anschlussbezeichnungen mit Ausnahme von Fluidschaltplan neun auf die Objekterkennung zurückzuführen sind. Die Erkennung von Anschlussbezeichnungen und Anschlussbezeichnungen hängt stark von der Objektgröße ab. Wenn ein Symbol zu groß oder zu klein erkannt wird, können Anschlüsse falsch erkannt oder Anschlüsse als Teil des Symbols erkannt werden. Die meisten der in Tabelle 5 aufgeführten Anfangsfehler in Schritt 3 und Schritt 4 haben daher ihre Ursache in Schritt 2. Insgesamt werden 94,6% der Symbole, 93,8% der Verbindungen und 98,5% der Anschlussbezeichnungen korrekt erkannt. Obwohl ein manueller Korrekturaufwand erforderlich ist, ist dieser deutlich geringer als den Schaltplan von Grund auf neu digital zu erstellen. Die Methode ist derzeit am besten geeignet, wenn sie einen Experten unterstützt, der bei Bedarf eingreift. Dies ermöglicht eine gewisse Fehlertoleranz und die direkte Fehlerkorrektur bei der Digitalisierung von Informationen.

6.1.1.2 Einfluss der Bildqualität

Die für die Bewertung verwendeten Schaltpläne stammen aus digital verfügbaren Dokumenten, hauptsächlich PDF-Dateien. Um den Einfluss der Datenqualität auf die Methode zu untersuchen, ist es jedoch notwendig, die Anwendbarkeit der Methode auf Papierschalpläne zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird der Schaltplan Nummer 8 aus dem Testdatensatz als Beispiel verwendet. Das Bild aus der digitalen Quelle (1), die auch für die vorangegangene Auswertung verwendet wird, ist in Abbildung 59 links zu sehen.

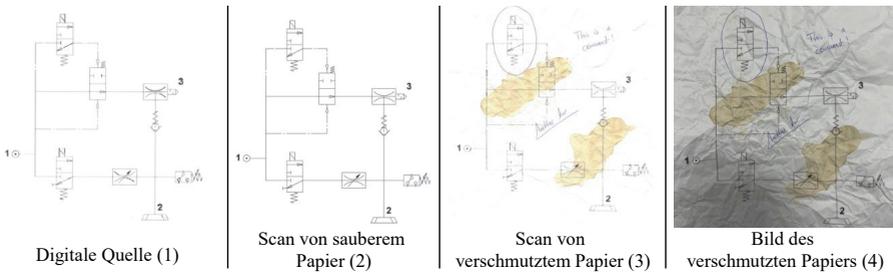


Abbildung 59: Schaltplan der Nummer 8 aus verschiedenen Quellen (Bildquelle: [213])

Die zweite Quelle ist ein qualitativ hochwertiger Scan eines Papierdokuments, das zuvor ausgedruckt wurde. Gedruckte Schaltpläne bestehender Komponenten und Systeme werden oft über einen langen Zeitraum verwendet und können im Laufe der Zeit beschädigt werden. Daher werden Bilder von Fluidschaltplänen, die aus Scans von Dokumenten in schlechtem Zustand stammen, als dritte Quelle betrachtet. Dabei kann der schlechte Zustand z. B. durch Kommentare oder Flecken diverser Substanzen entstanden sein. Die Abbildung links zeigt, dass digitale Quellen oft eine hohe Bildqualität aufweisen, ebenso wie gescannte Dokumente von sauberem Papier durch entsprechende Nachbearbeitung. Diese Nachbearbeitung kann jedoch nur begrenzt zur Verbesserung der Bildqualität beitragen, wie die Abbildung mittig rechts zeigt. Es handelt sich um den Scan eines Schaltplans mit schlechter Bildqualität, der Knicke, Notizen und Kaffeeflecken enthält. Dass die Nachbearbeitung jedoch eine bestimmte Qualitätsverbesserung erzielt, wird durch den rechten Abschnitt in Abbildung 59 deutlich. Das Foto veranschaulicht den Papierschalplan von mittig rechts vor der Nachbearbeitung. In diesem sind Symbole und Verbindungen selbst für Menschen schwer zu erkennen.

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Methode für den Schaltplan Nummer 8 aus den drei vorgestellten Informationsquellen aufgeführt. Die Tabelle enthält die Ergebnisse für die Erkennung von Symbolen, Verbindungen und Anschlussbezeichnungen in der gleichen Struktur wie Tabelle 13.

Tabelle 14: Ergebnisse für die Erkennung von Symbolen (Schritt 2), Verbindungen (Schritt 3) und Anschlussbezeichnungen (Schritt 4) für den Schaltplan Nummer 8 aus den drei Schaltplanquellen

Schaltplan 8 von Quelle	Schritt 2			Schritt 3			Schritt 4		
	kes	fes	nes	kev	fev	nev	kea	fea	nea
Digitale Quelle (1)	10	0	0	20	0	0	40	0	0
Scan von sauberem Papier (2)	10	0	0	20	0	0	40	0	0
Scan von verschmutztem Papier (3)	9	1	3	9	1	0	18	0	0

Die Ergebnisse in Tabelle 14 zeigen, dass das vorgestellte Verfahren Schaltpläne aus digitalen Quellen für den beispielhaft verwendeten Fluidschaltplan fehlerfrei digitalisiert. Alle Symbole,

Verbindungen und Anschlüsse werden korrekt erkannt. Gleiches gilt für gescannte Fluidschaltpläne von sauberem Papier. Wenn jedoch die Qualität des gescannten Papiers durch Anmerkungen, Zeichnungen oder andere Verunreinigungen nachlässt, wird die Genauigkeit der digitalisierten Informationen beeinträchtigt. Unter der schlechteren Qualität leidet auch die Symbolerkennung in Schritt 2. Nicht nur, dass Symbole manchmal falsch erkannt werden, Verunreinigungen wie Kommentare können auch dazu führen, dass nicht vorhandene Symbole als solche erkannt werden. Auch die Verbindungserkennung (Schritt 3) leidet unter der schlechteren Qualität. Teilweise aufgrund der schlechteren Genauigkeit von Schritt 2 werden Verbindungen falsch oder gar nicht erkannt. Die Erkennung der Anschlussbezeichnungen (Schritt 4) scheint weniger empfindlich zu sein, da sie hauptsächlich auf der Referenzdatenbank basiert, die nicht von der Qualität des vorliegenden Fluidschaltplans beeinflusst wird.

6.1.1.3 Diskussion zur Digitalisierung von Informationen aus strukturierten Informationsquellen ohne passende Schnittstelle

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode kann den Prozess der Digitalisierung von Informationen aus fluidtechnischen Schaltplänen automatisieren. Die Methode ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der manuellen Schritte für qualitativ hochwertige Bilder von Schaltplänen. Wenn die Bilder von Schaltplänen von geringerer Qualität sind, ist mehr manuelle Nachbearbeitung erforderlich. Nach Ansicht des Autors liegt dies unter anderem an der Auswahl der Trainingsdaten, die ausschließlich aus Schaltplänen digitaler Quellen mit hoher Bildqualität stammen. Durch die Verwendung von Trainingsdaten mit Schaltplänen schlechterer Bildqualität kann nach Ansicht des Autors die Robustheit gegenüber schlechterer Bildqualität der Schaltpläne verbessert werden.

Wichtiger ist jedoch die korrekte Digitalisierung von Schaltplänen guter Qualität aus digitalen Quellen, da diese häufig vorliegen. Bei Fluidschaltplänen aus digitalen Quellen wurden gute Ergebnisse bei der Digitalisierung der enthaltenen Informationen erzielt. Mögliche Ansätze zur weiteren Verbesserung der Methode sind die Beschriftung weiterer Schaltpläne über das betrachtete Produktportfolio hinaus. Dies kann dazu beitragen, die Ausgewogenheit des Datensatzes weiter zu erhöhen, da einige Symbole im Trainings- und Testdatensatz nur sehr selten vorkommen, während andere sehr häufig vertreten sind. Veranschaulicht wird die Verteilung der Symbole im Trainings- und Testdatensatz jeder Klasse in Abbildung 60.

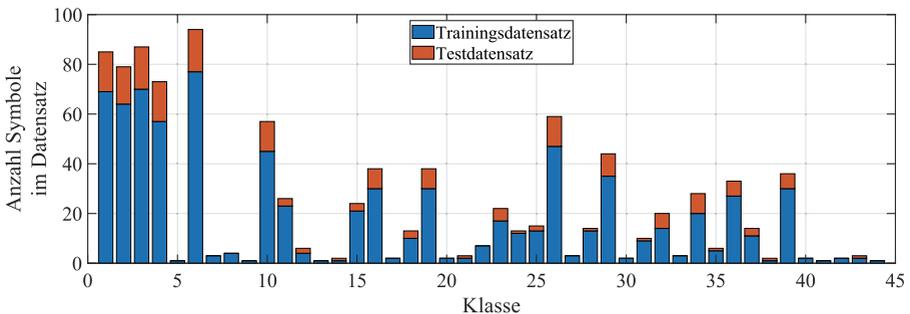


Abbildung 60: Anzahl der Symbole im Trainings- und Testdatensatz für die verschiedenen Klassen

Zunächst ist festzustellen, dass weder die Trainings- noch die Testdaten annähernd die gleiche Anzahl von Symbolen pro Klasse in den Datensätzen enthalten. Dies wird problematisch, wenn Symbole sehr ähnlich aussehen, aber ein Typ im Trainingsdatensatz deutlich häufiger vorkommt als der andere. Dies kann, wie bei der vorangegangenen Auswertung festgestellt, schnell zu einer Verwechslung von ähnlichen Symbolen führen. Es ist auch zu erkennen, dass es Klassen gibt, die nur in den

Trainingsdaten, aber nicht in den Testdaten vorkommen, da der Datensatz inhomogen ist. Die Homogenisierung des Datensatzes ist daher nach Ansicht des Autors von grundlegender Bedeutung für weitergehende Untersuchungen.

Darüber hinaus stellt die Positionierung der erkannten Symbole eine große Herausforderung dar, da diese nicht immer exakt mit den tatsächlichen Positionen übereinstimmen. Problematisch wird das in Schritt 3. Wenn die Position eines Symbols verschoben oder nicht in der richtigen Größe erkannt wird, können Verbindungen nicht oder falsch erkannt werden. Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Ansätze zur nachträglichen Anpassung der erkannten Symbolgröße untersucht worden. Es konnte jedoch kein allgemein gut funktionierender Ansatz gefunden werden. Eine Verbesserung der erkannten Symbolgröße ist daher nach Ansicht des Autors ein weiterer Ansatzpunkt für weiterführende Untersuchungen, zumal mit einer besseren Symbolgröße im Evaluierungsbeispiel bis zu vier Schaltpläne aus dem Testdatensatz zusätzlich korrekt digitalisiert werden können.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass mit der vorgestellten Methode, insbesondere mit Schritt 2, deutlich unterschiedliche Symbole sehr gut detektiert werden können. Problematisch ist jedoch die Unterscheidung von sehr ähnlichen Symbolen, wie die untersuchten Schaltpläne zeigen. Aus diesem Grund ist die Fluidtechnik, insbesondere die Schaltpläne von Kompaktejektoren ein gutes Beispiel für die Auswertung, da sie viele ähnliche Symbole enthalten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik am Beispiel der Fluidik hergeleitet, beschrieben und bewertet. Daraus kann geschlossen werden, dass die vorgestellte Methodik für den Bereich der Fluidik funktioniert. Die Grundvoraussetzungen (z.B. Orientierung der Symbole nur in 90°-Schritten) und Annahmen gelten prinzipiell auch für andere Disziplinen, weshalb eine Anwendung auf andere Disziplinen nach Ansicht des Autors denkbar, aber noch zu beweisen ist.

6.1.2 Weitere Informationsquellen

Für die weiteren Informationsquellen wird eine weniger detaillierte Evaluierung durchgeführt. Dies liegt daran, dass manche der Informationsquellen manuell von Experten erstellt und daher hauptsächlich von deren Leistungen abhängen. Die Funktionalität der manuellen Erstellung eines Graphen bietet ebenfalls wenig Evaluierungspotential. Eine Ausnahme bildet hierbei die Disziplin Elektrik. Ein typischer Elektrikschaltplan in der Vakuum-Handhabungstechnik weist rund 160 Bausteine und 300 Verbindungen auf, wodurch eine manuelle Evaluierung dieser Ergebnisse nur schwer durchführbar ist. Aus diesem Grund wird die Richtigkeit der Transformation des Informationsmodells und die Erstellung des Graphen für den Elektrikschaltplan indirekt anhand des fertigen Verhaltensmodells des pneumatischen Vakuumerzeugers evaluiert.

6.1.3 Verhaltensmodell des pneumatischen Vakuumerzeugers

Für die Evaluierung der aufwandsarm erstellten Verhaltensmodelle für die Verhaltensmodellbibliothek ist eine manuelle Überprüfung der Funktionalität aufgrund der großen Anzahl an Bausteinen nahezu unmöglich. Stattdessen wird das simulierte Verhalten eines beispielhaften Verhaltensmodells eines pneumatischen Vakuumerzeugers mit dessen gemessenem Verhalten verglichen. Reagiert das Verhaltensmodell in Übereinstimmung mit der Messung, kann daraus geschlussfolgert werden, dass der Aufbau des Verhaltensmodells korrekt ist. Dieser Abgleich zwischen simuliertem und gemessenem Verhalten wird mit den Messwerten aus Kapitel 4 durchgeführt. Die simulierten und gemessenen Verläufe für die betrachteten Ein- und Ausgangssignale sind in Abbildung 61 dargestellt. Darin sind links die Eingangssignale für die Signale Ansaugen und Ablegen des in Kapitel 4 beschriebenen Messzyklus dargestellt. Mittig ist das Ausgangssignal für den Vakuumwert von Messung (Mittelwert aus dreißig Messzyklen) und Simulation dargestellt. Beide Signale sind nahezu deckungsgleich. Ähnliches gilt für das vom Kompaktejektor ausgegebene Freigabesignal H2, rechts in Abbildung 61 dargestellt. Die Übereinstimmung der beiden Ausgangssignale zeigt, dass das automatisierte Zusammenfügen der einzelnen Grundbausteine zum Verhaltensmodell des Vakuumerzeugers korrekt funktioniert.

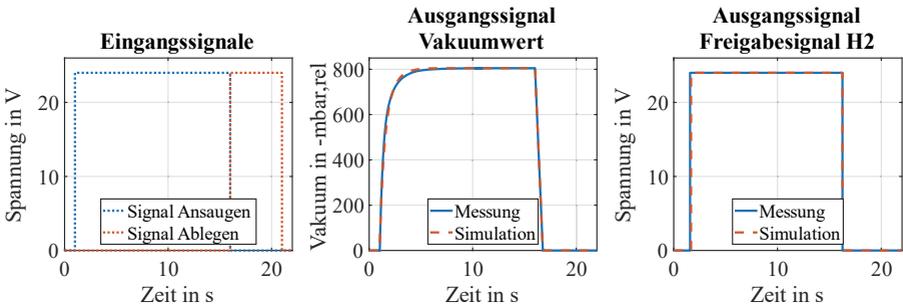


Abbildung 61: Ein- und Ausgangssignale des automatisierten Verhaltensmodell aus der Bibliothek im Vergleich mit gemessenen Verläufen

Schlussfolgernd zur aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek lässt sich festhalten:

- Strukturierte Informationsquellen ohne passende Schnittstellen können mit der vorgestellten Methode mit minimalem manuellem Aufwand in einen Graphen übersetzt werden.
- Vor allem bei schlechter Informationsqualität oder teilweise fehlenden Informationen muss ein Experte die erstellten Verhaltensmodelle manuell korrigieren, wodurch ein manueller Aufwand entsteht, der jedoch deutlich geringer ist als die komplett manuelle Erstellung.
- Auf Basis diverser Informationsquellen kann ein korrekt funktionierendes Verhaltensmodell für die Verhaltensmodellbibliothek vollautomatisiert erstellt werden.

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

Nach der Evaluierung für die aufwandsarme Erstellung der Verhaltensbibliothek kann die AutoBMC Methode für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme unterschiedlicher Modellierungstiefe verwendet werden. Hierfür werden nachfolgend zwei Evaluierungsfälle mit unterschiedlichem Fokus vorgestellt.

6.2.1 Evaluierungsfall 1: Vakuum-Greifsystem für den automobilen Karosserierohbau

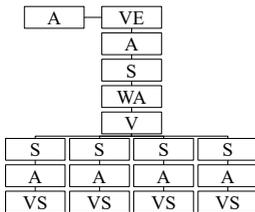
Evaluierungsfall 1 wird am Beispiel eines Vakuum-Greifsystems im automobilen Karosserierohbau durchgeführt. Dort kommen Vakuum-Greifsysteme zum Einsatz, vor allem aufgrund ihrer Robustheit und der einfachen Implementierung im Vergleich zu konkurrierenden Technologien [143, 214]. Ein beispielhaftes Vakuum-Greifsystem im automobilen Karosserierohbau ist in Abbildung 62 dargestellt. Auf Basis dieses Evaluierungsfalles werden insgesamt drei mögliche Konfigurationen vereinfachter Vakuum-Greifsysteme für die Verwendung in diesem Evaluierungsfall ausgelegt. Ziel der Verwendung unterschiedlich konfigurierter Systeme ist zum einen zu veranschaulichen, welche Vor- und Nachteile gewisse Systemarchitekturen aufweisen. Zum anderen werden diese drei vereinfachten Konfigurationen in dem im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Experten-Benchmark verwendet, um zu ermitteln, welchen Einfluss eine unterschiedliche Anzahl an Komponenten im System auf die Erstellungszeit hat.



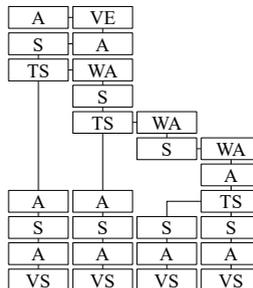
Abbildung 62: Beispielhaftes Vakuum-Greifsystem im Automobil-Karosserierohbau (Bildquelle: [98])

Des Weiteren soll mit den unterschiedlichen Konfigurationen gezeigt werden, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation auch für unterschiedliche Systemarchitekturen hinreichend genau ist. Die drei Konfigurationen sind in Abbildung 63 dargestellt.

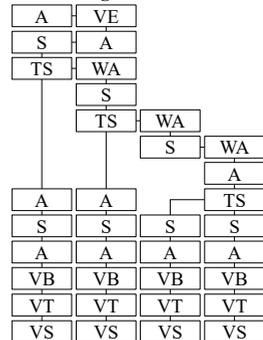
Evaluierungsfall 1a: 18 Bauteile



Evaluierungsfall 1b: 27 Bauteile



Evaluierungsfall 1c: 35 Bauteile



A: Anschluss

S: Schlauch

V: Verteiler

TS: T-Stück

VT: Ventil

VE: Vakuumerzeuger

WA: Winkelanschluss

VS: Vakuumsauggreifer

VB: Verbinder

Abbildung 63: Ausprägung der drei Konfigurationen für Evaluierungsfall 1

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

Darin ist zu erkennen, dass alle drei Ausprägungen einen Vakuumerzeuger, Schläuche und vier Vakuumsauggreifer aufweisen. Die Verknüpfung zwischen den Komponenten und etwaige zusätzliche Komponenten unterscheiden die Systeme jedoch. Durch diese unterschiedlichen Ausprägungen ergeben sich unterschiedliche Mengen an verwendeten Bausteinen.

Für die Erstellung dieser drei Systeme steht jeweils ein Graph mit den relevanten Informationen zur Verfügung. Dieser Graph wird aus einer explizit für diese Arbeit erstellten Datei aus „Microsoft Excel“ automatisiert aufgebaut. Ein solcher Graph kann alternativ auch aus vorgelagerten Konfiguratoren oder Auslegungstools exportiert werden. Mit dem vorhandenen Graphen können die Systeme erstellt werden. Hierzu wird die GUI verwendet, durch welche die Graphen geladen werden. Im Anschluss daran wird das Verhaltensmodell durch die AutoBMC Methode erstellt. Für Evaluierungsfall 1 sind hierbei vor allem die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 relevant. Die Verhaltensmodelle geringerer Modellierungstiefen werden am Ende dieses Evaluierungsfalls erstellt und mit den Vakuumverläufen der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 verglichen.

Für die Evaluierung der Anforderungen A2 ist der Abgleich der erstellten Verhaltensmodelle mit dem realen System relevant. Hierfür werden die in Abbildung 63 abgebildeten Vakuum-Greifsysteme einzeln vermessen. Für die Schaltschwellen H1 und H2 sowie für die Hysterese h1 und h2 werden die Standardwerte des SCPSi 10 [205] verwendet. Diese sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Werte der Schaltschwellen und Hysterese des SCPSi 10 [205]

Schaltschwelle	H1	h1	H2	h2
Wert in mbar,rel	750	150	550	10

Für die Vermessung ist der Vakuumwert am Vakuumerzeuger relevant, der mit einem externen Vakuumsensor und einer SPS im 1 ms Zyklus erfasst wird. Der Zyklus zur Vermessung ist insgesamt 11 s lang. Fünf Sekunden davon befindet sich das Vakuum-Greifsystem im Zustand Ansaugen, 1 s lang im Zustand Ablegen und 5 s lang ist das Vakuum-Greifsystem im ruhenden Zustand. Der Zyklus wird für die Vermessung insgesamt dreißigmal wiederholt. Dadurch können etwaige statistisch verteilte Abweichungen im Messaufbau detektiert und quantifiziert werden. Die mit dem Versuchsaufbau erfassten Messungen sind in Abbildung 64 blau dargestellt.

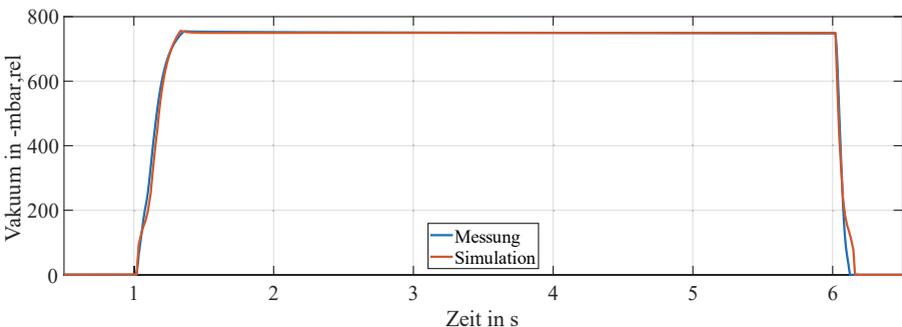


Abbildung 64: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 1a

Darin ist der maximale, der minimale sowie der mittlere Vakuumverlauf abgebildet. Eine Unterscheidung zwischen den drei Kurven ist kaum möglich. Die geringe Streuung deutet auf einen sehr reproduzierbaren Prozess hin. Verglichen werden diese Messungen mit den Ergebnissen der Simulation. Diese sind in Abbildung 64 in orange dargestellt. Die Verläufe für die Messung und Simulation sind ähnlich deckungsgleich wie die minimale, maximale und mittlere Kurve der Messungen. Zwischen Messung und Simulation kann für den Zustand Ansaugen eine maximale

Abweichung von 80 mbar,rel festgestellt werden. Dabei tritt diese maximale Abweichung nur für einen kurzen Moment auf. Eine etwas größere Abweichung gibt es für den Zustand Ablegen. Hier gibt es kurz vor dem vollständigen Abfall des Vakuums eine etwas größere Abweichung von maximal 122 mbar,rel. Betrachtet man die maximale absolute zeitliche Abweichung zwischen Messung und Simulation, beträgt diese 44 ms für den Zustand Ansaugen und 35 ms für den Zustand Ablegen. Bezogen auf die Dauer des Zustands entspricht das maximal 0,9% für den Zustand Ansaugen und 3,5% für den Zustand Ablegen. Aus einer abschließenden Betrachtung der Abweichungen unter dem Gesichtspunkt der Dynamik des Prozesses, kann geschlussfolgert werden, dass die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation sehr gut ist. In jedem Fall ist diese Übereinstimmung hinreichend genau für den betrachteten Anwendungsfall.

Für die Evaluierungsfälle 1b und 1c werden die Systeme, wie für Evaluierungsfall 1a vermessen und anschließend mit den simulierten Vakuumverläufen aus den mit der Methode erstellten Verhaltensmodellen verglichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 65 dargestellt.

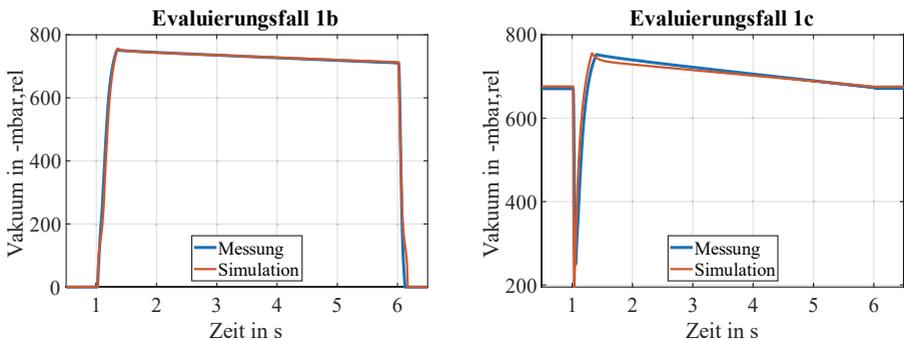


Abbildung 65: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 1b (links) und 1c (rechts)

Auch für die Systeme der Evaluierungsfälle 1b und 1c kann eine geringe Streuung über die dreißig gemessenen Zyklen festgestellt werden. Diese ist bei beiden Diagrammen ebenso wenig auszumachen, wie in Abbildung 64. Zudem ist auch die Abweichung zwischen gemessenem und simuliertem Verhalten sehr gering. Es lässt sich eine maximale absolute Abweichung von 134 mbar,rel für Evaluierungsfall 1b während des Ablegens und 84 mbar,rel für den Zustand Ansaugen ausmachen. Betrachtet man die maximale absolute zeitliche Abweichung zwischen Messung und Simulation, beträgt diese 24 ms für den Zustand Ansaugen und 42 ms für den Zustand Ablegen. Bezogen auf die Dauer des Zustands entspricht das maximal 0,5% für den Zustand Ansaugen und 4,2% für den Zustand Ablegen. Für Evaluierungsfall 1c lässt sich eine etwas höhere Abweichung von 306 mbar,rel für einen kurzen Moment feststellen. Dies liegt an der sehr hohen Dynamik des Prozesses. Vernachlässigt man diese Abweichungsspitze, liegt die Abweichung stets unter 105 mbar,rel. Betrachtet man die maximale absolute zeitliche Abweichung zwischen Messung und Simulation, beträgt diese 96 ms für den Zustand Ansaugen. Bezogen auf die Dauer des Zustands entspricht das maximal 1,9%. Die gute Übereinstimmung in Evaluierungsfall 1a zwischen gemessenem und simuliertem Verhalten lässt sich durch diese zwei Evaluierungsfälle bestätigen.

Die mit der AutoBMC Methode erstellten Verhaltensmodelle der Vakuum-Greifsysteme, die mit den Messungen verglichen werden, sind der Modellierungstiefe 4 zuzuordnen. Verhaltensmodelle dieser Modellierungstiefe sind sehr detailliert und erzielen, wie in Abbildung 64 und Abbildung 65 dargestellt, eine sehr gute Übereinstimmung mit dem realen Verhalten. Für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 werden je nach Modellierungstiefe entsprechend große Vereinfachungen vorgenommen. Trotz dieser Vereinfachungen liefern die Modelle je nach

Einschränkung durch die entsprechende Modellierungstiefe eine gute Übereinstimmung mit dem Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4 und demnach auch mit dem real gemessenen Verhalten. Dieser Umstand ist in Abbildung 66 veranschaulicht.

Darin ist im oberen Diagramm der Verlauf der Eingangssignale, die an das Verhaltensmodell angelegt werden, dargestellt. Es handelt sich dabei um Signale mit zwei Zuständen und einem Spannungspegel von 24 V. Zu erkennen ist, dass sobald ein positives Signal Ansaugen angelegt wird, das Vakuum auf das Niveau von ungefähr 750 mbar_{rel} ansteigt. Je nach Modellierungstiefe wird dieser Verlauf ohne zeitlichen Verzug (Modellierungstiefe 1), mit zeitlichem Verzug aber ohne kontinuierlichen Verlauf (Modellierungstiefe 2), oder mit kontinuierlichem Verlauf (Modellierungstiefe 3) ausgegeben. Dadurch ist gut erkennbar, dass die Überdeckung der Signale der Modellierungstiefen 3 und 4 sehr groß ist. Die Modellierungstiefe 3 bildet unter der getroffenen Einschränkung, dass nur zwei Eingangssignale als Variablen verwendet werden, dasselbe Verhalten wie die Modellierungstiefe 4 ab. Ähnliches gilt für den Bereich des abfallenden Signals. Auch hier wird das Verhalten der Modellierungstiefe 4 durch die Verhaltensmodelle geringerer Modellierungstiefen entsprechend den Einschränkungen abgebildet.

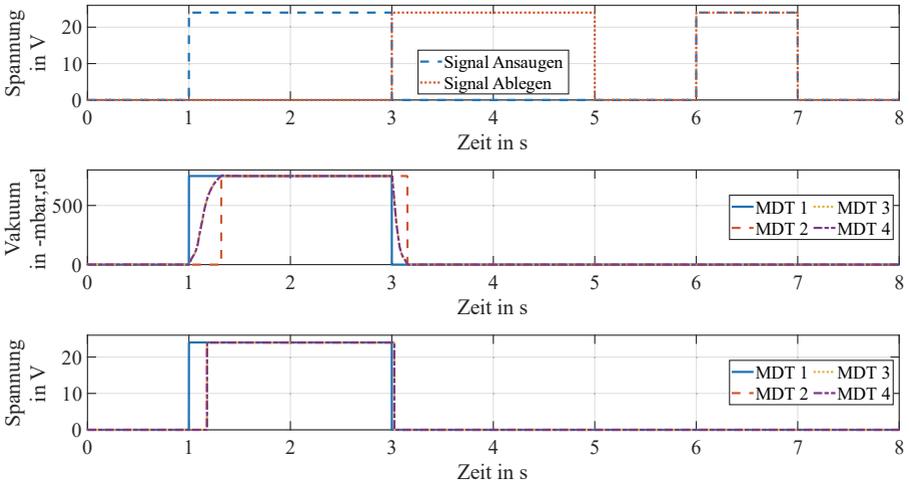


Abbildung 66: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Signal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben)

Dies wird auch bei der Betrachtung des digitalen Ausgangssignals H2 im unteren Diagramm der Abbildung 66 deutlich. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen den abstrahierten Verhaltensmodellen der Modellierungstiefen 1 bis 3 entsprechend deren Vereinfachungen in Bezug auf das Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4 sehr gut. Durch fehlende kontinuierliche Zwischenschritte sind keine Unterschiede zwischen den Verhaltensmodellen der Modellierungstiefen 2 und 3 zu erkennen.

Dass die vereinfachten Verhaltensmodelle nicht nur einen typischen Evakuierungszyklus abbilden können, sondern auch die Logik eines solchen Systems beinhalten, wird bei Sekunde sechs in Abbildung 66 deutlich. Beim gleichzeitigen Anlegen eines positiven Signals für Ansaugen und Ablegen, ist das Signal Ablegen dominant. Es kommt also zu keinem Evakuierungsvorgang und das Vakuumlevel steigt nicht an. Entsprechend gibt es weder Änderungen im Vakuumverlauf (mittig) noch im Signal H2 (unten). Dieses Verhalten ist in den Verhaltensmodellen der Modellierungstiefen

1 bis 3 hinterlegt und zeigt, dass diese entsprechend deren Einschränkungen das Verhalten der Modellierungstiefe 4 übernehmen und damit nur geringe Abweichungen zur Realität aufweisen.

Die großen Vorteile von Verhaltensmodellen geringerer Modellierungstiefen werden deutlich, wenn die benötigte Zeit zur reinen Ausführung sowie für die Ausführung inklusive Kompilierung betrachtet wird. Die Modelle werden sowohl regulär (inklusive Kompilierung) als auch im „Fast Restart“-Modus (ohne Kompilierung) von „MATLAB“ ausgeführt, um die Ausführungszeiten zu ermitteln. Um externe Einflüsse so gering wie möglich zu halten, werden alle geöffneten Programme auf dem PC („Intel Xeon W-2123 Prozessor“, 32 Gigabyte RAM und „Nvidia Quadro P2000“ GPU) geschlossen. Zudem wird die Ausführung für die reine Simulation sowie für die Simulation inklusive Kompilierung insgesamt dreißigmal wiederholt.

Die damit erzielten Zeiten für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 sind in Abbildung 67 als Säulendiagramm dargestellt. Darin sind die mittleren Zeiten durch Balken, und die maximalen und minimalen Zeiten durch Fehlerbalken dargestellt. Die absolute Streubreite der Zeiten bei den Modellierungstiefen 1 bis 3 ist sehr gering. Im Vergleich dazu ist die absolute Streubreite der Modellierungstiefe 4 deutlich größer. Anhand der Messwerte wird zudem deutlich, dass die Zeit für das Kompilieren bei Modellierungstiefe 4 nur einen geringen Anteil von ungefähr 12% der Gesamtzeit ausmacht. Bei den Modellierungstiefen 1 bis 3 macht die Zeit für das Kompilieren hingegen einen deutlich größeren Anteil zwischen ungefähr 72% und ungefähr 76% der Gesamtzeit aus. Absolut gesehen ist die Kompilierungszeit für die Modellierungstiefe 4 mit rund 26,78 s hingegen deutlich höher als die Zeit von 0,76 s bis 0,91 s der Modellierungstiefen 1 bis 3.

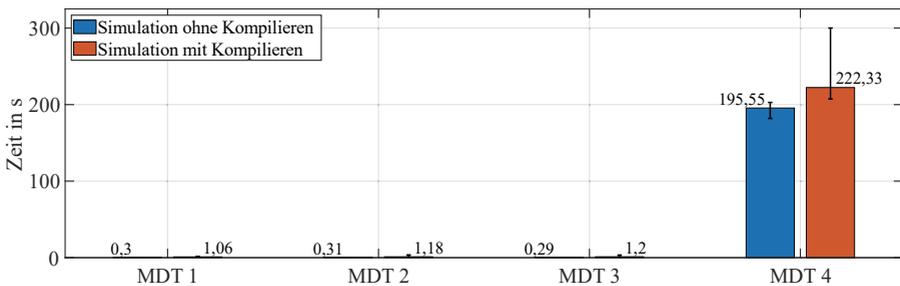


Abbildung 67: Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für das Verhaltensmodell der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 1a

Die Reduktion der Rechenzeit durch die Abstraktion von der Modellierungstiefe 4 auf die Modellierungstiefen 1 bis 3 ist signifikant. Der Unterschied der Simulationszeiten mit und ohne Kompilierung zwischen den Modellierungstiefen 1 bis 3 dagegen ist sehr gering. Es lässt sich zwar ein leichter Anstieg von der Modellierungstiefen 1 zur Modellierungstiefen 3 wahrnehmen, dieser ist jedoch mit ungefähr 140 ms für die Zeit mit Kompilieren sehr gering. Für die Zeit ohne Kompilieren lässt sich dieser Trend bestätigen, mit einer Ausnahme für die Modellierungstiefe 3. Diese Ausnahme ist vermutlich durch Messfehler bei den sehr kurzen Messzeiten zu begründen.

Ein ähnliches Bild, wie für die Simulationszeiten, ergibt sich auch für den Speicherbedarf der Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen, dargestellt in Tabelle 16.

Tabelle 16: Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 des Evaluierungsfalls 1a

	MDT 1	MDT 2	MDT 3	MDT 4
Speicherbedarf in Kilobyte	41	42	43	1.773

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

Der Speicherbedarf für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 nimmt mit steigender Modellierungstiefe leicht zu. Ein signifikanter Anstieg liegt jedoch nur für Modellierungstiefe 4 vor. Neben den abstrahierten Verhaltensmodellen für den Evaluierungsfall 1a werden solche auch für die Evaluierungsfälle 1b und 1c erstellt. Für diese ergibt sich sowohl für die Signalverläufe als auch für die Simulationszeiten der unterschiedlichen Modellierungstiefen ein ähnliches Bild. Die Eingangssignale (oben), der Vakuumverlauf (mittig) und das Ausgangssignal für das Signal H2 (unten) sind für Evaluierungsfall 1b (links) und 1c (rechts) in Abbildung 68 dargestellt. Für beide Evaluierungsfälle lässt sich, wie bei Evaluierungsfall 1a, eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der Signale der Modellierungstiefe 4 und denen der Modellierungstiefen 1 bis 3 feststellen. Dabei wird die Übereinstimmung maßgeblich durch die Einschränkungen der jeweiligen Modellierungstiefe bestimmt. Die Verläufe des Evaluierungsfalls 1b sind sehr ähnlich zu denen aus 1a, während Evaluierungsfall 1c grundsätzlich andere Signalverläufe, sowohl für das Vakuum als auch für das Ausgangssignal H2 aufweist. Durch die gute Übereinstimmung der Signalverläufe kann gezeigt werden, dass die Abstraktion der Modellierungstiefe eine gute Übereinstimmung für unterschiedliche Verhaltensmodelle liefert.

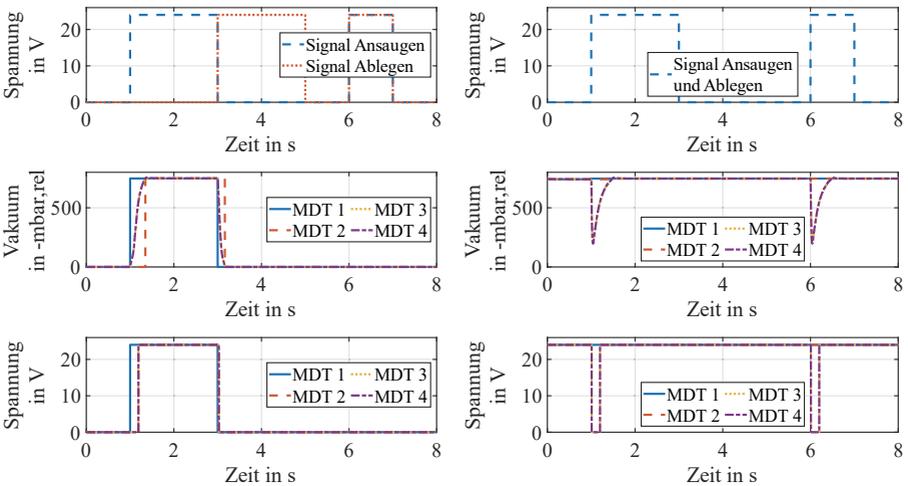


Abbildung 68: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Ausgangssignal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 1b (links) und 1c (rechts)

Bei detaillierterer Betrachtung der Verläufe für das Vakuum und das Signal H2 aus Evaluierungsfall 1c fällt auf, dass sich bei Änderung des Eingangssignals immer der gleiche stabile Zustand einstellt. Für das Vakuumlevel sind das rund 750 mbar,rel, für das Signal H2 ungefähr 24 V. Trotzdem werden die Zwischenzustände von dem Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 3 abgebildet. Um dies zu erreichen, muss ein zusätzliches Ausgangssignal hinzugezogen werden, welches in Abbildung 68 aus Platzgründen nicht dargestellt ist. Dabei handelt es sich um das Vakuumersignal, welches direkt am Vakuumsauggreifer 1 aufgenommen wird. Durch die Verwendung dieses Signals ändert sich der stabile Zustand bei Anlegen eines Signals Ansaugen oder Signals Ablegen und die Zwischenzustände werden durch das Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 3 abgebildet.

Die resultierenden Vakuumverläufe für Evaluierungsfall 1c am Vakuumherzeuger und am Vakuumsauggreifer sind im Vergleich mit den angelegten Eingangssignalen in Abbildung 69

dargestellt. Darin ist im unteren Diagramm der Vakuumverlauf an Vakuumsauggreifer 1 dargestellt. In diesem Verlauf lässt sich eine Änderung des stabilen Zustandes als Reaktion auf ein geändertes Eingangssignal (Ansaugen oder Ablegen) erkennen. Dies führt zum beschriebenen Verhalten. Die beschriebene Methode zur Abstraktion der Modellierungstiefe zeigt Flexibilität und Funktionalität. Durch Hinzunahme eines zusätzlichen Ausgangssignals für das Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4 können gewünschte Änderungen an den erstellten Verhaltensmodellen geringerer Modellierungstiefen ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Zudem zeigt es, wie die Methode genutzt werden kann, um das gewünschte Endergebnis zu erzielen.

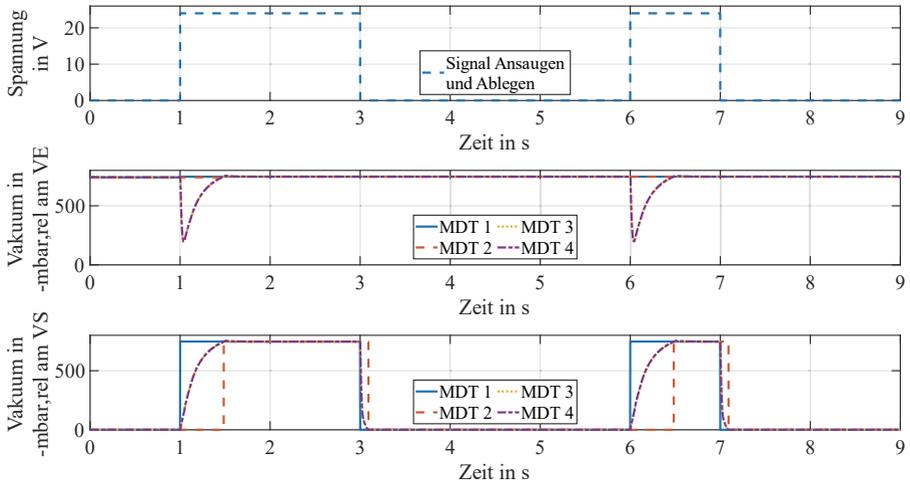


Abbildung 69: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Vakuum in Vakuumsauggreifer 1 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 1c

Äquivalent zu Evaluierungsfall 1a werden die benötigten Zeiten für Simulation mit und ohne Kompilierung für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen der Evaluierungsfälle 1b und 1c untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 70 dargestellt.

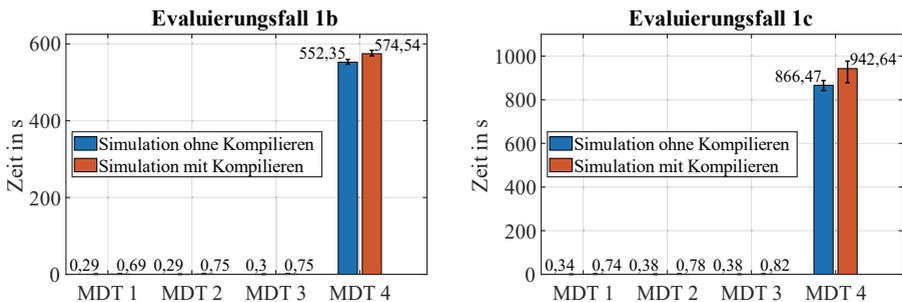


Abbildung 70: Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für das Verhaltensmodell der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 1b und 1c

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

Die entsprechenden Modelle werden dafür dreißigmal normal und im „Fast Restart“ Modus ausgeführt und die entsprechenden Zeiten gemessen. Die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 benötigen ähnlich zu Evaluierungsfall 1a mit zunehmender Modellierungstiefe länger für die Simulation mit und ohne Kompilierung, wobei die Unterschiede marginal sind. Ein großer Sprung kann für die Modellierungstiefe 4 festgestellt werden. Zudem lässt sich ein leichter Zuwachs der benötigten Zeiten für das größere Verhaltensmodell in Evaluierungsfall 1c verglichen mit 1b feststellen. Ein ähnliches Bild zur Simulationszeit ergibt sich für den Speicherbedarf der Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen. Dieser ist in Tabelle 17 dargestellt. Der Speicherbedarf für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 nimmt leicht mit steigender Modellierungstiefe zu. Ein signifikanter Anstieg liegt jedoch nur für Modellierungstiefe 4 vor.

Tabelle 17: Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 der Evaluierungsfälle 1b und 1c

	Evaluierungsfall 1b				Evaluierungsfall 1c			
	MDT 1	MDT 2	MDT 3	MDT 4	MDT 1	MDT 2	MDT 3	MDT 4
Speicherbedarf in Kilobyte	41	42	43	1.771	40	40	43	1.769

Abschließend sollen für Evaluierungsfall 1 die unterschiedlichen Konfigurationen hinsichtlich deren KPIs bewertet werden. Hierzu wird die Zeit bis zu einem industrietypischen Vakuumlevel von 600 mbar,rel an allen Vakuumsauggreifern erfasst [215]. Darüber hinaus wird die Zeit bis das Vakuum wieder abgebaut ist (Grenze 5 mbar,rel), der Luftverbrauch für einen Zyklus und die Anschaffungskosten der drei Systemkonfigurationen gegenübergestellt. Da die absoluten Anschaffungskosten kundenspezifisch sein können und gewissen Schwankungen unterliegen sind diese mit Bezug auf die teuerste Systemkonfiguration prozentual angegeben. Die Anschaffungskosten für Schläuche und Verbindungen werden vernachlässigt. Die Ergebnisse dieser Gegenüberstellung sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Gegenüberstellung der gewählten KPIs für die drei Systemkonfigurationen

	1a	1b	1c
Zeit bis 600 mbar,rel - Evakuierung	189 ms	212 ms	147 ms
Zeit bis 5 mbar,rel - Abbau Vakuum	143 ms	154 ms	57 ms
Luftverbrauch pro Zyklus	45,6 sl	48,3 sl	5,0 sl
Kosten	50,6 %	50,6 %	100 %

Während die Konfigurationen 1a und 1b bezüglich Zeiten, Luftverbrauch und Kosten sehr ähnlich sind, weicht die Konfiguration 1c stark von den anderen beiden ab. Die Konfiguration ist zwar fast doppelt so teuer wie die Konfigurationen 1a und 1b, jedoch ist die Evakuierungszeit deutlich geringer. Der große Unterschied zeigt sich vor allem beim Ablegen und beim Luftverbrauch. Die Konfiguration 1c benötigt rund 11 % der Druckluft, welche die Konfiguration 1a für einen Zyklus benötigt. Dies liegt an der kürzeren Evakuierungszeit und vor allem an der Technik des Ablegens. Die Konfiguration 1c verwendet hierfür Ventile, um zur Umgebung zu belüften. Die Konfigurationen 1a und 1b hingegen verwenden Druckluft, die durch den pneumatischen Vakuumerzeuger gesteuert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die mit der AutoBMC erstellten Verhaltensmodelle 4 ein schneller und einfacher Vergleich der KPIs unterschiedlicher Konfigurationen realitätsnah möglich ist.

6.2.2 Evaluierungsfall 2: Be- und Entladeeinheit einer Laserschneidmaschine

Evaluierungsfall 2 wird am Beispiel einer Be- und Entladeeinheit einer Laserschneidmaschine durchgeführt. Eine solche Einheit kommt in Laserschneidmaschinen zum Einsatz, um den Betrieb vollständig zu automatisieren. Die Einheiten führen zum einen neue Bleche in die Bearbeitungszone zu und zum anderen die fertig ausgeschnittenen Bauteile sowie die Restgitter aus dieser ab. Da die Formen, die auf Laserbearbeitungsmaschinen geschnitten werden, nahezu beliebig komplex sein können, sind vor allem die Anforderungen für das Abführen der gefertigten Bauteile hoch. Um den Entwicklungsprozess solcher Maschinen so effizient wie möglich zu gestalten, setzen Anlagenhersteller auf neueste technologische Hilfsmittel. Unter anderem kommt die VIBN zum Einsatz. Für eine VIBN benötigt der Anlagenhersteller entsprechende Verhaltensmodelle der Komponenten und Systeme von den Komponentenherstellern. Dabei geht es dem Anlagenhersteller in diesem Zusammenhang nicht um detaillierte physikalische Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4, um damit detaillierte Effekte in den Komponenten selbst zu simulieren. Vielmehr benötigt er abstrakte Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3, um damit das steuerungstechnische Verhalten der Komponenten und Systeme digital abbilden zu können. Dies befähigt ihn dazu, den Steuerungscode ohne echte Hardware zu entwickeln und realitätsnah testen zu können. Dadurch verkürzt sich die Inbetriebnahmezeit signifikant, da bereits viele Fehler im Steuerungscode vor der realen Inbetriebnahme behoben werden können [88]. Solche Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 werden auch für die Be- und Entladeeinheit benötigt. Als konkretes Beispiel wird der Aufbau aus Abbildung 71 verwendet.

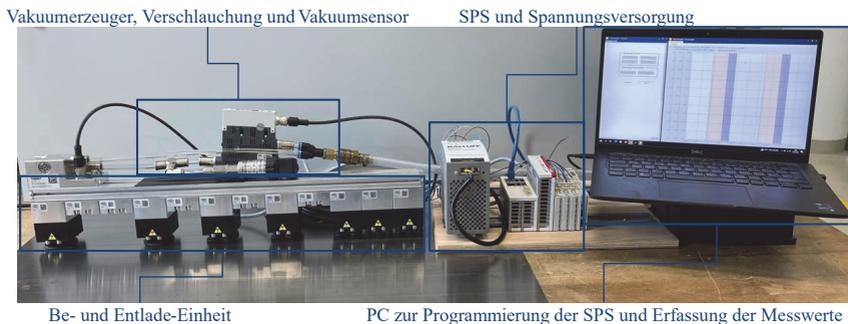


Abbildung 71: Be- und Entladeeinheit mit Peripherie zur Vermessung

In dieser Abbildung ist die Be- und Entladeeinheit während der Vermessung abgebildet. Neben der Einheit sind auch die anderen Gerätschaften abgebildet, welche für die Vermessung notwendig sind. Die Einheit selbst besteht aus einem Kopfmittel und insgesamt zwölf Anbaumodulen. Die Anbaumodule können unterschiedliche Konfigurationen aufweisen. Für diesen Versuchsaufbau werden zwei Module mit einem Vakuumsauggreifer, drei Module mit vier Vakuumsauggreifern und zwei Module mit neun Vakuumsauggreifern verwendet. Die restlichen fünf Modulplätze sind mit sogenannten Blindmodulen versehen, das bedeutet Module ohne Vakuumsauggreifer. Die Einheit wird über eine Kopfeinheit mit Vakuum und Druckluft versorgt. Die Ansteuerung erfolgt über IO-Link. Dadurch können alle 32 Vakuumsauggreifer einzeln angesteuert werden. Hierzu sind Ventile in den einzelnen Modulen eingebaut. Ist ein Vakuumsauggreifer aktiviert, ist er über den Vakuumschluss mit dem Vakuumerzeuger verbunden. Ist er hingegen deaktiviert, liegt am Vakuumsauggreifer kein Vakuum vom Vakuumerzeuger an. Die Module melden darüber hinaus, ob

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

bestimmte eingestellte Schaltschwellen für das Vakuum überschritten sind oder nicht. Zudem meldet die Kopfeinheit weitere Werte, wie z. B. den Betriebsdruck oder das Systemvakuum, zurück. Für die Untersuchungen in Evaluierungsfall 2 sollen die Schaltschwellen H2 bis H5 betrachtet werden. Dabei wird die Schaltschwelle H2 von der Kopfeinheit zurückgemeldet, während die Schaltschwellen H3, H4 und H5 von jedem Modul separat gemeldet werden. Für die Schaltschwellen H2 bis H5 werden die Standardwerte der Be- und Entladeeinheit verwendet. Diese sind in Tabelle 19 aufgeführt. Als Vakuumerzeuger wird ein SCPSi 10 [205] verwendet. Dieser wird von der SPS angesteuert. Die SPS zeichnet die Vakuumwerte mithilfe eines zusätzlichen Vakuumsensors zwischen Vakuumerzeuger und Be- und Entladeeinheit auf. Die Messwerterfassung wird mit einer Abtastrate von 1 ms durchgeführt.

Tabelle 19: Werte der Schaltschwellen für die Be- und Entladeeinheit

Schaltschwelle	H2	H3	H4	H5
Wert in mbar,rel	550	500	600	750

Die aufgenommenen Messdaten werden mit dem vollautomatisiert erstellten Verhaltensmodell aus der AutoBMC Methode des Systems verglichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 72 dargestellt. Darin ist im oberen Bereich, äquivalent zu den Evaluierungsfällen 1a, 1b und 1c der Vakuumverlauf über der Zeit aufgetragen.

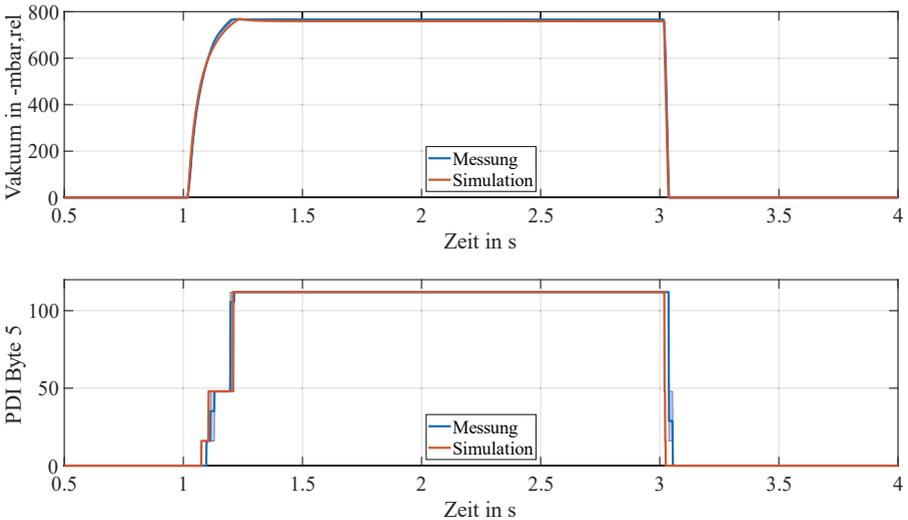


Abbildung 72: Vergleich von Messung und Simulation für Evaluierungsfall 2a mit Vakuumverlauf (oben) und Ausgangssignal des PDI Byte 5 (unten)

In diesem lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für den Zustand Ansaugen als auch für den Zustand Ablegen erkennen. Die maximale Abweichung während dem Zustand Ansaugen beträgt 47 mbar,rel, für den Zustand Ablegen hingegen 108 mbar,rel. Betrachtet man die maximale absolute zeitliche Abweichung zwischen Messung und Simulation, beträgt diese 18 ms sowohl für den Zustand Ansaugen als auch für den Zustand Ablegen. Bezogen auf die Dauer des Zustands entspricht das maximal 0,4% für den Zustand Ansaugen und 1,8% für den Zustand Ablegen. In Abbildung 72 sind die Messkurven von dreißig Messzyklen abgebildet. Ähnlich zu den bereits vorgestellten

Evaluierungsfällen ist für diesen Evaluierungsfall die Streuung sehr gering, weshalb Maximal-, Minimal- und Mittelwert in Abbildung 72 oben nahezu deckungsgleich sind. Neu für diesen Evaluierungsfall ist die Darstellung eines zusätzlichen Messwertes. Dieser beschreibt die in den einzelnen Modulen der Be- und Entladeeinheit gemessenen Schaltschwellen H3, H4 und H5. Dabei werden die Schaltschwellen in Form eines Byte-Wertes ausgegeben, bei dem die einzelnen Bits unterschiedliche Funktionen haben. Für die Betrachtung in dieser Arbeit kommen lediglich die Bits 4 (H3), 5 (H4) und 6 (H5) zum Einsatz. Ist eine Schaltschwelle im jeweiligen Modul überschritten, wird das Bit auf den Wert 1 gesetzt. Ist sie hingegen unterschritten wird dem Bit der Wert 0 zugewiesen. Liegt beispielsweise im Modul ein Vakuum von 650 mbar,rel vor, sind die Bits 4 und 5 gesetzt, was in einem Byte-Wert von 48 resultiert. Die einzelnen Bytes werden über IO-Link übertragen. Der dargestellte Wert beschreibt explizit die Schaltschwellen aus dem ersten Modul. Dies wird über das Byte 5 von der Einheit bereitgestellt.

Zu erkennen ist, dass auch für das Signal der Eingangsprozessdaten an Byte 5 (engl.: Process Data In Byte 5, PDI Byte 5) die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation sehr gut ist. Auffällig ist jedoch die im Vergleich mit dem Vakuumverlauf deutlich höhere Streuung zwischen den einzelnen Messungen. Der Ursprung hierfür wird in der Übertragungsart des Signals (IO-Link) vermutet, da bei der von der Komponente verwendeten Baudrate (COM 2) die Zykluszeit zwischen ungefähr 2 ms und 30 ms betragen kann [216]. Je nachdem wann eine Schaltschwelle bezogen auf den aktuellen Stand im Zyklus ausgelöst wird, können Verzögerungen von bis zu 30 ms auftreten. Weiterhin sind teilweise deutliche Abweichungen zwischen Messung und Simulation im Vergleich zum Vakuumverlauf erkennbar. Dies fällt vor allem für den Bereich um Sekunde drei auf. Dies ist vermutlich auf die Einschränkungen in der Dynamik von IO-Link zurückzuführen, da der Vakuumverlauf eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zeigt. Außerdem ist der Prozess des abfallenden Vakuums hochdynamisch, wodurch eine Verzögerung durch die Signalübertragung stärker zum Vorschein kommt.

Abbildung 72 zeigt, dass das Verhaltensmodell der Be- und Entladeeinheit in Modellierungstiefe 4 eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den Messdaten liefert. Wichtig für den Evaluierungsfall sind zudem Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3. Diese werden vollautomatisiert mit der AutoBMC Methode erstellt. Für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 ist eine Übereinstimmung mit der Modellierungstiefe 4 und damit der Messung relevant. Ein Vergleich von Ausgangssignalen der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 ist in Abbildung 73 dargestellt. Darin sind äquivalent zu Evaluierungsfall 1a das Signal Ansaugen, das Signal Ablegen sowie der Vakuumverlauf in den oberen beiden Diagrammen dargestellt. Im unteren Diagramm ist das PDI Byte 5 dargestellt. Wie in Evaluierungsfall 1 ist für Evaluierungsfall 2a die Übereinstimmung zwischen den Ausgangssignalen der Modellierungstiefen 1 bis 3 mit denen der Modellierungstiefe 4 sehr gut. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellierungstiefen ergeben sich vornehmlich durch die Einschränkungen der jeweiligen Modellierungstiefen. Auf eine mögliche Reduktion der Simulationszeit wird im Anschluss an Evaluierungsfall 2b kombiniert eingegangen.

Da der Aufbau von Evaluierungsfall 2a mit der großen Anzahl funktioneller Einzelteile sehr umfangreich und komplex ist, kann davon ausgegangen werden, dass ein manueller Aufbau eines abstrahierten Verhaltensmodells dieses Systems sehr kompliziert und zeitaufwändig ist. Um den zeitlichen Aufwand der AutoBMC Methode in der nachfolgenden Experten-Benchmark quantitativ bewerten zu können, soll ein zusätzlicher Evaluierungsfall mit der Nummer 2b durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um einen konzeptionellen Aufbau, der im Rahmen dieser Arbeit nicht in Hardware aufgebaut, sondern rein simulativ betrachtet wird. Der Aufbau besteht aus zwei pneumatischen Achsen, die jeweils ein Ventil zum Hoch- und Runterfahren besitzen. Zudem sind beide Achsen jeweils geklemmt. Um eine Bewegung durchführen zu können, muss über ein Ventil die Klemmung geöffnet werden. Ist die Klemmung nicht mit Druckluft versorgt, wird diese durch eine Rückstellfeder drucklos geklemmt. Die zwei Achsen sind vertikal ausgerichtet.

6.2 Automatisierte Erstellung und Abstraktion von Verhaltensmodellen

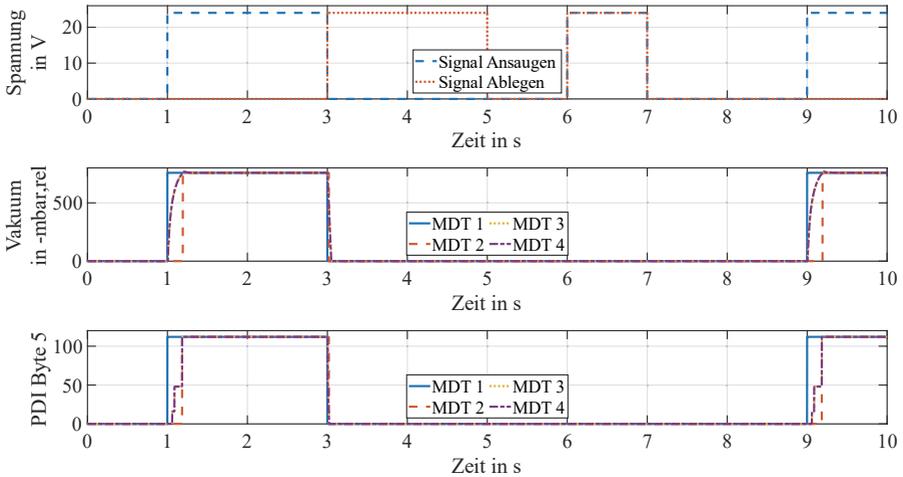


Abbildung 73: Signalverläufe der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 im Vergleich mit der Modellierungstiefe 4 für das Signal H2 (unten) und das Systemvakuum (mittig) abhängig von den Eingangssignalen Ansaugen und Ablegen (oben) für Evaluierungsfall 2a

Ist die Klemmung geöffnet und kein Druck an der Achse angelegt, fährt diese anhand der Schwerkraft herunter, bis die untere Endlage erreicht wird. Dasselbe gilt für ein gleichzeitiges Anlegen der Signale für das Hoch- und Runterfahren bei geöffneter Klemmung. In diesem Fall liegt ein Kräftegleichgewicht vor und die Schwerkraft sorgt für eine Bewegung in die untere Endlage. Die oberen und unteren Endlagen der zwei pneumatischen Achsen werden über Endlagenschalter erfasst. Dadurch ergeben sich sechs binäre Eingangssignale und vier binäre Ausgangssignale. Eine schematische Darstellung des Aufbaus ist in Abbildung 74 dargestellt.

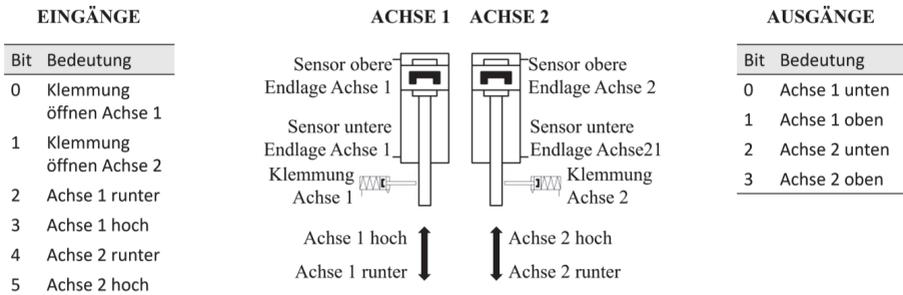


Abbildung 74: Schematische Darstellung des Aufbaus für Evaluierungsfall 2b

Um ein abstrahiertes Verhaltensmodell der Modellierungstiefen 1 bis 3 für dieses System mit der AutoBMC Methode zu erstellen, wird zuerst ein Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4 aufgebaut. Hierfür wird ein Graph des Aufbaus erstellt und mit der GUI eingelesen. Damit wird das Verhaltensmodell des Systems aus der Verhaltensmodellbibliothek aufgebaut. Auf Basis dieses Verhaltensmodells wird im Anschluss die Abstraktion auf die Modellierungstiefen 1 bis 3 durchgeführt. Dieser Evaluierungsfall dient hauptsächlich der Bewertung der Zeiten für die

Erstellung eines abstrahierten Verhaltensmodells sowie der Funktionalität der Methode zur Abstraktion. Aus diesem Grund werden die erstellten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 mit dem der Modellierungstiefe 4 verglichen, dargestellt in Abbildung 75.

Darin sind links die Ein- und Ausgangssignale der ersten Achse und rechts die der zweiten Achse dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse beider Achsen stammen aus einem Verhaltensmodell, werden für die Visualisierung jedoch getrennt, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Im oberen Abschnitt beider Achsen sind die drei vorhandenen Eingangssignale dargestellt. Diese werden unterschiedlich variiert. Die mittleren Darstellungen visualisieren das Sensorsignal der Endlagenschalter der unteren Endlage der jeweiligen Achse. Der untere Abschnitt zeigt das Sensorsignal der oberen Endlagenschalter. Dabei sind alle Signale über der Zeit aufgetragen und werden über einen Zeitraum von 9 s betrachtet. Verschiedene Kombinationen von Eingangssignalen für Aufwärts- und Abwärtsfahrt mit offener und geschlossener Klemmung werden an das Modell angelegt und dessen Reaktion untersucht. Bei Betrachtung der Signalverläufe für beide Sensoren der Achse 1 fällt auf, dass die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 das Signal der Modellierungstiefe 4 gut nachbilden. Auffällig ist der fehlende Zeitverzug für die Signale der Modellierungstiefe 1, was aber mit den Randbedingungen der entsprechenden Modellierungstiefe begründet werden kann. Am Beispiel der Achse 2 wird sichtbar, dass die anliegenden Signale nicht immer direkt eine Reaktion der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 hervorrufen, wenn dies in Modellierungstiefe 4 nicht der Fall ist. Sofern die Klemmung nicht geöffnet ist, oder das Herunterfahren Signal bei geöffneter Klemmung aktiv ist, kann die Achse den oberen Endlagenschalter nicht erreichen. Erst wenn die Klemmung geöffnet, das Signal zum Herunterfahren der Achse inaktiv und das Signal zum Hochfahren der Achse aktiv ist, bewegt sich diese. Ab Sekunde 8 kann dies in allen vier Modellierungstiefen beobachtet werden.

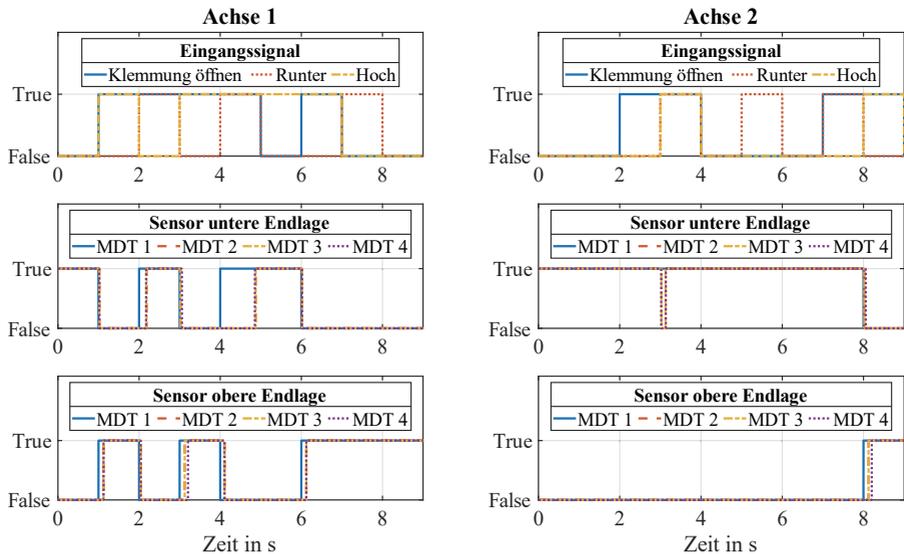


Abbildung 75: Signalverläufe der unterschiedlichen Modellierungstiefen für die Achsen 1 (links) und 2 (rechts)

Die Methode der Abstraktion von Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4 in die Modellierungstiefen 1 bis 3 liefert für Evaluierungsfall 2a und 2b gute Ergebnisse bezüglich der Übereinstimmung mit dem realen Verhalten des Aufbaus bzw. dem Verhalten der Modellierungstiefe

4. Wichtig für abstrahierte Verhaltensmodelle ist deren schnelle und damit ressourcenschonende Ausführung. Wie für Evaluierungsfall 1, werden die Verhaltensmodelle der Evaluierungsfälle 2a und 2b insgesamt dreißigmal in jeder Modellierungstiefe ausgeführt. Die benötigten Zeiten werden erfasst und sind in Abbildung 76 dargestellt.

Auch bei den Evaluierungsfällen 2a und 2b fällt auf, dass die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 signifikant weniger Zeit für die Simulation mit und ohne Kompilierung benötigen. Was in diesem Vergleich gut sichtbar wird, ist die geringere Differenz zwischen Modellierungstiefe 4 und den Modellierungstiefen 1 bis 3. Diese nimmt mit der sinkenden Komplexität des Verhaltensmodells ab. Während für das sehr komplexe Verhaltensmodell von Evaluierungsfall 2a die Differenz um ungefähr den Faktor 2.000 größer ist, liegt dieser für das deutlich weniger komplexe Verhaltensmodell von Evaluierungsfall 2b bei rund Faktor 8,1. Der exakte Wert ist abhängig davon, welche Zeiten genau miteinander verglichen werden.

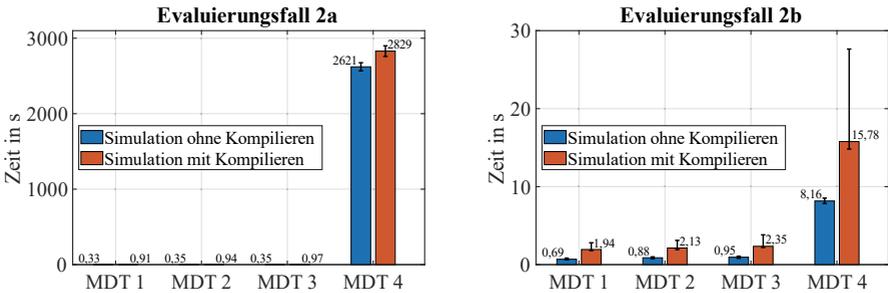


Abbildung 76: Zeiten für die reine Simulation und die Simulation inklusive Kompilierung für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 2a und 2b

Wie im Vergleich zuvor dauert die Ausführung mit und ohne Kompilierung länger, wenn die Modellierungstiefe der Verhaltensmodelle zunimmt. Die Unterschiede zwischen den Modellierungstiefen 1 bis 3 sind, wie in Evaluierungsfall 1, marginal. Ein ähnliches Bild, wie für die Simulationszeiten, ergibt sich für den Speicherbedarf der Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen. Dieser ist in Tabelle 20 dargestellt. Der Speicherbedarf für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 nimmt mit steigender Modellierungstiefe leicht zu. Ein signifikanter Anstieg liegt für Modellierungstiefe 4 vor.

Tabelle 20: Speicherbedarf für Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 4 von Evaluierungsfall 2a und 2b

	Evaluierungsfall 2a				Evaluierungsfall 2b			
	MDT 1	MDT 2	MDT 3	MDT 4	MDT 1	MDT 2	MDT 3	MDT 4
Speicherbedarf in KB	52	52	54	1.682	43	55	60	103

Schlussfolgernd zur Evaluierung der AutoBMC Methode in Kapitel 6.2 lässt sich zusammenfassen:

- Die erstellten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 stimmen sehr gut mit den gemessenen Verläufen für die untersuchten Systeme überein.

- Die erstellten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 stimmen sehr gut mit den Verläufen der Modellierungstiefe 4 und damit indirekt mit den gemessenen Verläufen überein. Beschränkend für die Übereinstimmung sind die definierten Einschränkungen der jeweiligen Modellierungstiefe.
- Je geringer die Modellierungstiefe eines Verhaltensmodells, desto schneller kann dieses ausgeführt werden. Während der Abstand zwischen den Modellierungstiefen 1 bis 3 noch gering ist, steigt dieser für die Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 4 stark an. Je komplexer ein Verhaltensmodell wird, desto größer wird der zeitliche Vorteil der abstrahierten Verhaltensmodelle. Ähnliches gilt für den Speicherbedarf der einzelnen Verhaltensmodelle. Je geringer die Modellierungstiefe, desto geringer der Speicherbedarf, wobei die Abstände zwischen Modellierungstiefe 1, 2 und 3 im Vergleich zu Modellierungstiefe 4 signifikant kleiner sind.

6.3 Experten-Benchmark

Zur Evaluierung der Anforderung A3 wird im Rahmen dieser Arbeit ein Experten-Benchmark durchgeführt. Hierdurch soll die von Experten normalerweise benötigte Zeit für die Erstellung eines Verhaltensmodells bestimmt werden, um damit den zeitlichen Vorteil durch die AutoBMC Methode zu belegen und zu quantifizieren. Für die Experten-Benchmarks werden zehn Experten herangezogen, die mindestens zweieinhalb Jahre Erfahrung mit „MATLAB“ vorweisen können. Genauere Informationen über die Experten sind in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 21: Allgemeine Informationen über die Experten des Experten-Benchmarks

Nr. Experte	Alter	Industrie oder Forschung	Jahre Erfahrung mit „MATLAB“	Erfahrung mit Vakuum-Greifsystemen
1	28	Industrie	7	Ja
2	26	Industrie	3	Ja
3	33	Forschung	6,5	Nein
4	30	Industrie	4	Nein
5	28	Forschung	6	Nein
6	29	Forschung	10	Nein
7	37	Industrie	10	Nein
8	27	Forschung	4,5	Nein
9	34	Industrie	14	Nein
10	30	Forschung	2,5	Nein

6.3.1 Versuchsdurchführung

Insgesamt werden den Experten neun einzelne Aufgaben vorgelegt. Eine Übersicht über diese neun Aufgaben und deren Zweck ist in Tabelle 22 aufgeführt. Sieben der neun Aufgaben beziehen sich auf den Evaluierungsfall 1 mit dem Fokus auf der aufwandsarmen Erstellung und Parametrierung der Verhaltensmodelle, sowie der aufwandsarmen Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek. Evaluierungsfall 2 ergänzt die Aufgaben zusätzlich um die Abstraktion der Modellierungstiefe. Die allgemeinen Informationen über die Experten werden zu Beginn des Benchmarks für jeden Experten erfasst. Für die Benchmarks müssen die Experten unterschiedliche Vakuum-Greifsysteme entsprechend einem abstrahierten Fluidschaltplan in „MATLAB Simscape“ aufbauen und parametrieren.

6.3 Experten-Benchmark

Tabelle 22: Übersicht über die Aufgaben des Experten-Benchmarks

Name	Evalierungsfall	Anforderung	Anzahl Bausteine ohne Peripherie	Anzahl Parameter ohne Peripherie	Anzahl Bausteine mit Peripherie	Anzahl Parameter mit Peripherie
1a	1	Aufwandsarme Erstellung Verhaltensmodell	18	10	22	14
1b	1	Aufwandsarme Erstellung Verhaltensmodell	27	12	31	16
1c	1	Aufwandsarme Erstellung Verhaltensmodell	35	12	43	20
1d	1	Aufwandsarme Parametrierung Verhaltensmodell	-	4	-	-
1e	1	Aufwandsarme Parametrierung Verhaltensmodell	-	16	-	-
1f	1	Aufwandsarme Erstellung Bibliothek	5	1	8	3
1g	1	Aufwandsarme Erstellung Bibliothek	18	30	21	32
2a	2	Aufwandsarme Erstellung Verhaltensmodell	23	8	28	12
2b	2	Abstraktion Modellierungstiefe	-	-	-	-

Ein Beispiel eines abstrahierten Fluidschaltplan ist in Abbildung 77 dargestellt.

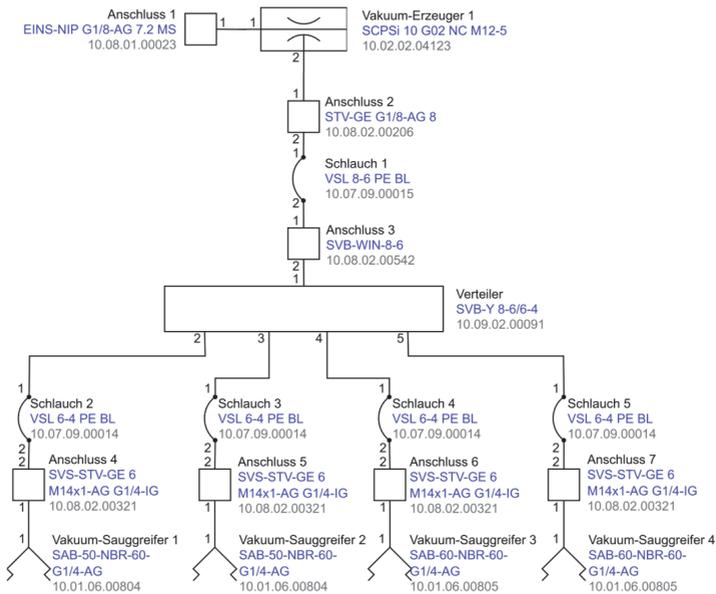


Abbildung 77: Systemplan von Versuch 1a für die Experten-Benchmarks

Für den Aufbau der Verhaltensmodelle haben die Experten für die meisten Benchmarks Zugriff auf die Verhaltensmodellbibliothek. Die Parameter für die Verhaltensmodelle sind in einer Tabelle aufgelistet. Ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Parameter von Versuch 1a des Experten-Benchmarks

Artikelnummer Baustein	Name Baustein	Typ Baustein	Name Parameter	Wert	Einheit
10.02.02.04123	Vakuumerzeuger 1	SCPSi 10 G02 NC M12-5	Drosselventil Eingestellter Durchmesser (mm):	1.5	mm
10.02.02.04123	Vakuumerzeuger 1	SCPSi 10 G02 NC M12-5	SteuercodeSCPSi Schaltschwelle H1 (mbar):	725	mbar
10.02.02.04123	Vakuumerzeuger 1	SCPSi 10 G02 NC M12-5	SteuercodeSCPSi Schaltschwelle h1 (mbar):	125	mbar
10.02.02.04123	Vakuumerzeuger 1	SCPSi 10 G02 NC M12-5	SteuercodeSCPSi Schaltschwelle H2 (mbar):	550	mbar
10.02.02.04123	Vakuumerzeuger 1	SCPSi 10 G02 NC M12-5	SteuercodeSCPSi Schaltschwelle h2 (mbar):	10	mbar
10.07.09.00015	Schlauch 1	VSL 8-6 PE BL	Länge (m):	0.2	m
10.07.09.00015	Schlauch 2	VSL 8-6 PE BL	Länge (m):	0.4	m
10.07.09.00015	Schlauch 3	VSL 8-6 PE BL	Länge (m):	0.35	m

Zudem wird den Experten eine Tabelle mit allen relevanten Informationen über die einzelnen Bausteine zur Verfügung gestellt (z. B. welche Bezeichnung für diesen verwendet wird und in welcher Bibliothek der entsprechende Baustein gefunden werden kann), beispielhaft in Tabelle 24 dargestellt. Der Prozess zur Erstellung ist abgeschlossen, sobald der Experte dies signalisiert.

Nach signalisiertem Abschluss wird die Richtigkeit des erstellten und parametrisierten Verhaltensmodells überprüft. Sofern sich Fehler im Verhaltensmodell befinden, hat der Experte zwei weitere Versuche, diese Fehler zu korrigieren. Sollte das Verhaltensmodell auch nach dem dritten Versuch nicht korrekt aufgebaut und parametrisiert sein, wird der Aufbau des aktuellen Verhaltensmodells abgebrochen und es wird mit dem nächsten Versuch weitergemacht. Die Zeit für die einzelnen Versuche, das Verhaltensmodell korrekt zu erstellen und zu parametrisieren, wird dabei erfasst und festgehalten. Nach dem korrekten Aufbau des Verhaltensmodells, muss es um die notwendige Peripherie ergänzt werden. Auch hierfür stehen dem Experten ein Plan für den Aufbau sowie eine Tabelle für die Parametrierung zur Verfügung. Den Abschluss dieses Arbeitsschritts signalisiert der Experte selbstständig, gefolgt von einer Kontrolle und etwaigen Korrekturen bis hin zu drei Versuchen. Auch für die Erstellung und Parametrierung der Peripherie wird die Zeit für die einzelnen Versuche erfasst und festgehalten. Alternativ zum Abbruch durch den Aufbau von drei nicht korrekten Verhaltensmodellen, wird der Prozess für jeden der Benchmarks spätestens nach 30min abgebrochen. Dies dient dazu, den zeitlichen Aufwand für die Experten einheitlich zu begrenzen.

Die Informationen werden den Experten in Form einer Präsentation im System „Microsoft PowerPoint“ und Tabellen im System „Microsoft Excel“ zur Verfügung gestellt. Die Peripherie ist dabei von Versuch zu Versuch unterschiedlich und umfasst, neben Solvern und Gaseigenschaften, auch Bausteine für die Druckluftversorgung, die Ansteuerung der Vakuumerzeuger oder Ventile.

Tabelle 24: Informationen über die Bausteine von Versuch 1a des Experten-Benchmarks

Name	Bibliothek	Bezeichnung	Artikelnummer
Anschluss 1	Filter und Verbindungen	EINS-NIP G1/8-AG 7.2 MS	10.08.01.00023
Vakuumerzeuger 1	Vakuumerzeuger	SCPSi 10 G02 NC M12-5	10.02.02.04123
Anschluss 2	Filter und Verbindungen	STV-GE G1/8-AG 8	10.08.02.00206
Schlauch 1	Filter und Verbindungen	VSL 8-6 PE BL	10.07.09.00015
Anschluss 3	Filter und Verbindungen	SVB-WIN-8-6	10.08.02.00542
Verteiler	Filter und Verbindungen	SVB-Y 8-6/6-4	10.09.02.00091
Schlauch 2	Filter und Verbindungen	VSL 6-4 PE BL	10.07.09.00014
Schlauch 3	Filter und Verbindungen	VSL 6-4 PE BL	10.07.09.00014
Schlauch 4	Filter und Verbindungen	VSL 6-4 PE BL	10.07.09.00014
Schlauch 5	Filter und Verbindungen	VSL 6-4 PE BL	10.07.09.00014
Anschluss 4	Filter und Verbindungen	SVS-STV-GE 6 M14x1-AG G1/4-IG	10.08.02.00321
Anschluss 5	Filter und Verbindungen	SVS-STV-GE 6 M14x1-AG G1/4-IG	10.08.02.00321
Anschluss 6	Filter und Verbindungen	SVS-STV-GE 6 M14x1-AG G1/4-IG	10.08.02.00321
Anschluss 7	Filter und Verbindungen	SVS-STV-GE 6 M14x1-AG G1/4-IG	10.08.02.00321
Vakuumsauggreifer 1	Vakuumsauggreifer	SAB-50-NBR-60-G1/4-AG	10.01.06.00804
Vakuumsauggreifer 2	Vakuumsauggreifer	SAB-50-NBR-60-G1/4-AG	10.01.06.00804
Vakuumsauggreifer 3	Vakuumsauggreifer	SAB-60-NBR-60-G1/4-AG	10.01.06.00805
Vakuumsauggreifer 4	Vakuumsauggreifer	SAB-60-NBR-60-G1/4-AG	10.01.06.00805

6.3.2 Ergebnisse

Verglichen werden die Ergebnisse der Experten-Benchmarks mit der Zeit, welche die AutoBMC Methode für die einzelnen Aufgaben der Evaluierungsfälle benötigt. Die Erfassung der von der AutoBMC Methode benötigten Zeiten erfolgt durch die integrierte Zeiterfassung in „MATLAB“ direkt im Code des Assistenzsystems. Um etwaige Einflüsse anderer Prozesse auszuschließen, werden während der Erfassung der Zeiten alle anderen Programme auf dem PC („Intel Xeon W-2123 Prozessor“, 32 Gigabyte RAM und „Nvidia Quadro P2000“ GPU) geschlossen. Zudem wird der Prozess zur Erfassung der Zeiten für jeden der Evaluierungsfälle zehnmal wiederholt.

Am Beispiel des Evaluierungsfalles 1a sind die Ergebnisse der Experten (links) sowie der AutoBMC Methode (rechts) in Abbildung 78 dargestellt. Um für die Auswertung der weiteren Evaluierungsfälle die Übersichtlichkeit zu erhöhen, soll aus den zehn Einzelwerten der Experten und der AutoBMC Methode ein Mittelwert gebildet und die Spannweite der zehn Einzelwerte angegeben werden. Dies ist durch die Balken ganz rechts in den zwei Diagrammen in Abbildung 78 dargestellt.

Aus den Zeiten der Experten und der AutoBMC Methode am Beispiel von Evaluierungsfall 1a wird zum einen sichtbar, dass unterschiedliche Experten für die reine Erstellung sowie für das zusätzliche Hinzufügen der Peripherie sehr unterschiedliche Zeiten benötigen. Der Experte mit der längsten benötigten Zeit liegt um ungefähr 75% über der Zeit des Experten mit der geringsten benötigten Zeit. Für die reine Erstellung des Verhaltensmodells sind es rund 102%. Demgegenüber stehen die Zeiten der AutoBMC Methode, die sehr reproduzierbare Zeiten für die reine Erstellung der Modelle sowie das zusätzliche Hinzufügen der Peripherie benötigt. Die längste benötigte Zeit der Methode liegt rund

6% über der kürzesten Zeit für die reine Erstellung des Verhaltensmodells. Für die Erstellung inklusive Peripherie liegt die längste Zeit der Methode ca. 5% über der kürzesten Zeit für die AutoBMC Methode.

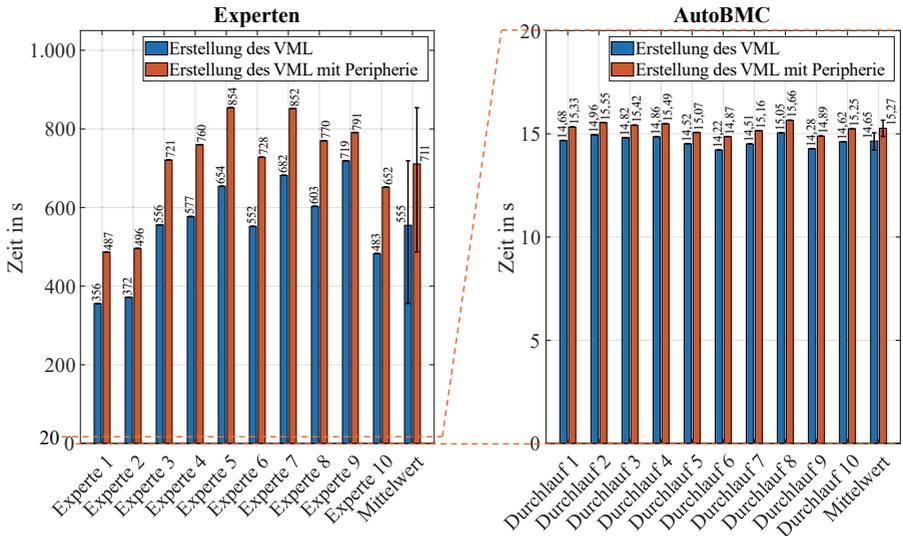


Abbildung 78: Detaillierter Vergleich der Zeiten von Experten und AutoBMC Methode für Evaluierungsfall 1a

Neben der großen Streubreite der durch die Experten benötigten Zeiten liegen diese deutlich über denen der AutoBMC Methode. Dies wird deutlich, wenn beide Mittelwerte miteinander verglichen werden. Die Experten benötigen im Vergleich zur AutoBMC-Methode für den Evaluierungsfall 1a etwa einen Faktor 38 mehr für die reine Erstellung und etwa einen Faktor 47 mehr für die Erstellung inklusive Peripherie. Darüber hinaus stellt das Hinzufügen der Peripherie bei den Experten verglichen mit der AutoBMC Methode, einen erheblich höheren Anteil an der benötigten Gesamtzeit dar. Bei den Experten benötigt das Hinzufügen der Peripherie im Mittel rund 22% der Gesamtzeit, während es bei der AutoBMC Methode nur rund 4% der Gesamtzeit ausmacht.

Für weiterführende Ergebnisse sollen die Mittelwerte und Spannweiten angegeben werden. Für den Vergleich zwischen Evaluierungsfall 1a, 1b und 1c sind diese Informationen in Abbildung 79 dargestellt. In dieser Abbildung sind sowohl die Zeiten für die reine Erstellung, die Zeiten für die Erstellung inklusive Peripherie der AutoBMC Methode, als auch der Experten für die drei genannten Evaluierungsfälle aufgetragen.

Die dargestellten Informationen bestätigen die Erkenntnisse aus Evaluierungsfall 1a. Zum einen gibt es in den Evaluierungsfällen 1b und 1c eine starke Streuung zwischen den Zeiten der einzelnen Experten. Dies gilt sowohl für die reine Erstellung als auch für die Erstellung inklusive Peripherie. Dem gegenüber steht die AutoBMC Methode, welche sehr reproduzierbare Zeiten liefert. Dies gilt für alle drei Evaluierungsfälle. Zum anderen kann bei den Evaluierungsfällen 1b und 1c die signifikant höhere Zeit für die Erstellung durch die Experten festgestellt werden. Diese liegt um rund den Faktor 49 bzw. 54 (1b) und um rund den Faktor 42 bzw. 51 (1c) höher als die Auto BMC Methode für die reine Erstellung sowie für die Erstellung inklusive Peripherie benötigt. Der Faktor zwischen den Zeiten der Experten und der AutoBMC Methode nimmt mit größerer Anzahl an Bausteinen im Modell tendenziell zu.

6.3 Experten-Benchmark

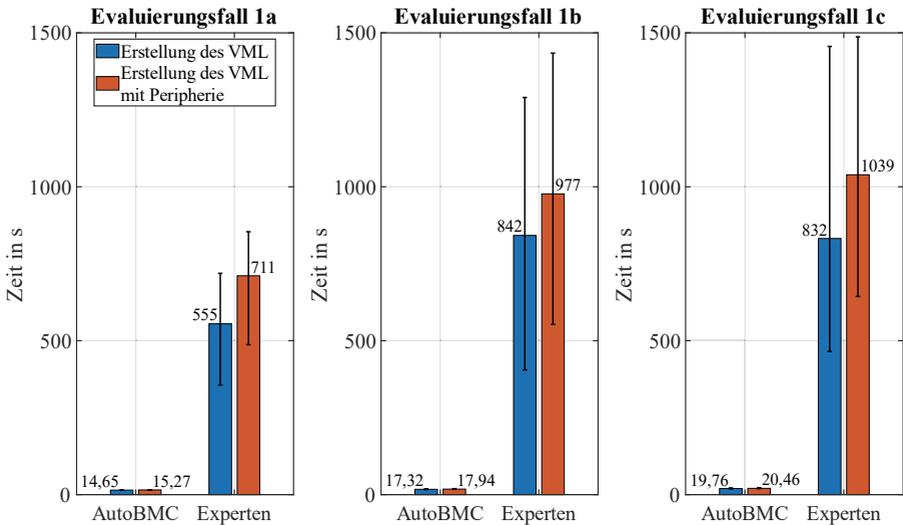


Abbildung 79: Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung der Modelle der Evaluierungsfälle 1a (links), 1b (mittig) und 1c (rechts)

Die Erkenntnis aus Evaluierungsfall 1a bezüglich des Anteils, der für das Hinzufügen der Peripherie benötigt wird, kann bei den Evaluierungsfällen 1b und 1c bestätigt werden. Dort benötigten die Experten ebenfalls einen signifikanten Anteil (rund 16% für Evaluierungsfall 1b und rund 25% für Evaluierungsfall 1c) der Gesamtzeit, um die Peripherie im Modell hinzuzufügen.

Bei der Betrachtung der Zeiten für die Erstellung der Modelle für die drei Evaluierungsfälle durch die AutoBMC Methode, lässt sich ein Anstieg der Zeiten bei einer zunehmenden Anzahl an Bausteinen im Modell feststellen. Dies gilt sowohl für die reine Erstellung als auch die Erstellung des Modells inklusive Peripherie. Dieser Anstieg ist für die drei Evaluierungsfälle stark linear. Dies kann durch das Bestimmtheitsmaß in Tabelle 25 bestätigt werden.

Tabelle 25: Lineares Modell und Bestimmtheitsmaß für die benötigte Zeit zur Erstellung der Verhaltensmodelle der Evaluierungsfälle 1a, 1b und 1c mit der AutoBMC Methode

	Erstellung Verhaltensmodell	Erstellung Verhaltensmodell mit Peripherie
Lineares Modell	$Y = 0,30051 * X + 9,2298$	$Y = 0,30512 * X + 9,7536$
Bestimmtheitsmaß	0,9999	0,9997

Ein anderes Bild stellt sich für die Erstellung durch die Experten dar. Hier lässt sich prinzipiell ein Zuwachs in der benötigten Zeit bei zunehmender Anzahl an Bausteinen feststellen. Die Anzahl der Bausteine steht jedoch in keinem linearen Zusammenhang zu der benötigten Zeit. Hierfür gibt es vielseitige Gründe. Zum einen lag die Quote der Fehler für Evaluierungsfall 1a bei durchschnittlich 1,6 und bei Evaluierungsfall 1c bei 1,3. Zum anderen sind sich die zu erstellenden Vakuum-Greifsysteme durch die Ableitung aus einem übergeordneten Evaluierungsfall sehr ähnlich. Dies führt dazu, dass ein gewisser Lerneffekt einsetzt. Dieser geht über die geringere Fehlerquote hinaus und sorgt allgemein dafür, dass die Experten die Verhaltensmodelle schneller aufbauen. Dies trifft vor allem auf die Evaluierungsfälle 1b und 1c zu, die bis auf die Ventile und dafür benötigten Anschlüsse identisch sind. Trotz der beschriebenen Effekte nimmt die benötigte Zeit für die Erstellung der

Verhaltensmodelle durch die Experten mit steigender Anzahl an Bausteinen zu. Dies gilt für die reine Erstellung sowie für die Erstellung des Verhaltensmodells inklusive Peripherie.

Wichtig für die Anwendung von Verhaltensmodellen ist nicht nur die Erstellung und Ausführung, sondern auch die Untersuchung unterschiedlicher Parameter im Verhaltensmodell. Ein gängiges Beispiel hierfür ist die Untersuchung unterschiedlicher Schlauchlängen oder Schlauchdurchmesser in Vakuum-Greifsystemen und deren Einfluss auf relevante KPIs, wie die Evakuierungszeit oder den Energieverbrauch. Die benötigte Zeit für eine solche Anpassung von Parametern in einem Verhaltensmodell wird mithilfe von Evaluierungsfall 1d und 1e untersucht. Hierfür wird das in Evaluierungsfall 1a erstellte Verhaltensmodell mit unterschiedlichen Parametersätzen angepasst. Für Evaluierungsfall 1d werden insgesamt vier Parameter angepasst, für Evaluierungsfall 1e insgesamt sechzehn Parameter. Die dafür benötigten Zeiten der AutoBMC Methode und der Experten sind in Abbildung 80 dargestellt.

Darin ist gut zu erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an anzupassenden Parametern die dafür benötigte Zeit ansteigt. Dies gilt sowohl für die AutoBMC Methode als auch für die Zeit, welche von den Experten benötigt wird. Dabei liegt die benötigte Zeit für die Experten um ca. den Faktor 34 über der AutoBMC Methode für Evaluierungsfall 1d. Für Evaluierungsfall 1e beträgt der Faktor ca. 62. Die AutoBMC Methode ist für die reine Anpassung von Parametern signifikant schneller als die Experten im Experten-Benchmark. Dabei ist nicht nur der absolute Wert interessant, sondern auch die Tendenz. Mit einer steigenden Anzahl an Parametern benötigen die Experten zunehmend mehr Zeit für die Anpassung der Parameter als die AutoBMC Methode.

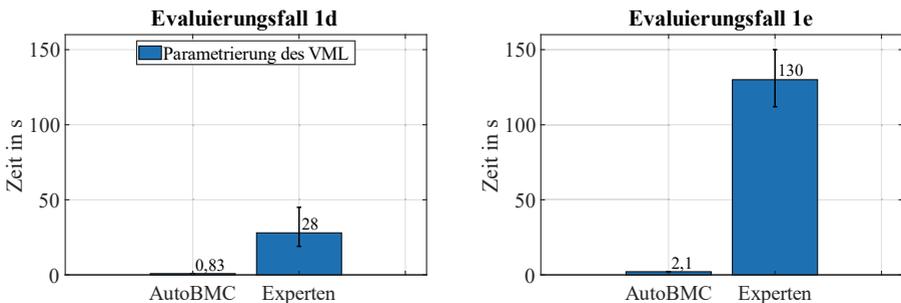


Abbildung 80: Zeiten von AutoBMC Methode und Experten für die Anpassung von vier (links) und 16 (rechts) Parametern

Nach der Erstellung und Parametrierung von Verhaltensmodellen wird in den nächsten zwei Evaluierungsfällen die Erstellung von Verhaltensmodellen mit und ohne Verhaltensmodellbibliothek betrachtet. Dies ist vor allem für den manuellen Zugriff auf die Verhaltensmodellbibliothek interessant. Diese Option ist im Konzept eingefügt, da es neben den vollautomatisiert erstellten Verhaltensmodellen oft Anforderungen gibt, die sehr variabel gestaltet sind und daher einen manuellen Eingriff erfordern. Hierfür kann der Experte auf die assistiert erstellte Verhaltensmodellbibliothek zugreifen, um damit aufwandsarm Verhaltensmodelle von Systemen zusammenzustellen. Der Vorteil durch diese Verhaltensmodellbibliothek wird im nachfolgenden Evaluierungsfall veranschaulicht. In Evaluierungsfall 1f wird ein einfaches Systemmodell mithilfe der Verhaltensmodellbibliothek erstellt. Dies kann sowohl von den Experten als auch von der AutoBMC Methode ausgeführt werden. In Evaluierungsfall 1g wird das identische Systemmodell, ohne die Verhaltensmodellbibliothek zu verwenden, aufgebaut. Dadurch steigt die Anzahl der Bausteine von fünf auf 18 an. Dabei kann der Evaluierungsfall 1g nicht durch die AutoBMC Methode ausgeführt

6.3 Experten-Benchmark

werden, da diese nur Systemmodelle aus der Verhaltensmodellbibliothek aufbauen kann. Die für die Evaluierungsfälle 1f und 1g benötigten Zeiten sind in Abbildung 81 dargestellt.

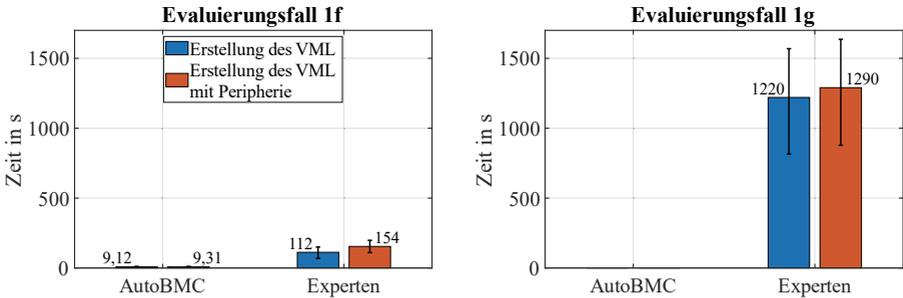


Abbildung 81: Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung eines Systemmodells mit (links) und ohne (rechts) Verhaltensmodellbibliothek

Für Evaluierungsfall 1f kann die bereits festgestellte signifikant höhere Zeit, welche die Experten zur Erstellung eines Systemmodells benötigen, verglichen mit der AutoBMC Methode, bestätigt werden. Für die reine Erstellung benötigen die Experten rund 12-mal und für die Erstellung inklusive Peripherie rund 17-mal länger. Vergleicht man die Zeiten für die Erstellung des Systemmodells mit Hilfe der Verhaltensmodellbibliothek mit denen für die Erstellung ohne Verhaltensmodellbibliothek, so zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Zeiten für die Erstellung ohne Verhaltensmodellbibliothek. Die für die reine Erstellung benötigte Zeit liegt ca. um Faktor 11 über der Zeit mit Verhaltensmodellbibliothek. Die Zeit für eine Erstellung inklusive Peripherie liegt ca. um Faktor 8 darüber. Dabei geht die Erhöhung der benötigten Zeit nicht nur auf die gestiegene Anzahl an Bausteinen zurück (von fünf auf 18), sondern hängt auch mit der gestiegenen Anzahl an Parametern (von eins auf dreißig) und der höheren Komplexität des Aufbaus zusammen. Die höhere Komplexität kommt vor allem aus der aufwändigeren Parametrierung der Bausteine, da die einzelnen Parameter in unterschiedlichen Abschnitten der Bausteinmasken eingetragen werden müssen. Zudem ist die Verknüpfung zwischen den Bausteinen, unter anderem durch die höhere Anzahl an Bausteinen, deutlich komplexer. Die steigende Anzahl an Bausteinen, Parametern und Komplexität tritt ohne die Verwendung von Bibliotheken häufiger auf. Experten können also durch die Verwendung einer Bibliothek Verhaltensmodelle signifikant schneller erstellen und Peripherie hinzufügen.

Neben den Versuchen aus Evaluierungsfall 1, werden von den Experten auch Verhaltensmodelle in Evaluierungsfall 2 erstellt. Die Zeiten werden ebenfalls mit der AutoBMC Methode verglichen. Links in Abbildung 82 sind die Zeiten für die Erstellung des Evaluierungsfalls 2a dargestellt, welche die bereits festgestellten Zusammenhänge bestätigen. Hier ist die AutoBMC Methode sowohl bei der reinen Erstellung als auch für die Erstellung inklusive Peripherie signifikant schneller als die Experten. Hierbei ergeben sich Faktoren von rund 42,5 für die reine Erstellung und rund 35,2 für die Erstellung inklusive Peripherie zwischen den Zeiten der AutoBMC Methode und denen der Experten. Ein ähnliches Bild zeigt sich für Evaluierungsfall 2b. Hier wird ein abstrahiertes Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 für ein vereinfachtes System erstellt. Die AutoBMC Methode erstellt hierzu zuerst ein Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 4. Im nächsten Schritt wird daraus ein abstrahiertes Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 abgeleitet. Die Experten können direkt ein abstrahiertes Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 erstellen. Aus diesem Grund ist hauptsächlich die Zeit für die Erstellung des Verhaltensmodells der Modellierungstiefe 1 vergleichbar. Bei Betrachtung der reinen Zahlen hat die AutoBMC Methode einen signifikanten Vorteil von ca. Faktor 2,4 gegenüber den Experten. Dabei ist die im Diagramm angegebene Zeit, welche die Experten zur Erstellung benötigen, nicht die Zeit, nach der die Experten das korrekte

Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1 erstellt haben. Vielmehr haben neun von zehn Experten den Versuch abgebrochen oder der Versuch wurde durch das Zeitlimit abgebrochen. Die tatsächlich benötigte Zeit durch die Experten liegt vermutlich deutlich höher als die dargestellten mittleren 1740 s. Dabei hat der eine Experte, der das Verhaltensmodell im Zeitlimit erstellt hat, den modularen Aufbau des Versuchs genutzt. Da es sich um zwei gleiche Achsen handelt, kann die Aufgabe auf drei Eingangssignale, zwei Zustände und zwei Ausgangssignale vereinfacht werden. Eine solche Vereinfachung durch die Modularisierung ist jedoch nicht für jedes System möglich.

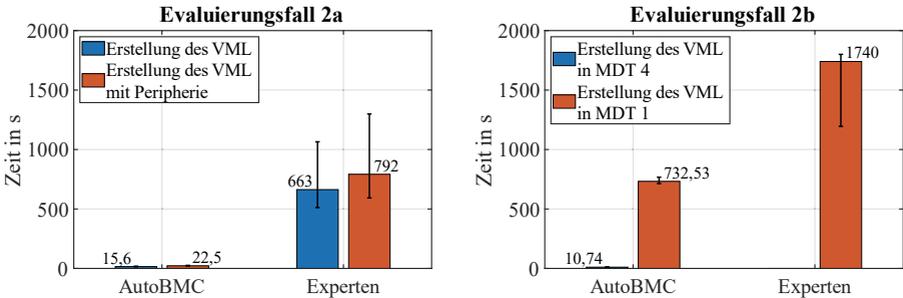


Abbildung 82: Zeiten von AutoBMC und Experten für die Erstellung der Evaluierungsfälle 2a (links) und 2b (rechts)

Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass den Experten für die Erstellung des abstrahierten Verhaltensmodells ein vorbereitetes Modell mit allen möglichen Zuständen des Systems vorgelegt wurde. Die Experten mussten in der Zeit lediglich die Übergänge hinzufügen. Zudem wurde den Experten vor Beginn der Zeitnahme beispielhaft gezeigt, wie die Übergänge hinzugefügt werden können. Diese vereinfachenden Maßnahmen für die Experten wurden gewählt, da Vorversuche gezeigt haben, dass die Experten ohne die vorbereiteten Zustände und die erklärende Hilfe zu Beginn, die Aufgabe nicht ausführen können. Neben den vielen Hilfen, welche die Experten für die Aufgabe benötigten, war der Erstellungsprozess sehr fehleranfällig. Bis die Zeit abgelaufen ist, meldeten die Experten im Schnitt 1,7-mal, dass der Erstellungsprozess korrekt abgeschlossen sei. Die AutoBMC-Methode hingegen liefert in kürzester Zeit das fehlerfrei abstrahierte Verhaltensmodell.

Schlussfolgernd zum Experten-Benchmark und der damit erzielten Zeiten mit der AutoBMC Methode in Kapitel 6.3 lässt sich zusammenfassen:

- Zwischen den benötigten Zeiten der unterschiedlichen Experten für die reine Erstellung sowie für das zusätzliche Hinzufügen der Peripherie lässt sich eine starke Streuung feststellen.
- Die AutoBMC Methode liefert sehr reproduzierbare Zeiten für die reine Erstellung der Verhaltensmodelle und das zusätzliche Hinzufügen der Peripherie.
- Die Zeiten für die Erstellung des Verhaltensmodells eines realen Systems sowie für das zusätzliche Hinzufügen der Peripherie durch die Experten sind signifikant größer als mit der AutoBMC Methode. Zwischen Experten und AutoBMC Methode ergeben sich Faktoren zwischen 38 und 54 bei absoluten Zeitunterschieden von bis zu 1.009 s.
- Experten benötigen erhebliche Zeit für das Hinzufügen der Peripherie. Typischerweise liegt dieser Anteil zwischen 15% und 25%. Im Gegensatz dazu beträgt der Anteil für die Erstellung der Peripherie für die AutoBMC-Methode in den untersuchten Evaluierungsfällen höchstens 6% der Gesamtzeit.

- Experten benötigen für die Anpassung von Verhaltensmodellen ähnlich wie bei der Erstellung signifikant mehr Zeit als die AutoBMC Methode. Der Zeitbedarf der Experten ist um mindestens den Faktor 34 höher als bei der AutoBMC Methode. Dieser Faktor steigt mit der Anzahl der anzupassenden Parameter. Die beobachteten Zeitunterschiede betragen bis zu 128 s.
- Die Verwendung der Verhaltensmodellbibliothek bietet auch Vorteile bei der manuellen Erstellung von Verhaltensmodellen. Ohne die Verwendung der Bibliothek dauert die Erstellung eines beispielhaften Verhaltensmodells mindestens 8-mal länger. Das entspricht einem Zeitaufwand von 1.136 s.
- Auch die Erstellung von Verhaltensmodellen mit geringerer Modellierungstiefe ist mit der AutoBMC-Methode im Vergleich zu Experten effizienter möglich. Während nur ein Experte das geforderte Verhaltensmodell erstellen konnte, lag die mittlere Zeit der Experten um den Faktor 2,4 höher als bei der AutoBMC Methode.

Abschließend ist anzumerken, dass die vorgestellten Ergebnisse mit einer begrenzten Anzahl von Experten und Anwendungsfällen erzielt worden sind und zudem einen erheblichen Vorbereitungsaufwand erfordern. Der Vorbereitungsaufwand für die AutoBMC-Methode ist dabei deutlich höher als bei der manuellen Erstellung. Zudem ist der Anwendungsbereich der AutoBMC-Methode naturgemäß begrenzt und kann nur genutzt werden, wenn entsprechende Basisinformationen vorliegen. Bei der Erstellung von Verhaltensmodellen, bei denen Ausgangsinformationen vorhanden sind, können mit der AutoBMC-Methode die oben genannten Geschwindigkeitsvorteile erreicht und eine deutliche Zeit- und Kostenreduktion sowie Entlastung der Simulationsexperten realisiert werden.

6.4 Abgleich mit Anforderungen und Zielsetzungen der Arbeit

Zum Abschluss der Evaluierung wird eine gesamtheitliche Bewertung der erzielten Ergebnisse vorgenommen. Grundlage hierfür bieten die in Kapitel 1.4 aufgestellten Anforderungen dieser Arbeit. Für den Abgleich werden die Ergebnisse herangezogen, die mithilfe der realisierten Artefakte aus den drei DSR-Iterationen erzielt werden konnten. Durch den Abgleich kann nachgewiesen werden, dass das Konzept die zur Schließung der Forschungslücke notwendigen Eigenschaften aufweist.

(A1) Konsistenz in Modellen und Formaten über das gesamte Produktportfolio hinweg

Die AutoBMC Methode ermöglicht die aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen für die Verwendung im Digitalen Zwilling in prozessrelevanter Modellierungstiefe. Dabei konnte in den zwei Evaluierungsfällen gezeigt werden, dass sowohl rein mechanische, als auch komplexere mechatronische Komponenten zu einem System zusammengestellt werden können. Die betrachteten Vakuum-Greifsysteme stellen ein beispielhaftes Produktportfolio dar, welches durch die unterschiedlichen Komponenten gut als Beispiel für ein typisches mechatronisches Produktportfolio eines Komponentenherstellers herangezogen werden kann. Mit dem vorgestellten Konzept können dementsprechend konsistente Modelle und Formate über ein gesamtes Produktportfolio hinweg erstellt, eingesetzt und zu einem System kombiniert werden.

(A2) Hinreichend genaue Verhaltensmodellierung von Komponenten und Systemen in entsprechender Modellierungstiefe und unter Berücksichtigung zur Verfügung stehender Rechenzeit und Ressourcen

Die mit der AutoBMC Methode erstellten Verhaltensmodelle zeigen sehr gute Übereinstimmung mit dem jeweiligen realen Verhalten der Assets, sowohl als Komponente, wie auch als komplex zusammengestelltes Gesamtsystem. Dies konnte in den zwei detailliert untersuchten

Evaluierungsfällen eindrücklich nachgewiesen werden. Darüber hinaus liefern die abstrahierten Verhaltensmodelle geringerer Modellierungstiefen sehr gute Übereinstimmungen mit den Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4 und damit mit dem realen Verhalten. Vorteil dieser abstrahierten Verhaltensmodelle ist eine signifikante Reduktion der Aufwände bezüglich der Simulationszeit und dem Rechenbedarf. Darüber hinaus ist der Speicherbedarf für solche abstrahierten Verhaltensmodelle, wie in den Evaluierungsfällen gezeigt, signifikant geringer. Es kann abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen ein hinreichend genaues Verhaltensmodell von Komponenten oder Systemen mit der AutoBMC Methode erstellt werden.

(A3) Vollumfänglich aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen mithilfe automatisierter oder assistierter Methoden

Die Erstellung von Verhaltensmodellen erfolgt vollständig automatisiert mit der AutoBMC Methode. Damit können Verhaltensmodelle von Komponenten oder Systemen erstellt werden. Die nachgewiesene Zeit, die ein Experte im Schnitt länger benötigt, um ein Verhaltensmodell eines realen, typischen Vakuum-Greifsystems inklusive Peripherie zu erstellen, liegt bei mindestens Faktor 38. Die gemessene absolute Zeit, welche die Experten im Schnitt länger benötigten liegt bei bis zu 1.009 s. Auch bei der Anpassung von Parametern können signifikante Reduktionen der Zeiten erzielt werden. Die Experten benötigten mindestens Faktor 34, oder bis zu 128 s länger als die AutoBMC Methode. Darüber hinaus vernachlässigt ein solcher Vergleich, dass die AutoBMC Methode einen Experten vollständig entlastet und somit für ihn der zeitliche Aufwand nahezu auf null verringert werden kann.

Wichtig für die AutoBMC Methode ist das Vorhandensein einer Verhaltensmodellbibliothek. Muss eine solche vollständig manuell erstellt werden, ist der Aufwand den soeben angesprochenen Ersparnissen gegenüberzustellen. Die vorgestellte aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek reduziert die manuellen Aufwände, je nach Qualität der vorhandenen Primärinformationen der Komponenten, dafür auf ein Minimum.

Bei den erarbeiteten Methoden kann von einer vollumfänglich aufwandsarmen Erstellung von Verhaltensmodellen gesprochen werden, welche die Kette der Erstellung bis auf die physikalischen Grundprinzipien beleuchtet. Darüber hinaus können die aufwandsarm erstellten Verhaltensmodelle in der Verhaltensmodellbibliothek für individuelle und spezifische Aufgaben durch eine manuelle Schnittstelle genutzt werden, was zusätzliche Mehrwerte schafft. In einem beispielhaften System konnte durch die Verwendung dieser Verhaltensmodellbibliothek die Zeit, die ein Experte für die Erstellung eines Systemmodells benötigt hat, um Faktor 8 reduziert werden. Dieser Faktor entspricht einer absoluten Zeitdifferenz von 1.136 s.

Auch bei der Erstellung von abstrahierten Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 1 bis 3 liefert die AutoBMC Methode signifikante Mehrwerte. Obwohl die Experten im zweiten betrachteten Evaluierungsfall Vorarbeit und Erklärung erhielten, benötigten diese im Schnitt mehr als doppelt so lange wie die AutoBMC Methode. Neun von zehn Experten konnte die Aufgabe in der vorgegebenen Zeit gar nicht lösen. Dabei erstellten diese ein Verhaltensmodell der Modellierungstiefe 1, während die AutoBMC Methode Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1 bis 3 im gleichen Zeitraum bereitstellte. Die Mehrwerte, bezogen auf Zeitersparnis und Nutzbarkeit, sind signifikant. Darüber hinaus sind die mit der AutoBMC Methode erstellten Verhaltensmodelle deutlich weniger fehleranfällig.

(A4) Modellbildung von hinreichend genauen Verhaltensmodellen für relevante Vakuumkomponenten

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die bisher nicht öffentlich zugänglichen Verhaltensmodelle relevanter Komponenten von Vakuum-Greifsystemen entwickelt werden. Zum einen konnte ein Grundbaustein für Vakuumerzeuger entwickelt werden, der sowohl für pneumatische

Vakuumerzeuger als auch für elektrische Vakuumerzeuger sehr gute Übereinstimmung mit dem realen Verhalten der jeweiligen Komponente liefert. Die maximale zeitliche Abweichung bei den betrachteten sieben Komponenten liegt bei 178 ms in Bezug auf einen Evakuierungsprozess, der bis zu 8 s lang dauert. Zum anderen konnte ein Grundbaustein für Vakuumsauggreifer entwickelt werden, der für unterschiedlichste Bauformen und Typen eingesetzt werden kann. Der Abgleich des damit erzielten Verhaltens mit den realen Messdaten zeigt, dass die maximale Abweichung bei einem Evakuierungsprozess von bis zu 3 s für die untersuchten elf unterschiedlichen Vakuumsauggreifer stets unter 30 ms und für einen Großteil der betrachteten Vakuumsauggreifer sogar unter 10 ms liegt. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Verhaltensmodelle ermöglichen eine präzise Abbildung des Verhaltens von relevanten Komponenten aus Vakuum-Greifsystemen, für die bisher noch keine hinreichend genauen Verhaltensmodelle öffentlich zugänglich waren.

6.5 Fazit und abschließende Diskussion

Zusammenfassend erfüllt das entwickelte und prototypisch umgesetzte Konzept alle vier Anforderungen. Die Anwendung des Systems in verschiedenen Evaluierungsfällen hat gezeigt, dass es für typische industrielle Aufgaben geeignet ist und dabei sehr gute Ergebnisse liefert. Die Bereitstellung finaler Verhaltensmodelle von Komponenten und Systemen erfolgt aufwandsarm. Dadurch werden Simulationsexperten entlastet und auch Personen ohne Simulationserfahrung können solche Technologien zielführend einsetzen. Die automatisierte Erstellung der Verhaltensmodelle aus der Verhaltensmodellbibliothek funktioniert stabil und vollständig automatisiert. Die vorgestellte Methode eignet sich sowohl für spezifische digitale Produktkonfiguratoren sowie für generische Plattformen im Bereich des umfangreichen digitalen Engineerings. Dabei kann die Methode zur automatisierten Erstellung von Verhaltensmodellen zukünftig beispielsweise mit einer mechanischen Systemauslegung gekoppelt werden, welche die notwendigen Informationen für die Graphen bereitstellt. Dies ermöglicht eine vollumfänglich digitale Auslegung eines Vakuum-Greifsystems auf Basis minimaler Eingangsinformationen des Handhabungsobjekts, wie beispielsweise einem Bild oder einem CAD-Modell.

Auch das zweite in dieser Arbeit entwickelte Artefakt, die Methode zur automatisierten Abstraktion der Modellierungstiefe ausgehend von Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4, funktioniert sehr stabil. Insbesondere bei kleineren Verhaltensmodellen können die abstrahierten Verhaltensmodelle sehr effizient und problemfrei erstellt werden. Sobald die Verhaltensmodelle jedoch größer werden (dreißig Bausteine oder mehr), kann der Prozess schnell einige Stunden oder Tage dauern. Die benötigte Dauer hängt stark davon ab, wie viele Eingänge und Ausgänge im abstrahierten Verhaltensmodell berücksichtigt werden sollen. Die Wahl der Wertebereiche für die Eingangssignale beeinflusst die Abstraktionsdauer ebenfalls stark. Wenn ein Experte die genannten Informationen optimal wählt, können extreme Zeitersparnisse von bis zu 90% oder mehr erzielt werden. Die Abhängigkeit der Methode von den Eingaben eines Experten schränkt deren Verbreitung jedoch ein.

Die Situation für das dritte Artefakt, die assistierte Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek aus Grundbausteinen, stellt sich anders dar. Diese Methode ist auf mehr Nutzereingaben angewiesen und weniger stabil aufgrund der großen Varianz an Parametern und der heterogenen Landschaft an Eingangsinformationen. Wenn die Eingangsinformationen jedoch qualitativ hochwertig und vollständig sind, funktioniert die Methode gut. Je schlechter die Eingangsinformationen sind, desto mehr Input wird durch einen Simulationsexperten benötigt. Grundsätzlich ist jedoch eine abschließende Kontrolle aller erstellten Verhaltensmodelle für die Verhaltensmodellbibliothek durch einen Simulationsexperten notwendig, da die Qualität der Eingangsinformationen aktuell nicht immer sicher gewährleistet werden kann.

Darüber hinaus ermöglichen die in dieser Arbeit entwickelten domänenspezifischen Grundbausteine eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, wie in den umfangreichen Evaluierungsversuchen gezeigt werden konnte. Herausfordernd bei den domänenspezifischen

Grundbausteinen ist jedoch die stark ansteigende Simulationsdauer mit zunehmender Anzahl an Komplexität. Dies gilt vor allem für die Vakuumsauggreifer, da diese aufwändig in der Ausführung sind. Darüber hinaus ist die aufwändige Parametrierung beider Bausteine problematisch. Nur bei korrekter Parametrierung der Bausteine können korrekte Ergebnisse in einer angemessenen Simulationszeit erreicht werden. Dabei kann ein einzelner Baustein über zwanzig Parameter und Kennfelder umfassen. Dies führt dazu, dass die entwickelten Grundbausteine nur durch die vorherige Vorbereitung mithilfe der Methode zur assistierten Erstellung der Verhaltensmodellbibliothek ohne größere Aufwände lauffähig sind. Eine direkte Nutzung der Grundbausteine ist ohne Weiteres nur für Simulationsexperten mit Domänenwissen möglich. Ebenso einschränkend für die Verbreitung der parametrisierten Verhaltensmodelle von Vakuumsauggreifern und Vakuumerzeugern ist das darin enthaltene Wissen des Komponentenherstellers. Aus den genannten Gründen eignen sich daher vor allem fertig parametrisierte Verhaltensmodelle der Modellierungstiefen 1 bis 3 für die einfache Bereitstellung durch den Komponentenhersteller.

7 Schlussbetrachtung

Nachfolgend wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten gegeben.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Digitale Zwilling ermöglicht signifikante Mehrwerte in diversen Anwendungsfällen im Rahmen zunehmender Automatisierung und Digitalisierung. Dies gilt unter anderem für den Einsatz bei Komponentenerstellern. Dabei sind qualitativ hochwertige Verhaltensmodelle einer der zentralen Bestandteile von Digitalen Zwillingen für Komponentenersteller. Diese existieren häufig nicht in prozessrelevanter Modellierungstiefe, weshalb die Verwendung und Bereitstellung von Verhaltensmodellen als Teil des Digitalen Zwillings mit großen Aufwänden verbunden ist. Da die Bereitstellung von Verhaltensmodellen als Teil Digitaler Zwillinge jedoch immer wichtiger wird und zukünftig bei nicht Vorhandensein ein Ausschlusskriterium für einen Kauf des zugehörigen Produkts sein kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept für die aufwandsarme Erstellung von Verhaltensmodellen in prozessrelevanter Modellierungstiefe konzipiert und realisiert.

Ein zentraler Aspekt des Konzepts ist eine Bibliothek mit Verhaltensmodellen der Modellierungstiefe 4. Diese Verhaltensmodellbibliothek ermöglicht die vollautomatisierte und schnelle Erstellung von Verhaltensmodellen für Komponenten und Systeme mit einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode, die als AutoBMC bezeichnet wird. Vergleicht man das simulierte Verhalten der erstellten Verhaltensmodelle mit dem gemessenen Verhalten der entsprechenden Komponenten und Systeme, liefern die mit der AutoBMC Methode erstellten Verhaltensmodelle sehr gute Ergebnisse. Darüber hinaus spart die AutoBMC Methode signifikant Zeitaufwände ein. Beim Vergleich der Zeiten für die manuelle Erstellung von Verhaltensmodellen durch Experten mit den Zeiten, welche die AutoBMC Methode benötigt, liegen die der Experten für die betrachteten Systeme in dieser Arbeit um mindestens einen Faktor von 38 darüber. Neben der reinen Erstellung von Verhaltensmodellen ermöglicht die AutoBMC Methode auch die Durchführung von Parameterstudien zur umfangreichen Optimierung der Greifsysteme. Hierfür ergeben sich signifikante Einsparungen. Der Vergleich der Zeiten zeigt, dass die von den Experten benötigte Zeit mindestens 34-mal länger ist als die der AutoBMC Methode.

Aus der Verhaltensmodellbibliothek können nicht nur vollautomatisiert Verhaltensmodelle erstellt werden. Es ist damit auch möglich Verhaltensmodelle aufwandsarm manuell zu erstellen. Hierfür kann die Bibliothek über die entsprechende Entwicklungsumgebung verwendet werden. Bei der manuellen Erstellung von Verhaltensmodellen aus der Verhaltensmodellbibliothek ergeben sich große zeitliche Einsparungen. Die Zeit, die ein Experte benötigt, um ein Verhaltensmodell eines Systems zu erstellen ohne Verwendung der Verhaltensmodellbibliothek, ist im Schnitt rund 8-mal größer.

Die Verwendung einer Verhaltensmodellbibliothek bietet sowohl für die automatisierte als auch für die manuelle Erstellung signifikante Vorteile. Zwar ist die Erstellung dieser Verhaltensmodellbibliothek mit Arbeitsaufwand verbunden. Dieser ist jedoch, verglichen mit den sich ständig wiederholenden Aufwänden für die automatisierte Erstellung von Verhaltensmodellen, gering. Dennoch stellt dieser Arbeitsaufwand eine erhebliche Hürde für die Verwendung der AutoBMC Methode dar. Ziel ist daher, die Verhaltensmodellbibliothek assistiert und aufwandsarm zu erstellen. Hierfür kann die AutoBMC Methode in angepasster Form wiederverwendet werden. Benötigt wird dafür eine Bibliothek mit Grundbausteinen, aus denen die jeweiligen Komponenten aufgebaut sind und Informationen über den Aufbau der Komponenten aus diesen Grundbausteinen. Diese Informationen werden Primärinformationen genannt. Für eine aufwandsarme Erstellung der Verhaltensmodelle müssen die Primärinformationen über den Aufbau der Komponenten aus den entsprechenden Informationsquellen extrahiert werden. Es gibt Informationsquellen, die diese

Primärinformationen strukturiert zur Verfügung stellen. Für solche Informationsquellen, die eine Bereitstellung nicht anbieten, wurde eine Methode zur Extrahierung dieser Informationen erarbeitet. Bei genannten Informationsquellen handelt es sich hauptsächlich um Schaltpläne. Bei der Extraktion der Informationen werden Symbole, Verbindungen und Anschlussbezeichnungen mithilfe unterschiedlicher Technologien detektiert und verknüpft. Für die untersuchten Fluidschaltpläne funktioniert die entwickelte Methode robust, extrahiert vollautomatisiert einen Großteil der relevanten Informationen korrekt und nur geringe manuelle Nacharbeit wird benötigt. Mit den digitalisierten Informationen kann die angepasste AutoBMC Methode die Verhaltensmodelle der jeweiligen Komponente für die Verhaltensmodellbibliothek automatisiert erstellen.

Werden die Verhaltensmodelle nicht in Modellierungstiefe 4, sondern in einer oder mehreren Modellierungstiefen von 1 bis 3 benötigt, kann die entwickelte Methode zur Abstraktion genutzt werden. Diese Methode wurde auf Basis der Modellierungstiefe 4 konzipiert und im Assistenzsystem implementiert. Die damit erstellten Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1 bis 3 erzielen ein Verhalten, das entsprechend den Einschränkungen der jeweiligen Modellierungstiefe sehr gut mit dem Verhalten der Modellierungstiefe 4 übereinstimmt. Dabei ergeben sich signifikante Einsparung im benötigten Speicherplatz sowie Rechenbedarf. Die ermittelte Zeit für die Ausführung eines Verhaltensmodells der Modellierungstiefe 4 inklusive Kompilierung ist mindestens 8-mal größer als die Zeit für die Ausführung eines Verhaltensmodells der Modellierungstiefe 1 inklusive Kompilierung. Die abstrahierten Verhaltensmodelle bieten entsprechende Vorteile für bestimmte Anwendungsfälle und können ebenfalls aufwandsarm mit der AutoBMC Methode erstellt werden. Für das betrachtete System konnte ein Großteil der Experten das abstrahierte Verhaltensmodell trotz vieler Vereinfachungen und einiger Vorarbeiten nicht erstellen. Im Mittel benötigten die Experten ungefähr 2,4-mal länger als die AutoBMC Methode für die Erstellung der Verhaltensmodelle der Modellierungstiefe 1.

Als Anwendungsdomäne wurde im Rahmen dieser Arbeit die Vakuum-Handhabungstechnik gewählt. Zur Anwendung der vorgestellten Methoden werden Grundbausteine aller relevanten Komponenten dieser Domäne benötigt. Viele Grundbausteine liegen bereits in gängigen Simulationsumgebungen vor. Für Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer gibt es diese Grundbausteine jedoch nicht öffentlich zugänglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Grundbausteine für diese beiden Komponententypen entwickelt, die das Verhalten der Komponenten hinreichend genau abbilden. Hierbei wird für die individuellen Komponenten auf mehrdimensionale und interdisziplinäre Kennlinien zurückgegriffen, die zu einem großen Teil bereits im Unternehmen verwendet werden. Die Grundbausteine für die Verhaltensmodelle liefern eine sehr gute Übereinstimmung mit dem realen Verhalten und ermöglichen eine hochgenaue Simulation aller relevanten Größen für Vakuumerzeuger und Vakuumsauggreifer.

7.2 Ausblick auf weiterführende Forschungsaktivitäten

Im Rahmen dieser Forschungsaktivitäten konnten einige Ansatzpunkte für mögliche weiterführende Untersuchungen ausgemacht werden, die das vorgestellte Konzept um Aspekte erweitern und zu interessanten Ergebnissen führen können.

Zum einen kann dies die Verwendung der Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefen während der Betriebsphase einer Anlage sein. Setzt man Verhaltensmodelle parallel zum realen Betrieb ein, können beispielsweise durch den kontinuierlichen Vergleich der gemessenen mit den simulierten Zuständen akute Fehlerquellen identifiziert oder zukünftige Fehler und Ausfälle prognostiziert werden. Hierfür eignen sich die Modellierungstiefen 1 bis 3, da das Verhalten mit geringer Modellierungstiefe parallel in Echtzeit simuliert werden kann und erst bei Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Verläufen die Verhaltensmodelle höherer Modellierungstiefen für die eindeutige Identifizierung und Lokalisierung zum Einsatz kommen. Dies ermöglicht einen ressourcenschonenden Einsatz bei gleichzeitig optimaler Fehleridentifikation.

Für eine solche Verwendung der Verhaltensmodelle, in der Betriebsphase und häufig über Unternehmensgrenzen hinweg, sind neben den Verhaltensmodellen auch periphere Informationen über die Komponenten und Systeme relevant. Diese Informationen sollten im Idealfall semantisch aufbereitet vorliegen, um eine maschinenlesbare automatisierte Integration zu ermöglichen. Hierfür bietet sich die Verwaltungsschale als Informationsmodell an, da dessen Verbreitung und Akzeptanz in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Durch Kombination des vorgestellten Konzepts mit Ansätzen zur automatisierten Erstellung der Verwaltungsschale rückt eine automatisierte Erstellung von flächendeckend etablierten Digitalen Zwillingen in greifbare Nähe.

Weiterhin können die erstellten Verhaltensmodelle des Komponentenherstellers durch die Ergänzung mit Optimierungsalgorithmen für eine vollautomatisierte und optimierte Systemauslegung verwendet werden. Hierzu gibt es aktuell schon Ansätze, die häufig verschiedene Kombinationen iterativ testen, wodurch die Auslegung vergleichsweise langwierig und ineffizient wird.

Für eine solche interne Verwendung der Verhaltensmodelle wäre eine Erweiterung der in dieser Arbeit entwickelten Grundbausteine interessant, beispielsweise um die Leckage, Haltekraft für unterschiedliche Lastfälle, Temperatureinflüsse oder Einflüsse des Umgebungsdrucks. Dadurch könnten die Ergebnisse noch besser das reale Verhalten abbilden und umfangreiche interne Testfälle virtualisieren.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Jovane, E. Westkämper, and Williams David, *The ManuFuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing*, 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [2] D. T. Pham, F. S. Fogliatto, and G. J. C. Da Silveira, *Mass Customization*. London: Springer London, 2011.
- [3] E. Westkämper and C. Löffler, *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [4] N. Jazdi, "Cyber physical systems in the context of Industry 4.0," in *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, Romania, 52014, pp. 1–4.
- [5] M. Artelt, D. Dittler, G. Hildebrandt, D. Braun, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Dynamic Production Scheduling with Intelligent Products in a Modular Production System," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania, 9122023, pp. 1–4.
- [6] A. J. H. Redelinghuys, A. H. Basson, and K. Kruger, "A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation," *J Intell Manuf*, vol. 31, no. 6, pp. 1383–1402, 2020, doi: 10.1007/s10845-019-01516-6.
- [7] M. Weyrich and C. Ebert, "Reference Architectures for the Internet of Things," *IEEE Softw.*, vol. 33, no. 1, pp. 112–116, 2016, doi: 10.1109/MS.2016.20.
- [8] N. Bradford and S. A. Appel, "GreenTech Made in Germany: Sind die Weichen für Deutschland als GreenTech-Exportnation richtig gestellt?," Studie, Jul. 2022. Accessed: Feb. 28 2024. [Online]. Available: https://www.mhp.com/fileadmin/www.mhp.com/downloads/studien/MHP_Studie_GreenTech_Made_In_Germany_DE.pdf
- [9] E. Negri, L. Fumagalli, and M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939–948, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.
- [10] L. Perri, *30 Emerging Technologies That Will Guide Your Business Decisions*. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/articles/30-emerging-technologies-that-will-guide-your-business-decisions> (accessed: Feb. 28 2024).
- [11] M. Sjarov *et al.*, "The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization," in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, Sep. 2020 - Sep. 2020, pp. 1789–1796.
- [12] M. Weyrich, *Industrielle Automatisierungs- und Informationstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.
- [13] M. Singh, E. Fuenmayor, E. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, "Digital Twin: Origin to Future," *ASI*, vol. 4, no. 2, p. 36, 2021, doi: 10.3390/asi4020036.
- [14] B. Ashtari Talkhestani, *Methodik zur Synchronisierung der Modelle des Digitalen Zwillings automatisierter Systeme*, 1st ed. Düren: Shaker, 2020.
- [15] C. Grasselli, A. Melis, L. Rinieri, D. Berardi, G. Gori, and A. A. Sadi, "An Industrial Network Digital Twin for enhanced security of Cyber-Physical Systems," in *2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Shenzhen, China, 7192022, pp. 1–7.
- [16] T. Muller *et al.*, "Context-enriched modeling using Knowledge Graphs for intelligent Digital Twins of Production Systems," in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany, 962022, pp. 1–8.
- [17] J. Michael, J. Pfeiffer, B. Rumpe, and A. Wortmann, "Integration Challenges for Digital Twin Systems-of-Systems," in *2022 IEEE/ACM 10th International Workshop on Software*

- Engineering for Systems-of-Systems and Software Ecosystems (SESoS)*, 2022, pp. 9–12. [Online]. Available: <https://doi.ieeeecomputersociety.org/>
- [18] I. Errandonea, S. Beltrán, and S. Arrizabalaga, "Digital Twin for maintenance: A literature review," *Computers in Industry*, vol. 123, p. 103316, 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103316.
 - [19] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, "Digital twin for smart manufacturing, A review," *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, p. 100017, 2023, doi: 10.1016/j.smse.2023.100017.
 - [20] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihm, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
 - [21] B. Boss *et al.*, *Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0: An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper*. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (accessed: Apr. 22 2021).
 - [22] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
 - [23] R. Rosen *et al.*, "Die Rolle der Simulation im Kontext des Digitalen Zwillings," *atp*, vol. 63, no. 04, pp. 82–89, 2021, doi: 10.17560/atp.v63i04.2534.
 - [24] J. Wang, X. Niu, R. X. Gao, Z. Huang, and R. Xue, "Digital twin-driven virtual commissioning of machine tool," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 81, p. 102499, 2023, doi: 10.1016/j.rcim.2022.102499.
 - [25] K. Kruger, A. J. H. Redelinghuys, A. H. Basson, and O. Cardin, "Past and Future Perspectives on Digital Twin Research at SOHOMA," in *Studies in Computational Intelligence, Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leitão, O. Cardin, and S. Lamouri, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 81–98.
 - [26] M. Hasan, *Digital Twin Market Report 2023-2027: A 233-page report detailing the market of digital twins*. [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/6-main-digital-twin-applications-and-their-benefits/#blog-sample-request-t>
 - [27] M. Attaran and B. G. Celik, "Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities," *Decision Analytics Journal*, vol. 6, p. 100165, 2023, doi: 10.1016/j.dajour.2023.100165.
 - [28] D. Dittler, P. Lierhammer, D. Braun, T. Müller, N. Jazdi, and M. Weyrich, "A Novel Model Adaption Approach for intelligent Digital Twins of Modular Production Systems," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania, 9122023, pp. 1–8.
 - [29] V. Stegmaier, W. Schaaf, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Efficient Creation of Behavior Models for Digital Twins Exemplified for Vacuum Gripping Systems," in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany, 962022, pp. 1–8.
 - [30] S. Adler, M. Eisenträger, and E. Bayrhammer, "Digitaler Zwilling: Effizient in Engineering und Betrieb," *ZWF*, vol. 115, no. 6, pp. 425–428, 2020, doi: 10.3139/104.112329.
 - [31] S. Boschert and R. Rosen, "Digital Twin—The Simulation Aspect," in *Mechatronic Futures*, P. Hehenberger and D. Bradley, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 59–74.
 - [32] F. Auris, H. Zipper, M. Brandl, S. Süß, and C. Diedrich, "Durchgängige Nutzung von Anlagenmodellen," *atp*, vol. 60, 06-07, pp. 90–91, 2018, doi: 10.17560/atp.v60i06-07.2350.
 - [33] S. Suess, C. Diedrich, and F. Auris, "An approach to automatically assign mechatronic components to an existing or identified classification," in *2018 IEEE 14th International*

- Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Munich, Germany, 82018, pp. 1525–1529.
- [34] S. Thongnuch, "An approach to generating high-fidelity models for the virtual commissioning of specialized production machines and cells using MCAD models," Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2021.
- [35] H. Baumgartl, *Der Mehrwert der Systemsimulation in der Entwicklung mechatronischer Systeme aufgezeigt am Beispiel einer dynamischen EMK-Waage*. Landshut: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Landshut, 2018.
- [36] W. Bauer, S. Schlund, T. Hornung, and S. Schuler, "DIGITALIZATION OF INDUSTRIAL VALUE CHAINS – A REVIEW AND EVALUATION OF EXISTING USE CASES OF INDUSTRY 4.0 IN GERMANY," *Logforum*, vol. 14, no. 3, pp. 331–340, 2018, doi: 10.17270/J.LOG.2018.288.
- [37] *Virtuelle Inbetriebnahme: Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen*, 3693 Blatt 2, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Dec. 2018.
- [38] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decision Support Systems*, vol. 145, p. 113524, 2021, doi: 10.1016/j.dss.2021.113524.
- [39] L. Thames and D. Schaefer, Eds., *Cybersecurity for Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [40] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 223, p. 451, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- [41] A. Bilgic, D. Dirzus, F. Hanisch, G. Kegel, J. Oprzynski, and T. Steckenreiter, Eds., *atp magazin - 11-12 2020*. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2020.
- [42] B. Ashtari Talkhestani and M. Weyrich, "Digital Twin of manufacturing systems: a case study on increasing the efficiency of reconfiguration," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 68, no. 6, pp. 435–444, 2020.
- [43] N. Sahlab, S. Kamm, T. Muller, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Knowledge Graphs as Enhancers of Intelligent Digital Twins," in *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Victoria, BC, Canada, 5102021, pp. 19–24.
- [44] V. Stegmaier, W. Schaaf, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Anwendungsfälle und Ansatz zur Erstellung des Digitalen Zwillings aus Sicht eines Komponentenherstellers," in *Automation 2022*: VDI Verlag, 2022, pp. 5–18.
- [45] M. Bergert and C. Diedrich, "Durchgängige Verhaltensmodellierung von Betriebsmitteln zur Erzeugung Digitaler Simulationsmodelle von Fertigungssystemen," in.
- [46] A. Kufner, *Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen*. Dissertation. Stuttgart, 2012. Accessed: Jan. 27 2021.
- [47] F. Günther, "Beitrag zur Co-Simulation in der Gesamtsystementwicklung des Kraftfahrzeugs," Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, TU München, München, 2017.
- [48] *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen*, 3633 Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Dec. 2014.
- [49] T. Frießen, M. Schneider, J. Gausemeier, and A. Trächtler, "Virtuelle Inbetriebnahme mit wählbarer Modellierungstiefe," *ZWF*, vol. 110, no. 4, pp. 227–232, 2015, doi: 10.3139/104.111316.
- [50] M. Lochbichler, F. Oestersötebier, and A. Trächtler, "Dynamic Behavior Models and Their Modeling Depth in the Design Process of Mechatronic Systems," in *Volume 11: Systems, Design, and Complexity*, Montreal, Quebec, Canada, 2014.
- [51] V. Stegmaier, T. Eberhardt, W. Schaaf, N. Jazdi, and M. Weyrich, "A behavior model for Digital Twins of vacuum suction cups," *Procedia CIRP*, vol. 118, pp. 958–963, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.06.165.

- [52] V. Stegmaier, W. Schaaf, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Simulation Model for Digital Twins of Pneumatic Vacuum Ejectors," *Chem Eng & Technol*, vol. 46, no. 1, pp. 71–79, 2023, doi: 10.1002/ceat.202200358.
- [53] C. Wagner *et al.*, "The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant," in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Limassol, Sep. 2017 - Sep. 2017.
- [54] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, *Statusreport: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/referenzarchitekturmodell-industrie-40-rami40> (accessed: Jan. 10 2023).
- [55] M. Henkenjohann, R. Joppen, D. Köchling, S. von Enzberg, A. Kühn, and R. Dumitrescu, "Identification and specification of standard modules in production for a material flow simulation," *Procedia CIRP*, vol. 99, 1-2, pp. 21–26, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.004.
- [56] S. Thongnuch, A. Fay, and R. Drath, "Semi-automatic generation of a virtual representation of a production cell," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 66, no. 5, pp. 372–384, 2018, doi: 10.1515/auto-2017-0108.
- [57] K. J. Kuehner, R. Scheer, and S. Strassburger, "Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1227–1232, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.11.206.
- [58] H. Kuolt, J. Gauß, W. Schaaf, and A. Winter, "Optimization of pneumatic vacuum generators: heading for energy-efficient handling processes," in *10th International Fluid Power Conference*, Dresden, 2016, pp. 267–280.
- [59] M. Sommer, J. Stjepandić, S. Stobrawa, and M. von Soden, "Automatic Generation of Digital Twin Based on Scanning and Object Recognition," in *Advances in Transdisciplinary Engineering, Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems*, K. Hiekata, B. R. Moser, M. Inoue, J. Stjepandić, and N. Wognum, Eds.: IOS Press, 2019.
- [60] G. Santillan Martinez, S. Sierla, T. Karhela, and V. Vyatkin, "Automatic Generation of a Simulation-Based Digital Twin of an Industrial Process Plant," in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, D.C., DC, USA, Oct. 2018 - Oct. 2018, pp. 3084–3089.
- [61] Plattform Industrie 4.0, "Die Verwaltungsschale im Detail: von der Idee zum implementierbaren Konzept," Berlin, 2019. Accessed: Jan. 14 2021. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=14
- [62] M. Weyrich and F. Steden, "Produktionssysteme modulbasiert simulieren: Methodische Identifikation wiederverwendbarer Simulationsmodule im Engineering-Prozess," *wt Werkstattstechnik online*, vol. 2, no. 103, pp. 162–167, 2013.
- [63] M. Klein *et al.*, "Architektur und Technologiekomponenten eines digitalen Zwillings," *VDI-Kongress Automation 2019*, no. 2351, 89-102, 2019.
- [64] A. Deuter and S. Imort, "Product Lifecycle Management with the Asset Administration Shell," *Computers*, vol. 10, no. 7, 2021, doi: 10.3390/computers10070084.
- [65] R. Rasor, D. Göllner, R. Bernijazov, L. Kaiser, and R. Dumitrescu, "Towards collaborative life cycle specification of digital twins in manufacturing value chains," *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 229–234, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.035.
- [66] C. G. Lee and S. C. Park, "Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 213–222, 2014, doi: 10.7315/JCDE.2014.021.
- [67] H. Vermaak and J. Niemann, "Virtual commissioning: A tool to ensure effective system integration," in *2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM)*, Donostia, San Sebastian, Spain, 52017, pp. 1–6.

- [68] F. Fritz, *Ein Modell zur energetischen Analyse und Bewertung von Vakuum-Greifsystemen*, 1st ed. Aachen: Shaker Verlag, 2017.
- [69] V. Stegmaier, D. Dittler, N. Jazdi, and M. Weyrich, "A Structure of Modelling Depths in Behavior Models for Digital Twins," in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany, 962022, pp. 1–8.
- [70] J. Um, V. Gezer, A. Wagner, and M. Ruskowski, "Edge Computing in Smart Production," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Service and Industrial Robotics*, K. Berns and D. Görge, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 144–152.
- [71] S. Yin, J. Bao, J. Zhang, J. Li, J. Wang, and X. Huang, "Real-time task processing for spinning cyber-physical production systems based on edge computing," *J Intell Manuf*, vol. 31, no. 8, pp. 2069–2087, 2020, doi: 10.1007/s10845-020-01553-6.
- [72] A. Schmüdderich, M. Lochbichler, and A. Trächtler, "Methodik zur anforderungsgerechten Wahl der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen für die virtuelle Inbetriebnahme," in *VDI Tagung Mechatronik 2013*.
- [73] T. Lassila, A. Manzoni, A. Quarteroni, and G. Rozza, "Model Order Reduction in Fluid Dynamics: Challenges and Perspectives," in *Reduced Order Methods for Modeling and Computational Reduction*, A. Quarteroni and G. Rozza, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 235–273.
- [74] A. Verl, S. Röck, and C. Scheifele, *Echtzeitsimulation in der Produktionsautomatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [75] F. Ocker, C. Urban, B. Vogel-Heuser, and C. Diedrich, "Leveraging the Asset Administration Shell for Agent-Based Production Systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 1, pp. 837–844, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.186.
- [76] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, and P. Ji, "Digital twin modeling," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 372–389, 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
- [77] S. Bergmann, *Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen*. Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2013. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2013. [Online]. Available: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=23106>
- [78] D. Braun, N. Jazdi, W. Schlögl, and M. Weyrich, "Qualitative and quantitative evaluation of a methodology for the Digital Twin creation of brownfield production systems," in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania, 9122023, pp. 1–8.
- [79] Hevner, March, Park, and Ram, "Design Science in Information Systems Research," *MIS Quarterly*, vol. 28, no. 1, p. 75, 2004, doi: 10.2307/25148625.
- [80] R. J. Wieringa, *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [81] R. Baskerville, A. Baiyere, S. Gergor, A. Hevner, and M. Rossi, "Design Science Research Contributions: Finding a Balance between Artifact and Theory," *JAIS*, vol. 19, no. 5, pp. 358–376, 2018, doi: 10.17705/1jais.00495.
- [82] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research," *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [83] M. Shafto *et al.*, *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*, 2010.
- [84] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [85] C. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, "Review of digital twin applications in manufacturing," *Computers in Industry*, vol. 113, p. 103130, 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.103130.
- [86] B. Ashtari Talkhestani *et al.*, "An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System," *at - Automatisierungstechnik*, vol. 67, no. 9, pp. 762–782, 2019.

- [87] A. Belyaev *et al.*, *Modelling the Semantics of Data of an Asset Administration Shell with Elements of ECLASS*. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Whitepaper_Plattform-Eclass.pdf?__blob=publicationFile&v=11
- [88] *Virtuelle Inbetriebnahme: Modellarten und Glossar*, 3693 Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure e.V.; Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Berlin, Aug. 2016.
- [89] A. Zeller, *Absicherung von verteilten Automatisierungssystemen nach Änderungen der Steuerungssoftware: Modellkomposition zur Nutzung der funktionalen Verifikation*, 1st ed. Düren: Shaker, 2019.
- [90] F. Oestersötebier, *Modellbasierter Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme mithilfe semantischer Technologien: Model-based design of intelligent mechatronic systems using semantic web technologies*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2018.
- [91] C. Scheifele, *Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019.
- [92] M. Lochbichler, *Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme*. Paderborn: Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut, 2020.
- [93] *Kompressoren und Vakuumpumpen – Sicherheitsanforderungen: Teil 2: Vakuumpumpen; Deutsche Fassung EN 1012-2:1996+A1:2009*, 1012-2, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dec. 2011.
- [94] D. Straub, *Methode zur technischen Auslegung von Vakuum-Greifsystemen mit einer Mindesthaltdauer auf Basis fluidischer Untersuchungen*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2021.
- [95] *Druck: Grundbegriffe, Einheiten*, 1314, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Feb. 1977.
- [96] *Vakuumentchnik Benennung und Definitionen: Allgemeine Benennungen*, 28400, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., May. 1990.
- [97] *Pneumatic fluid power - Standard reference atmosphere*, 8778, ISO, Genf, Mar. 2003.
- [98] J. Schmalz GmbH.
- [99] S. Hesse, *Greifertechnik: Effektoren für Roboter und Automaten*, 1st ed. München: Hanser, 2011.
- [100] T. Tomokazu, S. Kikuchi, M. Suzuki, and S. Aoyagi, "Vacuum gripper imitated octopus sucker-effect of liquid membrane for absorption-," in *2015 IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, 92015, pp. 2929–2936.
- [101] U. Piatkowski and A. Lischka, "Tintenfische – die Spitzenathleten der Weltmeere," in *Faszination Meeresforschung*, G. Hempel, K. Bischof, and W. Hagen, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 143–146.
- [102] K. Rischka, M. Wiegemann, and A. Hartwig, "Kleben in der Natur — ein Lernfeld für die Technik," *Adhaes Kleb Dicht*, vol. 48, no. 9, pp. 12–17, 2004, doi: 10.1007/BF03244040.
- [103] W. Müller, "Das einzigartige Wattenmeer und seine Gezeiten," in *Lebenswelt Meer*, W. Müller, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 45–102.
- [104] H. Murrenhoff, *Pneumatik*, 2nd ed. Aachen: Shaker Verlag, 2014.
- [105] K. Jousten, *Handbuch Vakuumentchnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. Accessed: Sep. 10 2020.
- [106] R. Tella, J. R. Birk, and R. B. Kelley, "General Purpose Hands for Bin-Picking Robots," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 12, no. 6, pp. 828–837, 1982, doi: 10.1109/TSMC.1982.4308916.
- [107] S. M. Scheifele, *Generierung des Digitalen Zwillings für den Sondermaschinenbau mit Losgröße 1*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2020.
- [108] M. Barth and A. Fay, "Automated generation of simulation models for control code tests," *Control Engineering Practice*, vol. 21, no. 2, pp. 218–230, 2013, doi: 10.1016/j.conengprac.2012.09.022.
- [109] M. Hoernicke, A. Fay, and M. Barth, "Virtual plants for brown-field projects," in *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA): 8 - 11 Sept. 2015, City of Luxembourg, Luxembourg*, Luxembourg, 2015, pp. 1–8.

- [110] M. Oppelt, G. Wolf, O. Drumm, B. Lutz, M. Stöß, and L. Urbas, "Automatic Model Generation for Virtual Commissioning based on Plant Engineering Data," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 11635–11640, 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01512.
- [111] G. Lugaesi and A. Matta, "Automated Digital Twins Generation for Manufacturing Systems: a Case Study," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 1, pp. 749–754, 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.087.
- [112] G. Santillan Martinez, S. A. Sierla, T. A. Karhela, J. Lappalainen, and V. Vyatkin, "Automatic Generation of a High-Fidelity Dynamic Thermal-Hydraulic Process Simulation Model From a 3D Plant Model," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45217–45232, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2865206.
- [113] Art Systems Software GmbH, *FluidSIM® 6: Design. Simulate. Learn.* [Online]. Available: <https://www.art-systems.de/www/site/de/fluidsim/> (accessed: Mar. 15 2024).
- [114] Festo, *FluidSIM für Ihre Simulationsanwendung: Simulationssoftware zum Erstellen und Simulieren von Schaltplänen in der Pneumatik, Hydraulik und Elektrotechnik.* [Online]. Available: https://www.festo.com/de/de/e/technische-bildung/digitales-lernen/virtuelle-simulation-und-modellierung/fluidsim-id_1663056/ (accessed: Mar. 15 2024).
- [115] S. Krichel, *Komponentenmodellierung und Strukturoptimierung in industriellen Druckluftnetzen*, 1st ed. Herzogenrath: Shaker, 2012.
- [116] Pfeiffer Vacuum, *Vacuum Technology* (accessed: Jan. 13 2021).
- [117] S. Griebel, *Entwicklung und Charakterisierung fluidmechanischer nachgiebiger Aktuatoren am Beispiel eines multifunktionalen Sauggreifers*. Ilmenau: TU Ilmenau Universitätsbibliothek, 2021.
- [118] J. Liu, K. Tanaka, L. M. Bao, and I. Yamaura, "Analytical modelling of suction cups used for window-cleaning robots," *Vacuum*, vol. 80, no. 6, pp. 593–598, 2006, doi: 10.1016/j.vacuum.2005.10.002.
- [119] F. Novotny and M. Horak, "COMPUTER MODELLING OF SUCTION CUPS USED FOR WINDOW CLEANING ROBOT AND AUTOMATIC HANDLING OF GLASS SHEETS," *MMSJ*, vol. 2009, no. 02, pp. 113–118, 2009, doi: 10.17973/MMSJ.2009_06_20090304.
- [120] I. The MathWorks, *Pressure & Temperature Sensor (G): Measure pressure and temperature in gas networks.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/pressuretemperaturesensorg.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [121] Flow Rate Sensor (G), *Measure mass, energy, and volumetric flow rates in gas networks.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/flowratesensorg.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [122] Check Valve (G), *Check valve in a gas network.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/hydro/ref/checkvalveg.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [123] Pipe (G), *Rigid conduit for gas flow.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/pipeg.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [124] Local Restriction (G), *Restriction in flow area in gas network.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/localrestrictiong.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [125] I. The MathWorks, *3-Way Directional Valve (G): Controlled valve with three ports in a gas network.* [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/hydro/ref/3waydirectionalvalveg.html> (accessed: Oct. 3 2023).
- [126] *DIN SPEC 91345: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Apr. 2016.
- [127] S. Dierssen, "Systemkopplung zur komponentenorientierten Simulation digitaler Produkte," ETH Zurich, 2002.
- [128] Lenze SE, *Von der Simulation bis zur virtuellen Inbetriebnahme: Konkrete Anwendungsmöglichkeiten im Digital Engineering.* [Online]. Available: <https://www.lenze.com/de-de/virtuelle-inbetriebnahme-von-der-simulation-bis-zur-virtuellen-inbetriebnahme/> (accessed: Apr. 19 2022).

- [129] *Engineering von Anlagen - Evaluieren und Optimieren des Engineerings - Grundlagen und Vorgehensweise: Blatt 1*, 3695, Verein Deutscher Ingenieure e.V.; VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin, Nov. 2020.
- [130] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, *Statusreport: Industrie 4.0 Wertschöpfungsketten*. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/industrie-40-wertschoepfungsketten> (accessed: Jan. 10 2023).
- [131] V. Stegmaier, T. Eberhardt, W. Schaaf, N. Jazdi, and M. Weyrich, "Literature Review and Model Proposal on the Machine Life Cycle in Industrial Automation from Different Perspectives," 2023.
- [132] R. Rosen *et al.*, "Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus: Standpunkte und Thesen," *VDI-Statusreport*, 2020.
- [133] T. A. Abdel-Aty, E. Negri, and S. Galparoli, "Asset Administration Shell in Manufacturing: Applications and Relationship with Digital Twin," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 2533–2538, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.090.
- [134] A. Luder, A.-K. Behnert, F. Rinker, and S. Biffl, "Generating Industry 4.0 Asset Administration Shells with Data from Engineering Data Logistics," in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, Sep. 2020 - Sep. 2020, pp. 867–874.
- [135] UnitsML group, *Unitsml*. [Online]. Available: <https://www.unitsml.org/> (accessed: Oct. 21 2023).
- [136] A. Belyaev *et al.*, *Modelling the Semantics of Data of an Asset Administration Shell with Elements of ECLASS*. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Whitepaper_Plattform-Eclass.pdf?__blob=publicationFile&v=11
- [137] D. Dittler, D. Braun, T. Müller, V. Stegmaier, N. Jazdi, and M. Weyrich, "A procedure for the derivation of project-specific intelligent Digital Twin implementations in industrial automation," in *17th Technical Conference EKA - Design of Complex Automation SystemsAt: Magdeburg*.
- [138] Plattform Industrie 4.0, "Die Verwaltungsschale im Detail: von der Idee zum implementierbaren Konzept," Berlin, 2019. Accessed: Jan. 14 2021. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-pr%C3%A4sentation.pdf?__blob=publicationFile&v=14
- [139] Plattform Industrie 4.0, *RAMI 4.0 – Ein Orientierungsrahmen für die Digitalisierung*. [Online]. Available: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-eine-einfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [140] *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*, 2206, Verein Deutscher Ingenieure e.V.; Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Berlin, Nov. 2021.
- [141] A. Kufner, *Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen*. Dissertation. Stuttgart, 2012. Accessed: Jan. 27 2021.
- [142] J. Schmalz GmbH, *Vakuum-Komponenten*. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/> (accessed: Oct. 13 2023).
- [143] F. Gabriel, P. Bobka, and K. Dröder, "Model-Based Design of Energy-Efficient Vacuum-Based Handling Processes," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 538–543, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.03.006.
- [144] F. Fritz, C. v. Grabe, H. Kuolt, and H. Murrenhoff, "Benchmark of Existing Energy Conversion Efficiency Definitions for Pneumatic Vacuum Generators," in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, 2013, pp. 135–140.
- [145] J. Schmalz GmbH, *SBP 20 S03 SDA: Art-Nr.: 10.02.01.00567*. Grundejektor für universellen Einsatz. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/vakuum-erzeuger/grundejektoren/grundejektoren-sbp-307660/10.02.01.00567/> (accessed: Nov. 27 2023).

- [146] *Fluidtechnik - Graphische Symbole und Schaltpläne: Teil 1: Graphische Symbole für konventionelle und datentechnische Anwendungen*, DIN ISO 1219-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Jan. 2019.
- [147] *Kennzeichnung der Anschlüsse und Betätigungseinrichtungen von Pneumatikventilen und anderen Pneumatikbauteilen*, 11727, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Oct. 2003.
- [148] E. Arroyo, A. Fay, and M. Hoernicke, "A METHOD OF DIGITALISING ENGINEERING DOCUMENTS," EP3104302B1.
- [149] E. Arroyo, M. Hoernicke, P. Rodriguez, and A. Fay, "Automatic derivation of qualitative plant simulation models from legacy piping and instrumentation diagrams," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 92, pp. 112–132, 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.04.040.
- [150] D.-Y. Yun, S.-K. Seo, U. Zahid, and C.-J. Lee, "Deep Neural Network for Automatic Image Recognition of Engineering Diagrams," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 4005, 2020, doi: 10.3390/app10114005.
- [151] M. F. Theisen, K. N. Flores, L. Schulze Balhorn, and A. M. Schweidtmann, "Digitization of chemical process flow diagrams using deep convolutional neural networks," *Digital Chemical Engineering*, vol. 6, p. 100072, 2023, doi: 10.1016/j.dche.2022.100072.
- [152] S. Mani, M. A. Haddad, D. Constantini, W. Douhard, Q. Li, and L. Poirier, "Automatic Digitization of Engineering Diagrams Using Deep Learning and Graph Search," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*, 2020.
- [153] A. Antoniazzi, G. Perrone, and M. Matteucci, "A COMPUTER-IMPLEMENTED METHOD FOR READING A DIGITAL GRAPHICAL DIAGRAM REPRESENTING AN ELECTRIC CIRCUIT," EP 3770800A1.
- [154] C. Yang, J. Wang, L. Yang, D. Shi, and X. Duan, "Intelligent Digitization of Substation One-Line Diagrams Based on Computer Vision," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 38, no. 6, pp. 3912–3923, 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3290945.
- [155] M. Dey *et al.*, "A two-stage CNN-based hand-drawn electrical and electronic circuit component recognition system," *Neural Comput & Applic.*, vol. 33, no. 20, pp. 13367–13390, 2021, doi: 10.1007/s00521-021-05964-1.
- [156] B. Edwards and V. Chandran, "Machine recognition of hand-drawn circuit diagrams," in *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.00CH37100)*, Istanbul, Turkey, 2000, pp. 3618–3621.
- [157] G. Feng, C. Viard-Gaudin, and Z. Sun, "On-line hand-drawn electric circuit diagram recognition using 2D dynamic programming," *Pattern Recognition*, vol. 42, no. 12, pp. 3215–3223, 2009, doi: 10.1016/j.patcog.2009.01.031.
- [158] M. GÜNAY and M. KÖSEOĞLU, "Detection of circuit components on hand-drawn circuit images by using faster R-CNN method," *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 372–378, 2021, doi: 10.35860/iaej.903288.
- [159] M. Moetesum, S. Waqar Younus, M. Ali Warsi, and I. Siddiqi, "Segmentation and Recognition of Electronic Components in Hand-Drawn Circuit Diagrams," *ICST Transactions on Scalable Information Systems*, vol. 5, no. 16, p. 154478, 2018, doi: 10.4108/eai.13-4-2018.154478.
- [160] L. N. R, D. R, and P. S, "Handwritten Electric Circuit Diagram Recognition: An Approach Based on Finite State Machine," *IJMLC*, vol. 9, no. 3, pp. 374–380, 2019, doi: 10.18178/ijmlc.2019.9.3.813.
- [161] M. Rabbani, R. Khoshkangini, H. S. Nagendraswamy, and M. Conti, "Hand Drawn Optical Circuit Recognition," *Procedia Computer Science*, vol. 84, pp. 41–48, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.064.
- [162] Y. Zhang, C. Viard-Gaudin, and L. Wu, "An Online Hand-Drawn Electric Circuit Diagram Recognition System Using Hidden Markov Models," in *2008 International Symposium on Information Science and Engineering*, Shanghai, 122008, pp. 143–148.

- [163] *Zerstörungsfreie Prüfung Terminologie: Teil 8: Begriffe für die Dichtheitsprüfung*, 1330-8, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Jul. 1998.
- [164] W. Demtröder, *Experimentalphysik I*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. Accessed: Aug. 27 2020.
- [165] K. S. Mohamed, *Machine Learning for Model Order Reduction*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [166] P. Benner, T. Breiten, H. Faßbender, M. Hinze, T. Stykel, and R. Zimmermann, *Model Reduction of Complex Dynamical Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [167] I. The MathWorks, *Reduced Order Modeling*. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/discovery/reduced-order-modeling.html> (accessed: Mar. 23 2024).
- [168] L. d. P. P. Mapa, F. d. A. das Neves, and G. P. Guimarães, "Dynamic Substructuring by the Craig–Bampton Method Applied to Frames," *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 257–266, 2021, doi: 10.1007/s42417-020-00223-4.
- [169] K. Mohaghegh, "Linear and nonlinear model order reduction for numerical simulation of electric circuits," Dissertation, Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2010.
- [170] J. Bokor and G. Balas, "LINEAR PARAMETER VARYING SYSTEMS: A GEOMETRIC THEORY AND APPLICATIONS," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 38, no. 1, pp. 12–22, 2005, doi: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.00003.
- [171] M. Heinkenschloss, T. Reis, and A. C. Antoulas, "Balanced truncation model reduction for systems with inhomogeneous initial conditions," *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 559–564, 2011, doi: 10.1016/j.automatica.2010.12.002.
- [172] T. Simpson, N. Dervilis, and E. Chatzi, "Machine Learning Approach to Model Order Reduction of Nonlinear Systems via Autoencoder and LSTM Networks," *J. Eng. Mech.*, vol. 147, no. 10, p. 9, 2021, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001971.
- [173] H. F. S. Lui and W. R. Wolf, "Construction of Reduced Order Models for Fluid Flows Using Deep Feedforward Neural Networks," *J. Fluid Mech.*, vol. 872, pp. 963–994, 2019, doi: 10.1017/jfm.2019.358.
- [174] C. J. G. Rojas, A. Dengel, and M. D. Ribeiro, "Reduced-order Model for Fluid Flows via Neural Ordinary Differential Equations," Feb. 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/pdf/2102.02248v2>
- [175] MoRePaS, *RBmatlab*. [Online]. Available: <https://www.morepas.org/software/rbmatlab/>
- [176] CADFEM Germany GmbH, *MODEL REDUCTION INSIDE ANSYS – MODEL REDUCTION FOR FASTER CALCULATIONS*. [Online]. Available: <https://www.cadfem.net/en/our-solutions/cadfem-ansys-extensions/model-reduction-inside-ansys.html> (accessed: Mar. 23 2024).
- [177] *pyMOR - Model Order Reduction with Python*. [Online]. Available: <https://github.com/pymor/pymor?tab=readme-ov-file> (accessed: Mar. 23 2024).
- [178] P. Benner and S. W. R. Werner, *MORLAB - Model Order Reduction Laboratory*. [Online]. Available: <http://www.mpi-magdeburg.mpg.de/projects/morlab> (2019). doi:10.5281/zenodo.3332716
- [179] D. A. Chappell, *Enterprise service bus: [theory in practice]*, 1st ed. Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Paris, Sebastopol, Taipei, Tokyo: O'Reilly, 2004.
- [180] J. M. Rožanec *et al.*, "Towards actionable cognitive digital twins for manufacturing," *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2615, 2020. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086444510&partnerID=40&md5=45c9d48f0c005edf30dbc09dfe790385>
- [181] P. Tittmann, *Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung : mit 115 Bildern, zahlreichen Beispielen und 92 Aufgaben*, 3rd ed. München: Hanser, 2019.
- [182] L. Exel, G. Frey, G. Wolf, and M. Oppelt, "Re-use of existing simulation models for DCS engineering via the Functional Mock-up Interface," in *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Barcelona, Spain, 2014, pp. 1–4.

- [183] E. Negri, L. Fumagalli, C. Cimino, and M. Macchi, "FMU-supported simulation for CPS Digital Twin," *Procedia Manufacturing*, vol. 28, pp. 201–206, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2018.12.033.
- [184] ITI GmbH. Accessed: Apr. 14 2024. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logo-SIMX_4C_M.png
- [185] *Modelica*. Accessed: Apr. 14 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Modelica>
- [186] *MATLAB LOGO*. Accessed: Apr. 14 2024. [Online]. Available: <https://1000logos.net/matlab-logo/>
- [187] H. Jiang and E. Learned-Miller, "Face Detection with the Faster R-CNN," in *2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, Washington, DC, DC, USA, 52017, pp. 650–657.
- [188] M. Maity, S. Banerjee, and S. Sinha Chaudhuri, "Faster R-CNN and YOLO based Vehicle detection: A Survey," *5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pp. 1442–1447, doi: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418274.
- [189] I. The MathWorks, *Pretrained Deep Neural Networks*. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/deeplearning/ug/pretrained-convolutional-neural-networks.html>
- [190] P. Stephan, K. Schaber, K. Stephan, and F. Mayinger, *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, 19th ed. Berlin: Springer Berlin, 2013.
- [191] I. The MathWorks, *Mass Flow Rate Source (G): Generate constant mass flow rate*. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/massflowratesourceg.html>
- [192] I. The MathWorks, *Controlled Mass Flow Rate Source (G): Generate time-varying mass flow rate*. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/simscape/ref/controlledmassflowratesourceg.html>
- [193] J. Schmalz GmbH, *SXMPi IO-Link Class B: Operating instructions*. EN-US · 30.30.01.01721 · 02 · 10/2. [Online]. Available: https://pimmedia.schmalz.com/MAM_Library/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300101721/BAL_30.30.01.01721_de-DE.pdf
- [194] H. D. Baehr and S. Kabelac, *Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [195] J. M. Smith, H. C. van Ness, M. M. Abbott, and M. T. Swihart, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2018.
- [196] I. The MathWorks, *Translational Mechanical Converter (G): Interface between gas and mechanical translational networks*.
- [197] J. Schmalz GmbH, *SAB 60 NBR-60 G1/4-IG: Art-Nr.: 10.01.06.00852*. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/vakuum-sauggreifer/sauggreifer-fuer-blechhandhabung/balgsauggreifer-sab-1-5-falten-303676/10.01.06.00852/>
- [198] J. Schmalz GmbH, *SPB4 50 SI-55 G1/2-AG: Art-Nr.: 10.01.06.03534*. Balgsauggreifer (rund) für besonders ebene Werkstücke. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/vakuum-sauggreifer/sauggreifer-fuer-die-verpackungsindustrie/balgsauggreifer-spb4-4-5-falten-304541/10.01.06.03534/>
- [199] B. N. J. Persson, "Theory of rubber friction and contact mechanics," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 115, no. 8, pp. 3840–3861, 2001, doi: 10.1063/1.1388626.
- [200] A. Tiwari and B. N. J. Persson, "Theory for diffusive and ballistic air leakage and its application to suction cups," Jun. 2019.
- [201] J. Schmalz GmbH, *Vakuum-Komponenten: Katalog 2016/2017*.
- [202] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," 2015.
- [203] A. Rácz, D. Bajusz, and K. Héberger, "Effect of Dataset Size and Train/Test Split Ratios in QSAR/QSPR Multiclass Classification," *Molecules (Basel, Switzerland)*, vol. 26, no. 4, 2021, doi: 10.3390/molecules26041111.

- [204] *Mathematical Morphology and Its Applications to Image Processing*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994.
- [205] J. Schmalz GmbH, *SCPSi 10 G02 NC M12-5: Art-Nr.: 10.02.02.04123*. Kompaktejektor m. integrierter Luft- sparregelung in schmaler Bauform und IO-Link Funktionalität. [Online]. Available: <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/vakuum-erzeuger/kompaktejektoren/kompaktejektoren-scps-scpsi-307842/10.02.02.04123/>
- [206] *Kennzeichnung der Anschlüsse und Betätigungseinrichtungen von Pneumatikventilen und anderen Pneumatikbauteilen*, 11727, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Oct. 2003.
- [207] HAWE Hydraulik SE, *Schaltdruckdifferenz (Hysterese)*. [Online]. Available: <https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/schaltdruckdifferenz-hysterese/> (accessed: Nov. 23 2023).
- [208] J. Schmalz GmbH, *SEM-C: Bedienungsanleitung*. [Online]. Available: https://pimmedia.schmalz.com/MAM_Library/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300100048/BAL_30.30.01.00048_de-DE.pdf (accessed: Apr. 14 2024).
- [209] J. Schmalz GmbH, *Kompaktejektor SCPSi-L: Betriebsanleitung*. [Online]. Available: https://pimmedia.schmalz.com/MAM_Library/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300102084/BAL_30.30.01.02084_de-DE.pdf
- [210] J. Schmalz GmbH, *SAEC 10 ECO: Ejektor*. Bedienungsanleitung. [Online]. Available: https://pimmedia.schmalz.com/MAM_Library/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300100893/BAL_30.30.01.00893_de-DE.pdf
- [211] J. C. Bansal and M. S. Uddin, *Computer Vision and Machine Learning in Agriculture, Volume 3*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.
- [212] Evidently AI Team, *Accuracy, precision, and recall in multi-class classification*. [Online]. Available: <https://www.evidentlyai.com/classification-metrics/multi-class-metrics> (accessed: Jan. 16 2024).
- [213] J. Schmalz GmbH, *Mini Compact Ejector SCPMi: Operationg Instructions*. [Online]. Available: https://pimmedia.schmalz.com/MAM_Library/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300101961/BAL_30.30.01.01961_en-EN.pdf
- [214] D. Straub and K. Huber, "Potentials of vacuum gripping systems in human-robot-collaboration applications," in *ISR 2018: 50th International Symposium on Robotics*, 2018, pp. 155–158.
- [215] D. Straub and W. Schaaf, "Experimental and Theoretical Investigation of Lightweight Pumps and Fluid Reservoirs for Electrically Driven Vacuum Systems in Automated Handling Processes," in *11th International Fluid Power Conference*, Aachen, 2018, pp. 434–445.
- [216] Pascal Gaggero, *Real-time speed of IO-Link wired*. [Online]. Available: <https://www.innovating-automation.blog/real-time-speed-of-io-link/> (accessed: Mar. 15 2024).

